



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres

Desarrollo de un Estabilizador para Asfalto Modificado con Estireno-Butadieno-Estireno
(SBS)

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres

Presenta:

Manuel Ignacio Parra Medina

Dirigido por:

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Co-dirigido por:

Dra. Genoveva Hernández Padrón

SINODALES

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Presidente

Dra. Genoveva Hernández Padrón

Secretario

Dr. J. Jesús Alonso Mota

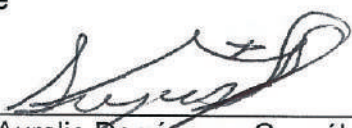
Vocal


Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Suplente

M.I. José Antonio Gómez López

Suplente


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad


Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2013
México.

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

RESUMEN

En el año 2012, SCT (por sus iniciales en español) se reportó un inventario de 300,000 km de carreteras pavimentadas en México, de las cuales el 11% cuentan con asfalto modificado. El problema que se presenta en los asfaltos modificados es la separación de fases del polímero modificador y el asfalto por la diferencia de densidades de éstos. Esta segregación se ve altamente incrementada cuando el asfalto es almacenado en tiempo prolongado y a altas temperaturas. Por lo cual se ve la necesidad de emplear un agente estabilizador que ligue químicamente ambos materiales. Partiendo de esto, el presente trabajo contribuye en la propuesta de un estabilizador a base de resina fenólica y azufre que permita unir de manera química el asfalto y el polímero SBS. Primeramente se definieron las condiciones de síntesis de la resina fenólica, así como la metodología empleada en la modificación de asfalto convencional AC-20 con polímero SBS con y sin estabilizador. Se realizaron los envejecimientos de los asfaltos modificados, y la caracterización química mediante Espectroscopía de Infrarrojo para comparar la presencia de los grupos funcionales antes y después de haber sido expuestos a volatilización y oxidación. Finalmente se les realizaron pruebas mecánicas y reológicas para observar su variación al introducir el agente estabilizador. Los resultados muestran que el asfalto modificado con SBS y estabilizador conserva los grupos funcionales, lo cual indica que la liga química se mantiene aún después de haber sido envejecido. En el aspecto mecánico, se observó un desempeño adecuado del asfalto debido a la buena respuesta que presenta tanto en deformación como fatiga después de modificado y estabilizado.

(Palabras clave: Asfalto modificado, SBS, resina fenólica, azufre, segregación)

SUMMARY

In 2012, the SCT (from its initials in Spanish) reported an inventory of 300,000 kilometers of paved roads in Mexico, 11% of which contain modified asphalt. The problem occurring in modified asphalts is phase separation of the polymer modifier and the asphalt due to the differences in density. This segregation is greatly increased when the asphalt is stored for a long time at high temperatures. It is therefore necessary to use a stabilizing agent that chemically binds both materials. As a result, the present study contributes to the proposal of a stabilizer based on phenolic resin and sulfur which makes possible a chemical union of the asphalt and SBS polymer. First the conditions of synthesis of the phenolic resin were defined, as well as the methodology used in the modification of conventional AC-20 asphalt with SBS polymer, with and without a stabilizer. Aging of the modified asphalt was carried out, as well as chemical characterization using infrared spectroscopy to compare the presence of the functional groups before and after being exposed to volatilization and oxidation. Finally, mechanical and rheological tests were done to observe their variation when the stabilizing agent was introduced. Results show that the asphalt modified with SBS and stabilizer maintains the functional groups, which indicates that the chemical link is maintained even after aging. On the mechanical side, an adequate performance of the asphalt was observed due to the good response it showed regarding both deformation and fatigue after being modified and stabilized.

(Key words: Modified asphalt, SBS, phenolic resin, sulfur, segregation)

DEDICATORIAS

*A mi MADRE por su continuo apoyo y motivación,
porque además de alentarme día a día se privó de
muchas cosas para que yo pudiera obtener este
grado ¡Gracias Mamá!*

*A toda mi FAMILIA por su constante apoyo y que
siempre estuvieron al pendiente de que me sintiera
bien a pesar de estar lejos de ellos.*

*A mis AMIGOS por su inseparable amistad y
continuo aliento hacía mí.*

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llevar a cabo esta etapa de mi vida.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por el apoyo tanto en sus instalaciones como en el equipo requerido para poder llevar a buen término mi investigación y maestría.

A CONACYT por el apoyo otorgado para la realización y culminación de esta maestría.

A la Dra. Luz Pérez Rea por su constante apoyo, motivación y sabios consejos durante toda la maestría hacia este servidor.

A la Dra. Genoveva Hernández Padrón por su paciencia y apoyo en las etapas de experimentación química.

Al Dr. Jesús Alonso Mota por apoyarme en la obtención de los asfaltos y agregados empleados en esta investigación.

A la química Carmen Vázquez Ramos por su apoyo en la medición de las propiedades mecánicas de las muestras preparadas en CFATA-UNAM-Juquilla.

A la bióloga Lourdes Palma por su apoyo en la observación de las muestras por MET en el INB-UNAM-Juquilla.

Al Instituto Mexicano del Transporte por el valioso apoyo brindado para la realización de los ensayos de reología y mezclas asfálticas.

A la empresa SURFAX por el apoyo ofrecido para la realización de los envejecimientos de las muestras de asfalto.

Índice	Página
RESUMEN.....	- i -
SUMMARY.....	- ii -
DEDICATORIAS.....	- iii -
AGRADECIMIENTOS.....	- iv -
Índice.....	- v -
Índice de Figuras.....	- viii -
Índice de Tablas.....	- x -
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
2. ANTECEDENTES.....	- 2 -
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	- 7 -
3.1 Asfalto Modificado	- 7 -
3.2 Asfalto	- 9 -
3.3 Polímeros.....	- 10 -
3.4 Funcionamiento del Estabilizador	- 13 -
3.5 Justificación.....	- 14 -
3.6 Descripción del problema.....	- 14 -
3.7 Hipótesis.....	- 15 -
3.8 Objetivo.....	- 15 -
3.8.1 Objetivos específicos.....	- 15 -
3.8.2 Alcances	- 15 -
4. METODOLOGÍA	- 16 -
4.1 Establecimiento de las condiciones de síntesis para la preparación del estabilizador...-	18 -
4.1.1 Proceso de sintetizado	- 18 -
4.2 Realización de la síntesis del estabilizador	- 18 -
4.3 Realización de las mezclas asfalto-polímero SBS y asfalto polímero SBS Estabilizador ...-	19 -
4.3.1 Mezcla AP2	- 20 -
4.3.2 Mezcla AP3	- 22 -
4.3.3 Mezcla APE.....	- 22 -
4.3.4 Mezcla APA	- 25 -

4.4	Envejecimiento de los asfaltos modificados	- 25 -
4.4.1	Introducción	- 25 -
4.4.2	Ensaye de película delgada en horno (TFOT) (ASTM D 1754-02).....	- 26 -
4.4.3	Ensaye de cámara de envejecimiento a presión (PAV) (ASTM D6521-03a).....	- 29 -
4.5	Caracterización química de los asfaltos modificados.....	- 32 -
4.5.1	Introducción	- 32 -
4.5.2	Espectroscopía.....	- 32 -
4.5.3	Espectroscopía Infrarroja	- 34 -
4.6	Ensayo de tracción directa en plásticos (ASTM D638-10).....	- 38 -
4.6.1	Significado y uso de la prueba	- 38 -
4.6.2	Procedimiento de la prueba	- 40 -
4.7	Ensayo de reómetro de corte dinámico (ASTM D7175-08).....	- 42 -
4.7.1	Introducción	- 42 -
4.7.2	Significado y uso de la prueba	- 43 -
4.7.3	Procedimiento de la prueba	- 44 -
4.8	Prueba de viscosidad rotacional (ASTM D4402-12).....	- 45 -
4.8.1	Introducción	- 45 -
4.8.2	Significado y uso de la prueba	- 46 -
4.8.3	Procedimiento de la prueba	- 47 -
4.9	Determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas mediante el ensaye Marshall.....	- 48 -
4.9.1	Significado y uso de la prueba	- 48 -
4.9.2	Caracterización del agregado pétreo	- 49 -
4.9.3	Elaboración de las pastillas para el ensaye Marshall (Normas de Construcción SCT 1981 Tomo IX, 5-5.10, ASTM D 6926).....	- 52 -
4.9.4	Determinación de los porcentajes de vacíos existentes en la mezcla asfáltica (VMC, VAM Y VFA) (Normas de Construcción SCT 1981 Tomo IX, 5-5.12, ASTM D 1188-96).....	- 56 -
4.9.5	Determinación de la Estabilidad y Flujo de los especímenes Marshall (ASTM D 6927-06).....	- 58 -
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	- 60 -
5.1	Ensaye de película delgada en horno (TFOT).....	- 60 -
5.2	Ensaye de cámara de envejecimiento a presión (PAV).....	- 60 -
5.3	Caracterización de las muestras de asfalto mediante Espectroscopía infrarroja	- 61 -

5.4	Ensayo de tracción directa en plásticos.....	- 66 -
5.5	Ensayo de reómetro de corte dinámico.....	- 67 -
5.6	Prueba de viscosidad rotacional.	- 75 -
5.7	Determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas mediante el ensayo Marshall.....	- 78 -
5.7.1	Caracterización del agregado pétreo	- 78 -
5.7.2	Características volumétricas, de carga y deformación de las mezclas asfálticas elaboradas (A, AP2 y APE).....	- 79 -
5.7.3	Determinación del contenido óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas (A, AP2 y APE).....	- 83 -
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	- 86 -
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 89 -
8.	ANEXOS.....	- 96 -

Índice de Figuras

Página

3-1. Esquema de los componentes del asfalto (Delgado, 2006).....	- 10 -
3-2. Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. a) Lineal no ramificado. b) Lineal ramificado. c) Termoestable sin ramificación. d) Termoestable con ramificación (Askeland y Phulé, 2004).	- 11 -
3-3. Estructura del copolímero SBS radial (Rodríguez et al., 2001b).....	- 12 -
4-1. Actividades realizadas en la metodología experimental.	- 16 -
4-2. Proceso de reflujo de los reactivos una vez incorporado el ácido abiético (Hernández-Padrón et al., 2002).....	- 19 -
4-3. Equipo montado para la realización de la mezcla del asfalto.	- 21 -
4-4. Proceso de incorporación del polímero SBS al asfalto.	- 21 -
4-5. Identificación de la mezcla AP2.	- 22 -
4-6. Materiales con los cuales se modificó el asfalto: polímero SBS, resina fenólica y azufre. ...	- 23 -
4-7. Forma en la que se adicionó el azufre a la mezcla asfalto-polímero.	- 24 -
4-8. Manera en la que se adicionó la resina a la mezcla asfalto-polímero.	- 24 -
4-9. Identificación de la mezcla APE.....	- 25 -
4-10. Colocación de la muestra en la charola de prueba y proceso de pesado de la misma.....	- 28 -
4-11. Prueba de TFOT en proceso.	- 28 -
4-12. Encendido y fijación de los valores de presión y temperaturas en el recipiente a presión.	- 30 -
4-13. Encendido del horno de vacío.....	- 30 -
4-14. Inicio del proceso de eliminación de burbujas de las muestras de asfalto.	- 31 -
4-15. Regiones del espectro electromagnético (Skoog et al., 2001).	- 33 -
4-16. Métodos de absorción. El analito puede absorber parte de la energía radiante incidente P_o y se transmite un haz de menor energía radiante P . Para que pueda haber absorción, la energía del rayo incidente debe corresponder a uno de los niveles de energía mostrados en b). En c) se ilustra el espectro de absorción del analito (Skoog et al., 2001).	- 34 -
4-17. Vibraciones de un grupo de átomos (Hernández-Padrón, 1998).	- 35 -
4-18. Cubeta de reflectancia total atenuada (RTA) para espectroscopía infrarroja (Harvey, 2002). ...	- 36 -
4-19. Obtención de la muestra a analizar.	- 37 -
4-20. Colocación de la película de la muestra en el cristal de diamante del espectrofotómetro.	- 38 -
4-21. Ensayo de tracción directa (SUPERPAVE, 1994).....	- 39 -
4-22. Tensión y deformación en la falla (SUPERPAVE, 1994).	- 40 -
4-23. Probetas de las muestras ensayadas.	- 41 -
4-24. Colocación de la muestra en el equipo de tracción.....	- 41 -
4-25. Reómetro de corte dinámico (SUPERPAVE, 1994).....	- 42 -
4-26. Comportamiento Elástico y Viscoso (SUPERPAVE, 1994).	- 43 -
4-27. Preparación del reómetro para la realización del ensaye de módulo de corte dinámico.....	- 44 -
4-28. Muestras preparada para la realización de la prueba.	- 45 -
4-29 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional (SUPERPAVE, 1994).	- 46 -
4-30. Colocación de la geometría dentro del recipiente con muestra.....	- 47 -
4-31. Proceso de rotación de la geometría empleada del viscosímetro.	- 48 -
4-32. Proceso de cribado del material pétreo.	- 49 -
4-33. Retención del material pétreo en el calibrador del ensaye de partículas alargadas.....	- 50 -

4-34. Proceso de trituración del material en la máquina de Los Ángeles.	- 51 -
4-35. Proceso de agitado del cilindro con la muestra y la solución.	- 52 -
4-36. Calentamiento del agregado pétreo en el horno.	- 54 -
4-37. Incorporación del asfalto al agregado pétreo.	- 54 -
4-38. Proceso de mezclado del agregado pétreo con el asfalto.	- 55 -
4-39. Proceso de enfriamiento de pastilla.	- 56 -
4-40. Determinación del espesor de la pastilla.	- 57 -
4-41. Peso de la pastilla sin recubrir al aire.	- 57 -
4-42. Peso de la pastilla cubierta con parafina al aire.	- 58 -
4-43. Especímenes en saturación a 60°C.	- 59 -
4-44. Ensaye de Estabilidad y Flujo en proceso.	- 59 -
5-1. Espectro IR de absorbancia de la muestra A sin envejecer.	- 62 -
5-2. Espectro IR de absorbancia del polímero SBS-411.	- 62 -
5-3. Espectro IR de absorbancia del estabilizador.	- 63 -
5-4. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE sin envejecer.	- 64 -
5-5. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE envejecidas en TFOT.	- 64 -
5-6. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE envejecidas en PAV.	- 65 -
5-7. Espectro IR de absorbancia de la muestra APE tanto sin envejecer como envejecida.	- 66 -
5-8. Gráfica Esfuerzo - Deformación de las muestras ensayadas en la prueba de tracción.	- 67 -
5-9. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 46°C.	- 71 -
5-10. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 64°C.	- 72 -
5-11. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 76°C.	- 72 -
5-12. Curva viscosidad-temperatura de las muestras sin envejecer.	- 75 -
5-13. Curva viscosidad-temperatura de las muestras envejecidas en TFOT.	- 77 -
5-14. Curva Peso Volumétrico - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 79 -
5-15. Curva Estabilidad - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 80 -
5-16. Curva Flujo - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 80 -
5-17. Curva Vacíos - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 81 -
5-18. Curva Vacíos - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 82 -
5-19. Curva VFA - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.	- 82 -

Índice de Tablas

Página

3-1. Características generales de los modificadores (Figuroa et al., 2007).	- 8 -
4-1. Mezclas asfalto-polímero realizadas con su respectiva abreviatura	- 20 -
4-2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.	- 53 -
4-3. Porcentajes de asfalto utilizados en las mezclas asfálticas.	- 53 -
5-1. Porcentajes de pérdida de masa de las muestras envejecidas en TFOT.....	- 60 -
5-2. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A sin envejecer.	- 68 -
5-3. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 sin envejecer.	- 68 -
5-4. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE sin envejecer.	- 69 -
5-5. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A envejecida en TFOT.....	- 69 -
5-6. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 envejecida en TFOT.....	- 70 -
5-7. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE envejecida en TFOT.....	- 70 -
5-8. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A envejecida en PAV.....	- 73 -
5-9. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 envejecida en PAV.....	- 74 -
5-10. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE envejecida en PAV.....	- 74 -
5-11. Temperaturas de mezclado y compactación para la elaboración de mezclas asfálticas.....	- 76 -
5-12. Calidad del material pétreo empleado en la realización de las mezclas asfálticas.....	- 78 -
5-13. Características obtenidas en la mezcla con muestra A.....	- 83 -
5-14. Características obtenidas en la mezcla con muestra AP2.	- 84 -
5-15. Características obtenidas en la mezcla con muestra APE.....	- 85 -

ANEXOS

Página

1. Geometría de los especímenes ensayados en la prueba de tracción para plásticos.	- 96 -
2. Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG (N-CMT-4-05-004/08).	- 97 -
3. Gráficas de la zona visco-elástica de las muestra ensayadas en el reómetro.	- 98 -
4. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL) (N-CMT-4-04/08).	- 105 -
5. Granulometría original del material pétreo empleado en las mezclas asfálticas.	- 106 -
6. Granulometría empleada en las mezclas asfálticas.	- 107 -
7. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall (N-CMT-4-05-003/08).	- 108 -
8. Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall (N-CMT-4-05-003/08).	- 108 -
9. Resultados del Ensaye Marshall.	- 109 -

1. INTRODUCCIÓN

Se estima que actualmente se tienen en el territorio nacional una red de carreteras pavimentadas alrededor de unos 300,000 km; de los cuales aproximadamente en un 11% es decir, 33,000 km, se ha empleado asfalto modificado con polímeros; el cual se ha estado utilizando debido a algunos beneficios tales como: amplían la vida útil de los pavimentos, mejoran la impermeabilidad, incrementan la adhesividad, se tienen mejoras en el desempeño a altas temperaturas, el mantenimiento del pavimento es mínimo, entre otros (Cruz, 2011).

Los asfaltos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero o hule molido de neumáticos, que son sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, y disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación, como lo indica la normativa de materiales N.CMT-4.05-002/06 (IMT, 2006).

El problema que se presenta en los asfaltos modificados, es que para bajos niveles de concentración del polímero, éste puede separarse del asfalto por falta de estabilización. Esta separación surge debido a la diferencia en densidades entre el asfalto y el polímero.

En estos casos el problema fundamental es controlar la compatibilidad asfalto-polímero para conseguir la morfología requerida del composito y conservar las propiedades del sistema. Es importante decir que esta morfología no siempre se obtiene de manera uniforme en todo el sistema, debido precisamente a la compatibilidad de las especies, por lo que se hace necesario, en algunas ocasiones, el empleo de un agente de compatibilización que lo normalice (Rodríguez et al., 2001b).

2. ANTECEDENTES

La modificación de asfaltos empezó a utilizarse cuando se pensó que éste tuviera mejor comportamiento, dado que los asfaltos originales tenían problemas con el envejecimiento y oxidación, la capacidad para soportar altas o bajas temperaturas, el alto índice de tránsito, así como las cargas transmitidas al pavimento (Limón et al., 1996).

La historia de modificación del asfalto no es tan reciente como comúnmente se cree (King et al., 1999), los procesos de modificación del asfalto con la participación de polímeros naturales y sintéticos fueron patentados alrededor del año 1843 (Thompson y Hoiberg, 1979).

Se han encontrado reportes de que en 1873, Samuel Whiting se adjudicó una patente de una mezcla de asfalto para pavimentos que contenía 1% peso/peso de un látex que se obtenía de una planta denominada "balata" (Hernández, 2006).

Proyectos de prueba fueron puestos en marcha en Europa en los años de 1930, y el neopreno de látex se empezó a utilizar en Norteamérica en el año 1950 (King et al., 1999).

A finales de los años 50's fueron realizadas las primeras polimerizaciones por Stockmayer (1943) y Flory (1952), y el desarrollo de polímeros se comenzó a difundir en el viejo continente. Así, en los años 1970, Europa adelantó a Estados Unidos en el uso de los asfaltos modificados por motivo de los contratistas, quienes preveían garantías, motivados por el gran interés de disminuir los costos de conservación (Terrel y Walter, 1986).

A mitad de los años 1980, se desarrollaron nuevos polímeros y la tecnología Europea se empezó a usar en los Estados Unidos (Collins, 1986; Brule, 1996).

Al pasar de los años el uso de polímeros aumentó, especialmente después de la introducción y desarrollo del Programa Estratégico de Investigación de Autopistas (Strategic Highway Research Program- SHRP), a partir del cual se desarrollaron especificaciones de ligantes asfálticos SUPERPAVE Performance Graded (PG) a principios de los años noventa en los Estados Unidos.(Liewald y Porzio, 2007).

A pesar de las bondades que tiene un asfalto modificado con polímeros (Lu et al., 1999), encontró que existe una separación de fases entre el polímero modificador y el asfalto debido a la diferencia de densidades de estos dos materiales, así como una falta de estabilización cuando se encuentra almacenado y a altas temperaturas (Polacco et al., 2008).

En ese sentido se han realizado investigaciones acerca de encontrar un agente estabilizador que evite la segregación del polímero y el asfalto.

Rodríguez et al. (2001b), descubrió que un estabilizador formado por sulfonación de fenol, permite tener buenas propiedades debido a que favorece la formación de una malla en el interior del asfalto modificado con polímero.

Ouyang et al. (2005) encontró que al adicionarle arcilla caolinita al asfalto modificado con SBS se obtiene un incremento en las propiedades mecánicas del asfalto, además existe una relación entre la proporción de arcilla a emplear con las propiedades reológicas y mecánicas, puesto que al agregar un porcentaje menor al 2% en peso de la

arcilla con respecto al polímero no se mejoran las propiedades reológicas. Pudo visualizar que la temperatura a la cual se encuentra sometido el composito influye de manera significativa en el comportamiento que presenta un asfalto modificado con SBS y caolinita.

Finalmente concluye su investigación diciendo que la interacción que se da entre el SBS y la arcilla es clave para la determinación de la estabilidad por separación que tiene el asfalto modificado una vez que se encuentre almacenado.

Investigaciones hechas por Hernández y Alonso (2006) demostraron que el azufre como estabilizador ofrece un incremento en los valores del reforzamiento entre el asfalto y el polímero SBS.

En lo referente a investigaciones hechas con aceite, Ahmedzade et al. (2007) realizó mezclas de asfalto modificado con SBS a la cual le adicionó aceite de alquitrán, y pudo observar como ciertas propiedades reológicas tales como el punto de reblandecimiento y penetración se ven altamente favorecidas al agregársele este modificador.

De igual manera al realizar mezclas asfálticas con este composito y efectuarles ensaye Marshall, visualizó como es que se incrementan los valores de estabilidad a medida que se incrementa el porcentaje de aceite empleado. En sus reportes el informa que la mezcla asfáltica que contiene este modificador permite incrementar la vida útil del pavimento tanto en lo que respecta a deformación como a fatiga. De todas las proporciones hechas en su experimento, el encontró que la mezcla modificada con 8% de aceite de alquitrán mas 6% de SBS es la que mejor desempeño presenta en cuanto a propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica.

Polacco et al. (2008) al realizar estudios acerca del grado de interacción que existen entre un asfalto modificado con SBS y arcilla observó que el asfalto y la arcilla presentan una matriz intercalada de nanocompositos, lo que sugiere que se pueda presentar cierto grado de exfoliación en este asfalto modificado. Mediante escaneo de calorimetría diferencial, encontró también que dicha mezcla no afecta de manera significativa la temperatura de transición a bajas temperaturas.

De sus estudios pudo deducir que las propiedades reológicas de un asfalto modificado con SBS y arcilla se encuentra íntimamente ligado con la estructura interna que se forma dentro del coloide formado por el asfalto y el polímero SBS, lo que es un indicativo del desempeño que tiene en el aspecto mecánico un asfalto modificado de este tipo.

Por su parte Xiang et al. (2009) observó que existe un desempeño adecuado del asfalto modificado cuando es adicionado con hule de llanta molido, pues encontró que las propiedades se ven incrementadas cuando se le es incorporado una fracción de hule molido al asfalto modificado. Una de las ventajas que presenta este tipo de material es su buena respuesta elástica que le proporciona el hule de llanta, puesto que al agregarlo al asfalto modificado se suma a la capacidad que ya tiene el polímero lo que incrementa de manera significativa el comportamiento elástico del composito.

Pudo visualizar además que existe una muy buena compatibilidad entre el hule con el polímero y el asfalto, lo que facilita que se dé una muy buena distribución del hule de llanta molido dentro de la matriz de asfalto, generando una red perfectamente reticulada que ayuda a que se reduzca la separación que se puede dar entre el polímero y el asfalto convencional.

Zhang et al. (2010) observó que el emplear azufre como agente estabilizador, presenta problemas en el asfalto modificado debido a la susceptibilidad al envejecimiento que se presenta.

Jasso et al. (2012) realizó mezclas de asfalto modificado con SBS y le agregó una arcilla Montmorillonita, en ellas encontró que existe una fuerza interna considerable dentro del asfalto modificado, que permite se genere una red altamente ligada que favorece que la separación entre el polímero SBS y el asfalto no se dé tan fácilmente, propiciando las bases para que este tipo de compositos puedan ser estudiados más a fondo y poder evaluar sus propiedades mecánicas y reológicas.

De investigaciones recientes, Zhang y Hu (2013), encontraron que en asfaltos modificados tanto con polímero SBS como SBR a los cuales se les adicionó ácido polifosfórico y azufre, permitieron obtener un incremento en la estabilidad del asfalto cuando se encuentra almacenado, sin embargo la mayor aportación para este incremento lo concedió en mucho mayor grado el azufre. Además la compatibilidad que se da entre el polímero y el ácido polifosfórico resulta en valores modestos.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Asfalto Modificado

Es aquel que mediante un proceso de mezclado a alta temperatura y esfuerzo cortante, se le incorporan cierta cantidad de modificadores (polímeros) para que se forme una "red" tridimensional la cual atrapa dentro de sus espacios a las moléculas propias del asfalto (Cisneros, 1997).

La finalidad de la modificación consiste en modificar las propiedades de los asfaltos para que sean menos susceptibles a los cambios térmicos, mejoren sus resistencia a la fatiga, y que sean más flexibles para resistir la lucha diaria del peso producido por el alto nivel de tráfico (Magaña del Rio y Pierre, 1996); así mismo aumentar la resistencia a la deformación permanente, al agua y a la rotura en un campo más amplio de temperaturas (Sanz, 1994; Rodríguez et al., 2001b).

Varios aditivos son empleados para incrementar el desempeño de los ligantes asfálticos, los polímeros (Tabla 3-1), son los más ampliamente utilizados en la modificación de asfaltos, ya que con éstos se tienen importantes consecuencias en las propiedades ingenieriles del asfalto, debido a que incrementa la viscosidad a altas temperaturas, lo que se traduce en una reducción de la tendencia por deformación permanente, y al mismo tiempo incrementan la ductilidad a bajas temperaturas reduciendo la tendencia a agrietamiento (Dogan y Bayramli, 2009).

Los polímeros usados para la modificación de asfalto son las paleofinas termoplásticas (o plastómeros) y las paleofinas elastoméricas (o elastómeros) y además un poco por las causas ambientales se ha fomentado el uso de materiales de desecho, como el hule de llanta molido, conocido también como crumb rubber (Blanco et al., 1995).

Tabla 3-1. Características generales de los modificadores (Figuroa et al., 2007).

Polímero	Características
Termoplásticos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se reblandecen con calor, pueden ser solubles 2. Al enfriarse se dejan moldear sin perder propiedades 3. Polímeros lineales. Forman pequeñas ramificaciones 4. Polietileno, polipropileno, policloruro de vinilo, poliestireno, copolímero de etileno-acetato de vinilo EVA, poliamidas
Termoendurecibles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formados por la base y el endurecedor. No se pueden transformar después de deformarse 2. Resinas fenólicas, epoxica, de poliéster, de poliuretano
Elastómeros o Cauchos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Polímeros insaturados, amorfos 2. Para conseguir las propiedades elásticas se debe vulcanizar 3. Caucho natural, caucho etileno-propileno, butadieno-estireno (SBR), de policloropeno, elastómeros termoplásticos de butadieno-estireno (SBS)

El 75% de las asfaltos modificados con polímeros son clasificados como elastómeros, 15% como plastómeros y el 10% restante con algún otro modificador (Bardesi et al, 1999); de los cuales el polímero SBS es el más empleado por la compatibilidad que tiene con el asfalto (Yildirim, 2005) además de contar con mejor afinidad en los asfaltos con un contenido de aromático alto (30-40% de la composición del asfalto) y un bajo contenido de asfaltenos (Hardin, 1995), sin mencionar que ofrece mejores propiedades mecánicas y reológicas (Becker et al., 2001; Cortizo et al., 2004; Polacco et al., 2006; Sing, 2012).

Los valores típicos del porcentaje de empleo de SBS que son utilizados en la modificación de asfaltos fluctúa entre 2 y 5% en peso del asfalto (Hernández et al., 2006), ya que se ha observado que en este rango se presentan mejores propiedades ingenieriles (Lu e Isacsson, 1997).

3.2 Asfalto

El asfalto, también conocido como cemento asfáltico, es el último residuo de la destilación del petróleo y a temperaturas normales es sólido y de color café oscuro (Olivera, 2004), no tienen olor, es resistente al intemperismo, y se pueden disolver en los aceites del petróleo (Wright y Dixon, 2011). Es muy susceptible a los cambios de temperatura y sufre envejecimiento por intemperismo para largos tiempos de exposición; es también afectado por la oxidación y la foto-degradación. Respecto a sus propiedades mecánicas éstas son muy pobres ya que es quebradizo a bajas temperaturas y fluye a temperaturas un poco arriba de la temperatura ambiente; tiene además una baja recuperación elástica. Todos estos factores limitan ampliamente su rango de utilidad (Rodríguez, 2001a).

El estudio de la composición química del asfalto en su conjunto resulta complicado, por lo que se clasifican sus componentes en varias fracciones, estudiándose las composiciones de cada una de estas fracciones en forma separada. Los hidrocarburos que constituyen el asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros (Sánchez, 1987; Asphalt, 1993).

Desde el punto de vista químico, se puede describir al asfalto como un modelo coloidal formado por micelas de tamaños de miles de angstrom, correspondientes a los asfaltenos dispersos dentro de una matriz aceitosa de alta viscosidad y rodeada por células de resinas (Figura 3-1), cuyo espesor depende de la temperatura, (Lesueur et al., 1996; Delgado, 2006).

Los asfaltenos consisten en productos sólidos a temperatura ambiente y su naturaleza química consiste en hidrocarburos aromáticos polares que contienen heteroátomos y elementos metálicos con alto grado de asociación, con peso molecular entre 4000 y 7000, lo cuales le proporcionan al asfalto las características estructurales y de dureza, por su parte los maltenos están compuestos por aceites, resinas, saturados y aromáticos, con pesos moleculares entre 700 a 4000, los cuales le confieren consistencia y propiedades cementantes al cemento asfáltico (Kraton, 1987; Sánchez, 1987; Figueroa et al., 2007).

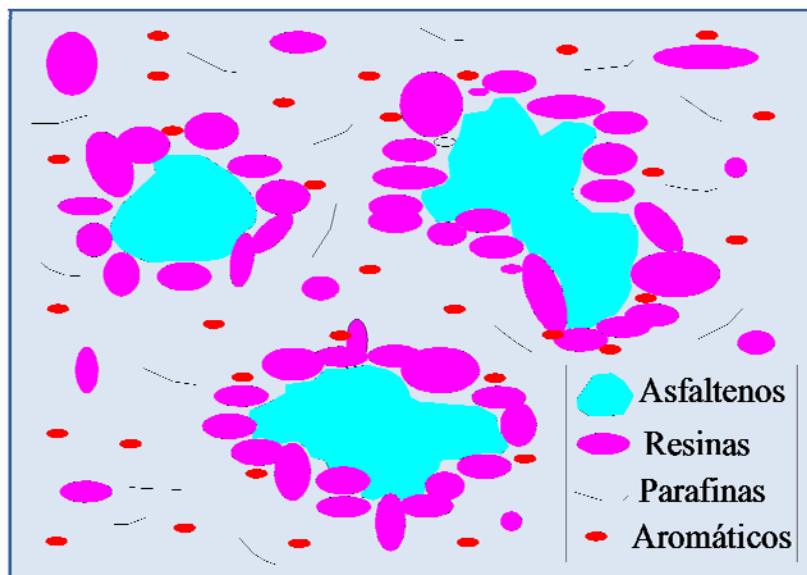


Figura 3-1. Esquema de los componentes del asfalto (Delgado, 2006).

En consecuencia las propiedades fisicoquímicas y reológicas del asfalto dependen de la temperatura y la proporción de la fracción SARAs (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) (Lesueur et al., 1996).

3.3 Polímeros

Son materiales que consisten en moléculas gigantes o macromoléculas en cadena con pesos moleculares promedio de 10,000 a más de 1'000,000 g/mol y que se forman al unir muchos meros o unidades mediante enlace químico, definiéndose peso molecular como la suma de las masas atómicas en cada molécula. La mayoría de los polímeros, sólidos o líquidos, son orgánicos basados en el carbono; sin embargo, también pueden ser inorgánicos (Askeland y Phulé, 2004).

Se clasifican de varias formas distintas: según la síntesis de sus moléculas, según su estructura molecular o de acuerdo con la familia química a la que pertenecen. Una manera de clasificar a los polímeros es establecer si se trata de un polímero lineal o de un

polímero ramificado (Figura 3-2). Un polímero lineal está formado de cadenas moleculares en forma de espagueti. En un polímero ramificado hay cadenas primarias de polímero y cadenas más pequeñas secundarias (ramales) que nacen de las cadenas principales.

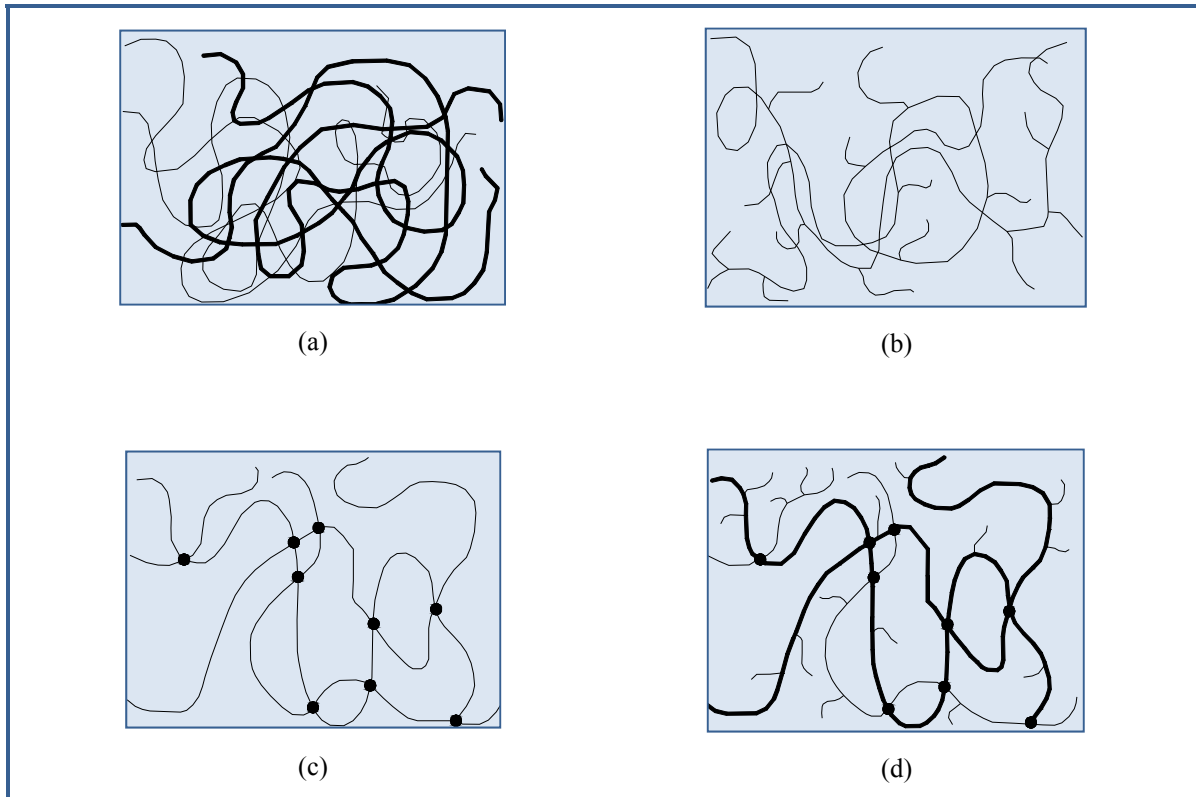


Figura 3-2. Esquema que muestra polímeros lineales y ramificados. a) Lineal no ramificado. b) Lineal ramificado. c) Termoestable sin ramificación. d) Termoestable con ramificación (Askeland y Phulé, 2004).

Los termoplásticos están formados de largas cadenas producidas al unir los monómeros; comúnmente se comportan de una manera plástica y dúctil, las cadenas pueden o no estar ramificadas.

Los polímeros termoestables están constituidos por largas cadenas (lineales o ramificadas) de moléculas que están fuertemente unidas por enlaces cruzados (entrelazados) para formar estructuras de redes tridimensionales.

Elastómeros, estos se conocen como hules. Tienen una deformación elástica > 200%. Es posible que se trate de termoplásticos o de termoestables ligeramente entrecruzados.

Los elastómeros termoplásticos son un grupo especial de polímeros; tienen la facilidad de procesamiento de los termoplásticos y el comportamiento elástico de los elastómeros (Askeland y Phule, 2004).

Los copolímeros en bloque de polibutadieno-poliestireno son probablemente los materiales que mejor actúan como agentes modificantes del asfalto. Los copolímeros en bloque poseen los requerimientos estructurales óptimos para modificar efectivamente al asfalto; la característica primordial que deben poseer es que faciliten la formación de estructuras reticuladas o redes, las cuales son requeridas para el buen desempeño del compuesto (Rodríguez et al., 2001b).

El polímero SBS-411 empleado en este trabajo es de cadena radial en forma de estrella de cuatro brazos en donde la parte butadiénica está en el centro, mientras que la parte estirenic en el exterior (Figura 3-3).

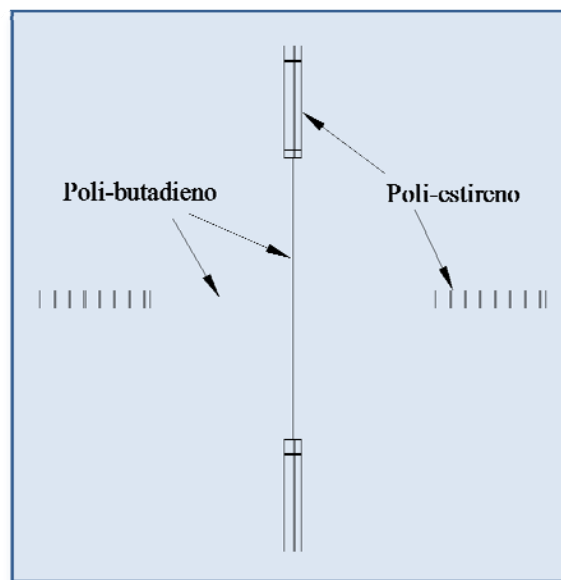


Figura 3-3. Estructura del copolímero SBS radial (Rodríguez et al., 2001b).

3.4 Funcionamiento del Estabilizador

Con la incorporación de polímero al asfalto, se pretende obtener una mezcla micro heterogénea constituida por dos fases finamente superpuestas. En este sistema el polímero compatible se hinchará luego de absorber una parte de las fracciones aceitosas ligeras (maltenicas) del asfalto para formar una fase polimérica diferente de la fase asfáltica residual, constituida por las fracciones deseadas del ligante, los aceites restantes, las resinas y los asfaltenos (Montejo, 2006). En el caso del polímero SBS, la fase elastomérica de este es la que absorberá la fracción de aceite del asfalto e incrementará su volumen. Si la concentración de SBS es adecuada, se formará en el asfalto modificado una fase continua de polímero que modificará de manera significativa las propiedades del asfalto base (Cavaliere et al., 1996).

La finalidad que persigue el estabilizador propuesto es la de fijar desde un punto de vista químico el polímero con el asfalto para que no se presenten efectos de segregación debido a procesos de sedimentación producidos por la diferencia de densidades en ambos materiales.

La forma de llevar a cabo esta unión será mediante una reacción química entre las dobles ligaduras del hule polibutadieno con ellos mismo y con los policiclos del asfalto. Esto es equivalente a un proceso de vulcanización ó reticulación, para producir un material sólido e impedir la movilidad del polímero en el interior del asfalto (Rodríguez, 2001b).

El tipo de estabilizador que se pretende probar consiste en una resina fenólica funcionalizada químicamente y azufre, con el fin de conseguir mayor afinidad química con los principales compuestos del asfalto, como son los asfaltenos y maltenos. Esto provocará, por un lado, siendo compatibles químicamente los grupos aromáticos de la resina fenólica con los grupos estirénicos del SBS, se una a éste; y por el otro extremo pueda unirse a los anillos antracénicos del asfalto.

3.5 Justificación

Debido al empleo en la actualidad de asfaltos modificados en las redes carreteras, se vuelve imperioso que dicho material cumpla con un alto desempeño, a fin de garantizar una reducción de los costos derivados de las conservaciones que se dan a la red federal de carreteras, además de afectar lo menos posible al usuario de los caminos.

Para lograr este cometido, se aprecia que es de vital importancia, se tenga una continuidad en la vida útil del pavimento. Sin embargo en ocasiones eso no es posible, debido a que con el paso del tiempo los materiales que conforman la mezcla de asfalto modificado (en este caso el asfalto base y el polímero) se separan, debido a la diferencia de densidad de estos materiales, lo que destruye la liga química existente.

Por lo anterior es necesario desarrollar un estabilizador, que permita una liga química permanente entre ambos materiales, de manera que se tenga un desempeño satisfactorio del asfalto modificado, a lo largo de la vida del pavimento.

3.6 Descripción del problema

Cuando el asfalto es modificado con bajos niveles de polímero para aplicación en pavimentos, hay una separación entre el asfalto y el hule debido a la diferencia en densidad de estos materiales. Para temperaturas altas, la viscosidad de la mezcla asfalto-hule se reduce haciendo la mezcla más fluida y acelerando el proceso de separación entre el asfalto y el hule. Esta falta de estabilidad se presenta en el caso de almacenamiento prolongado, sin agitación y a temperaturas altas (Rodríguez, 2001b).

3.7 Hipótesis

A partir de las propiedades del asfalto y del copolímero SBS-411 se puede desarrollar un agente estabilizador de tipo fenólico que pueda anclar químicamente los componentes y brindar estabilidad en el largo plazo a mezclas de baja concentración.

3.8 Objetivo

Obtener a nivel laboratorio un agente estabilizador, que pueda unir químicamente el asfalto al copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).

3.8.1 Objetivos específicos

1. Establecer la metodología para la elaboración de un asfalto modificado con polímero SBS-411 y un estabilizador compuesto por Resina Fenólica y Azufre.
2. Definir las condiciones de temperatura de mezclado y compactación de mezclas asfálticas modificadas requeridas in situ.
3. Establecer la metodología para la evaluación de la separación del Asfalto y el Polímero SBS.

3.8.2 Alcances

El presente trabajo de investigación pretende hacer una evaluación del desempeño que tiene un estabilizador formado por resina fenólica y azufre, para lo cual se analizarán las ligas químicas el asfalto convencional con el polímero SBS-411 con y sin estabilizador. Adicional a lo anterior se realizará una evaluación de ciertas propiedades reológicas del asfalto y cómo influye en sus propiedades mecánicas en una mezcla asfáltica.

4. METODOLOGÍA

Se indica a continuación (Figura 4-1), un diagrama de las etapas llevadas a cabo en la etapa de metodología realizada en este trabajo de investigación. Básicamente se divide en tres secciones, la primera consiste en la elaboración del estabilizador propuesto; la segunda parte hace alusión a la modificación de los asfaltos convencionales con el polímero SBS y estabilizador, y finalmente la caracterización química y física de los asfaltos modificados.

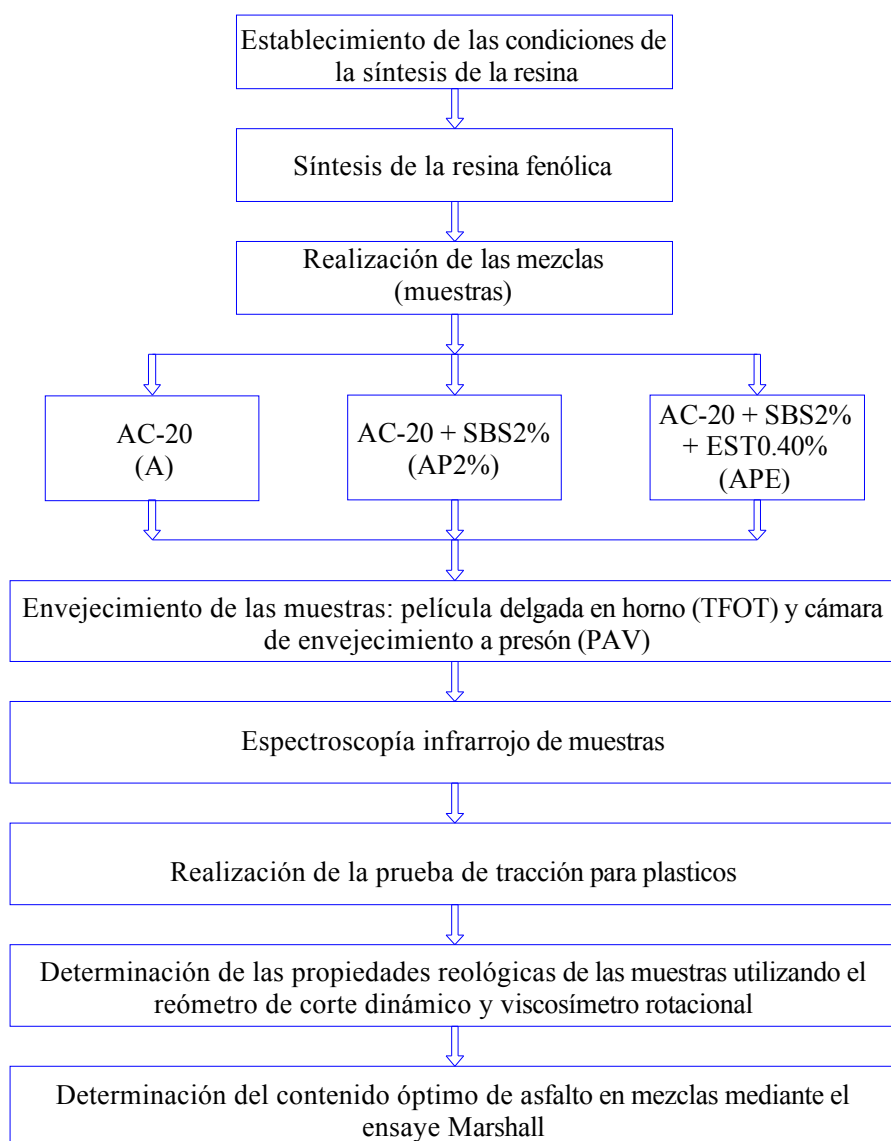


Figura 4-1. Actividades realizadas en la metodología experimental.

La etapa concerniente a la experimentación se llevó a cabo en 4 lugares distintos los cuales contaron con el equipo necesario para poder llevar a cabo esta labor, dichos lugares se citan a continuación:

El establecimiento de las condiciones de la síntesis de la resina que forma parte del Estabilizador, fueron definidas concretamente en el área de Espectroscopía de el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM Campus Juriquílla.

Tanto la síntesis de la resina fenólica, como la elaboración de las mezclas Asfalto-Polímero SBS y Asfalto-Polímero SBS-Estabilizador, se llevaron a cabo en Física Aplicada y Tecnología Avanzada, en el Laboratorio de Síntesis, bajo la tutela de la Dra. Genoveva Hernández.

El envejecimiento realizado a las muestras se hizo en el laboratorio Lasfalto perteneciente al grupo Surfax, que es una empresa dedicada a la caracterización de asfaltos, ubicada en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La Espectroscopía Infrarroja, se realizó en el laboratorio de Espectroscopía, mientras que la Prueba de Tracción se hizo en el laboratorio de pruebas mecánicas del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM Campus Juriquílla.

La caracterización de las muestras de asfalto, se efectuó en el laboratorio de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, ubicado en Sanfandila, Querétaro.

Finalmente tanto la caracterización del agregado pétreo así como la elaboración de pastillas Marshall y determinación de estabilidad y flujo, se realizó en el laboratorio de suelos y materiales de la facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

4.1 Establecimiento de las condiciones de síntesis para la preparación del estabilizador

Partiendo de la base de que el fenol, sus homólogos y el Formaldehído se dispersan en resinas naturales, como el copal, colotonia, entre otras, y forman productos solubles en aceite los cuales se encuentran en la fracción liviana del asfalto, se optó que el estabilizador fuera sintetizado con estos compuestos químicos (Hernández-Padrón, comunicación personal, 2012).

4.1.1 Proceso de sintetizado

Se definió que el proceso de sintetizado fuera a través del procedimiento convencional utilizado para resina tipo Novolac (Komatsubara, 1993).

Se decidió que la mezcla compuesta por Fenol(P) y Formaldehído (F), guardara una relación molar ($F/P = 0.79$). Se definió que esta mezcla, fuera catalizada con Acido Oxálico (C), y que la relación molar del Acido Oxálico con el Fenol fuera de ($C/P=0.014$). Finalmente fue adicionada con Acido Abiético (AA) cuya relación molar con respecto al Fenol (P), fue de ($P/AA = 3 \times 10^{-3}$) (Hernández-Padrón, et al, 2002).

4.2 Realización de la síntesis del estabilizador

Contando con el equipo necesario se inició el proceso de sintetizado. Primeramente se le adicionó al H_2O la cantidad de 148 ml de Fenol (P), y 64 ml de Formaldehído (F), de manera que la relación molar entre el Formaldehído y el Fenol fuera: ($F/P=0.79$), todo este procedimiento en agitación.

Paso seguido se incorporó a la mezcla anterior una cantidad de 2 gr de Ácido Oxálico. Una vez hecho esto se dejó en reflujo por un tiempo de 30 minutos.

Una vez transcurrido esta media hora, se agregó el Ácido Abiético a la mezcla anterior, y se dejó en reflujo durante una hora, tal como se muestra en la Figura 4-2.



Figura 4-2. Proceso de reflujo de los reactivos una vez incorporado el ácido abiético (Hernández-Padrón et al., 2002).

Transcurrida la hora, se le retiró el fuego al sistema, y se dejó que la sustancia continuara mezclándose mientras el estabilizador llegó a la temperatura ambiente, para finalmente almacenar el compuesto realizado.

4.3 Realización de las mezclas asfalto-polímero SBS y asfalto polímero SBS Estabilizador

A fin de que no exista confusión cuando se hable de las muestras realizadas, se decidió asignarle a cada una de ellas una abreviatura para su fácil identificación. La Tabla 4-1 indica el tipo de mezcla así como la abreviatura empleada en cada una de ellas.

Tabla 4-1. Mezclas asfalto-polímero realizadas con su respectiva abreviatura

Mezcla	Abreviatura
AC-20	A
AC-20 + SBS2%	AP2
AC-20 + SBS3%	AP3
AC-20 + SBS2% + Estabilizador0.10%	APE
AC-20 + SBS2% + Azufre0.10%	APA

4.3.1 Mezcla AP2

Primeramente se calentó el asfalto virgen (A) en la estufa Felisa a una temperatura de 110°C durante una hora y media, se procedió a pesar 20 gr de Polímero SBS-411, correspondiente al 2% en peso en relación con el peso del asfalto por mezclar (1000gr). Se acomodó el equipo de mezclado que consistió en la mezcladora de asfalto, mordazas de sujeción para el termómetro, mantilla de calentamiento y regulador de temperatura.

Una vez que el asfalto tuvo una consistencia fluida se colocó en una lata vacía de 2 lts, la cantidad de 1000 gr de asfalto, y se montó en la mantilla de calentamiento, fijando la lata a esta. Se acomodó la propéla de agitación, cuidando que quedara aproximadamente a 1/4 de altura de la lata, y se sujetó un termómetro al conjunto de lata y propéla. La Figura 4-3 muestra cómo es que quedó montado el equipo listo para el proceso de mezclado.

Se inició el proceso de mezclado asignándole una velocidad de 1000 RPM al equipo, observando que la temperatura inicial de mezclado oscilara entre 75-100°C. Alcanzada la temperatura de 115°C, se le incorporó el polímero SBS tomándolo con los dedos y haciendo la incorporación de manera circular (Figura 4-4).



Figura 4-3. Equipo montado para la realización de la mezcla del asfalto.



Figura 4-4. Proceso de incorporación del polímero SBS al asfalto.

Una vez terminada la incorporación del polímero y alcanzada la temperatura de 135°C, se esperó a que la temperatura llegara a los 160°C la cual se mantuvo constante y a partir de este momento se dejó que continuara el proceso de mezclado por dos horas. Transcurrido este tiempo se finalizó el mezclado y se almacenó la mezcla elaborada (Figura 4-5).



Figura 4-5. Identificación de la mezcla AP2.

4.3.2 Mezcla AP3

Esta mezcla fue realizada de manera similar a la AP2, la única variante que tuvo fue el porcentaje de polímero SBS-411 empleado, el cual correspondió al 3% respecto al peso del asfalto convencional (A).

4.3.3 Mezcla APE

Igual que en las mezclas anteriores se preparó el asfalto convencional (A), se montó el equipo de mezclado y se pesó la cantidad de polímero SBS-411 a emplear (2%). Se hizo el proporcionamiento tanto de la resina fenólica como del azufre los cuales consistieron en 0.05% respectivamente del peso del asfalto por mezclar (Figura 4-6).



Figura 4-6. Materiales con los cuales se modificó el asfalto: polímero SBS, resina fenólica y azufre.

Se montó el equipo de mezclado y se siguió el mismo procedimiento de mezclado, e incorporación del polímero SBS-411 empleado en la mezcla AP2.

Terminada la incorporación del SBS-411 y alcanzada la temperatura de 160°C, se dejó que se realizara el proceso de mezclado durante una hora manteniendo la temperatura constante. Transcurrida la hora se le adicionó el azufre y la resina de manera alternada en forma circular (Figura 4-7 y 4-8). Terminada la incorporación de estas sustancias se continuó con el mezclado durante otra hora y se concluyó el proceso de elaboración de la mezcla, finalmente se almacenó la mezcla (Figura 4-9).



Figura 4-7. Forma en la que se adicionó el azufre a la mezcla asfalto-polímero.



Figura 4-8. Manera en la que se adicionó la resina a la mezcla asfalto-polímero.

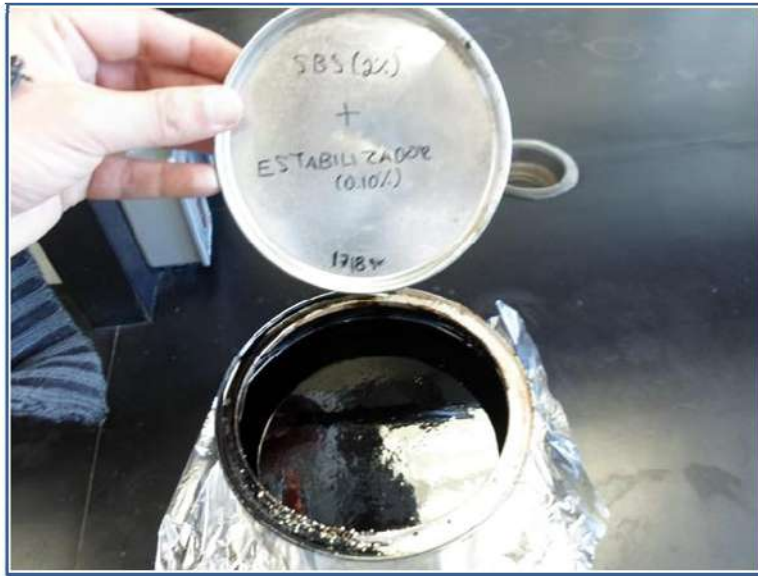


Figura 4-9. Identificación de la mezcla APE.

4.3.4 Mezcla APA

En la elaboración de esta mezcla se siguieron los mismos pasos empleados en la mezcla APE; la única variante es el tipo de estabilizador utilizado, puesto que en esta mezcla el estabilizador solo consistió de Azufre, cuya cantidad empleada fue del 0.10% respecto al peso del asfalto convencional (A).

4.4 Envejecimiento de los asfaltos modificados

4.4.1 Introducción

Debido a que los asfaltos están compuestos por moléculas orgánicas, reaccionan con el oxígeno del medio ambiente. Esta reacción se llama oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas del asfalto. El resultado es una estructura más frágil, y es la razón del término endurecimiento por oxidación o por envejecimiento. Este fenómeno ocurre en el pavimento a una velocidad relativamente baja, si bien es mucho más rápido en un clima cálido que en un clima frío. Así, el endurecimiento por oxidación es estacional, y es más marcado en verano que en invierno. Debido a este tipo de endurecimiento, los pavimentos viejos son más susceptibles al agrietamiento que los nuevos. Incluso, los

pavimentos asfálticos nuevos pueden ser propensos a este fenómeno si no se compactan adecuadamente. En éste caso, la falta de compactación origina un alto contenido de vacíos en la mezcla, lo que permite a una mayor cantidad de aire ingresar en la mezcla asfáltica y agravar el endurecimiento por oxidación.

De hecho, una considerable parte del envejecimiento por oxidación ocurre antes de la colocación del asfalto: durante el mezclado en caliente y otras operaciones constructivas. Debido a que estas actividades se efectúan a altas temperaturas, y el asfalto se encuentra en películas muy delgadas, la reacción de oxidación ocurre a una velocidad mucho mayor.

Otro tipo de envejecimiento ocurre durante el mezclado en caliente y construcción; se denomina "volatilización". A altas temperaturas los componentes volátiles del asfalto se evaporan. Estos componentes volátiles livianos del tipo de aceites ablandarían al asfalto de permanecer dentro de éste.

Dos mecanismos son básicamente responsables del envejecimiento de los ligantes asfálticos: pérdida de aceites livianos presentes en el asfalto (volatilización) y reacción con el oxígeno del ambiente (oxidación). Por muchos años, los ensayos de Película Delgada en Horno (TFOT), y Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO) se han utilizado para simular este envejecimiento. Cuando el pavimento asfáltico es construido y abierto al tráfico el envejecimiento continúa pero, dada la moderada temperatura ambiente, principalmente causado por el mecanismo de oxidación. Para simular esta forma de envejecimiento durante el tiempo de servicio, SHRP desarrolló la Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV).

4.4.2 Ensayo de película delgada en horno (TFOT) (ASTM D 1754-02)

La finalidad de este ensayo es el de envejecer un asfalto simulando el envejecimiento que tiene el asfalto en el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica, así mismo permite determinar los efectos que tiene el asfalto cuando es sometido a calor y aire.

Este método indica los cambios aproximados en las propiedades del asfalto durante la mezcla en caliente alrededor de una temperatura de 150°C tales como la viscosidad, penetración o ductilidad, ya que si la mezcla se realiza a temperaturas mayores a la indicada anteriormente, las propiedades del asfalto se pueden modificar considerablemente.

4.4.2.1 Procedimiento de la prueba

El primer paso consistió en colocar charolas de aluminio de 14 cm de diámetro y 0.95 cm de altura dentro del horno de prueba y se les ajustó la temperatura de 163°C que es la requerida para este ensaye. Paso seguido se introdujo la cantidad de 250 gr de muestras de asfalto (A, AP2 y APE) al horno de calentamiento y se fijó la temperatura a 150°C .

Transcurrido el tiempo y obtenida la temperatura de prueba, se sacaron del horno de calentamiento las muestras y se vaciaron inmediatamente en las charolas de aluminio la cantidad aproximada de 50 gr. Se pesó cada charola con muestra (figura 4-10) y se metieron al horno de prueba del ensaye. Se esperó a que se estabilizara la temperatura del horno de ensaye y se encendió el motor que hace girar la parrilla con las charolas, a partir de este momento se dejó que el motor siguiera girando durante un tiempo de cinco horas, que es el tiempo que insume realizar este ensaye (Figura 4-11).



Figura 4-10. Colocación de la muestra en la charola de prueba y proceso de pesado de la misma.



Figura 4-11. Prueba de TFOT en proceso.

Cumplidas las cinco horas de prueba, se retiraron las charolas y se les determinó su respectivo peso. Finalmente se vació el contenido de una de cada tipo de muestra en latitas de 1/4 de litro para su almacenamiento mientras que las restantes se emplearon posteriormente en el ensaye PAV.

4.4.3 Ensayo de cámara de envejecimiento a presión (PAV) (ASTM D6521-03a).

El envejecimiento de los asfaltos en largos periodos de servicio no eran considerados en las especificaciones anteriores a SUPERPAVE. El equipo usado por muchos años en investigación, fue modificado por los investigadores del SHRP y se desarrolló un nuevo procedimiento para evaluar el envejecimiento en largos periodos de servicio.

El equipo (PAV) usa presión y temperatura para reducir el tiempo de ensayo; así un largo periodo de envejecimiento puede ser simulado en solo veinte horas. Las propiedades físicas son medidas para determinar si el asfalto se comportará adecuadamente luego de varios años de servicio. Además en asfaltos modificados, permite determinar sus propiedades químicas para poder conocer que tanto se degradó el asfalto, y observar si no existe separación de fases entre el polímero y el asfalto.

4.4.3.1 Procedimiento de la prueba

Como primer paso se encendió el recipiente a presión y se fijó tanto la temperatura de prueba la cual consistió en 100°C, así como la presión la cual fue de 2.10 Mpa (Figura 4-12); esto se realizó el mismo día en que se realizó el envejecimiento TFOT, con la finalidad de que una vez terminado este envejecimiento se pudiera realizar inmediatamente el envejecimiento PAV.

Con el residuo obtenido en el envejecimiento TFOT, se tomó una cantidad de aproximadamente 50 gramos de cada muestra (A, AP2 y APE), y se vació en las charolas destinadas para esta prueba. Las charolas se colocaron en el bastidor correspondiente y se metieron en el recipiente a presión, se colocó la tapa de la cámara y se ajustó el sistema de cierre. Una vez estabilizada la temperatura del recipiente (100°C) se inyectó el aire a presión empleado la válvula en el regulador del cilindro de aire comprimido. Cuando se alcanzó la presión (2.10 Mpa), se inició el ensayo el cual duró 20 horas.



Figura 4-12. Encendido y fijación de los valores de presión y temperaturas en el recipiente a presión.

Hora y media antes de finalizar el ensaye, se encendió el horno de vacío (Figura 4-13) y se le programó tanto la presión (15 kPa) como la temperatura (170°C).



Figura 4-13. Encendido del horno de vacío.

Finalizadas las 20 horas se procedió a despresurizar la cámara con una válvula integrada al recipiente a presión. Una vez hecho esto se desajustó el sistema de cierre y se retiró de la cámara el bastidor que contenía las charolas con el asfalto. Las charolas fueron retiradas del bastidor y se metieron a un horno de calentamiento para que tuviera la suficiente fluidez y pudiera ser manipulado.

Transcurrido algunos minutos, se retiraron las charolas del horno de calentamiento y se vació el contenido de cada charola en latas de 1/4 de litro, e inmediatamente para no perder temperatura (170°C) ni presión (15 kPa) se colocaron las tres muestras (A, AP2 y APE), en el horno de vacío y se inició con el proceso de eliminación del aire atrapado en las muestras de asfalto (Figura 4-14), durante 30 minutos.



Figura 4-14. Inicio del proceso de eliminación de burbujas de las muestras de asfalto.

Pasada la media hora se retiraron las latas con asfalto del horno de vacío y se dejaron que se enfriara a temperatura ambiente y finalmente se guardaron.

4.5 Caracterización química de los asfaltos modificados

4.5.1 Introducción

Cualquiera que desee saber más acerca de la composición de una determinada muestra, tiene que emplear métodos analíticos, para determinar la clase y cantidad de los compuestos, elementos, átomos y partículas subatómicas que se encuentra en ella, así como para examinar la distribución detallada de las diversas especies. Para llevar a cabo esto, es preciso usar la química analítica que trata de la resolución de problemas tanto cualitativos como cuantitativos. En el análisis cualitativo es suficiente determinar cuáles son los componentes de una muestra, mientras que en el análisis cuantitativo es determinar cuándo existe de cada compuesto en la muestra.

El análisis cualitativo involucra la identificación de un compuesto cuya identidad se desconoce o se conoce parcialmente, así como examinar en base rutinaria la presencia o ausencia de cantidades importantes de un compuesto cuya presencia solo se sospecha. Las mediciones hechas en este análisis pueden ser una combinación de medidas; por ejemplo, espectroscópicas con mediciones físicas como punto de fusión, ebullición, densidad, etc.

Por su parte el análisis cuantitativo involucra la determinación de la cantidad de una sustancia presente, ya sea un porcentaje o su concentración e una solución. Éste tipo de análisis puede realizarse por métodos gravimétricos o de titulación clásicos; así como espectroscópicos (Hernández-Padrón, 1998).

La espectroscopía ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de la teoría atómica moderna. Los métodos espectroquímicos han aportado las herramientas que, posiblemente, son las que más se utilizan para elucidar estructuras moleculares (Skoog et al., 2001).

4.5.2 Espectroscopía

Se define a la espectroscopía como la ciencia que estudia las interacciones que suceden entre la radiación y la materia (Skoog et al., 2001). En ese mismo sentido Creswell

et al. (1979), la define como el estudio de la interacción de la luz con los átomos y las moléculas; en ambos casos es una herramienta poderosa en la determinación de estructuras.

Los métodos electroscópicos se clasifican de acuerdo con la región del espectro electromagnético (Figura 4-15) que se utiliza para hacer la medición. Se puede describir a la radiación electromagnética como una forma de energía cuyo comportamiento depende de las propiedades tanto de las ondas como de las partículas. Estas regiones electromagnéticas incluyen los rayos gamma, X, Ultravioleta (UV), visible infrarrojo (IR), las microondas y radiofrecuencias (RF) (Creswell et al., 1979).

El estudio de la espectroscopía está dividido en espectroscopía de emisión y de absorción. Se obtiene un espectro de emisión por el análisis espectroscópico de una fuente de luz, puede ser una llama o un arco eléctrico.

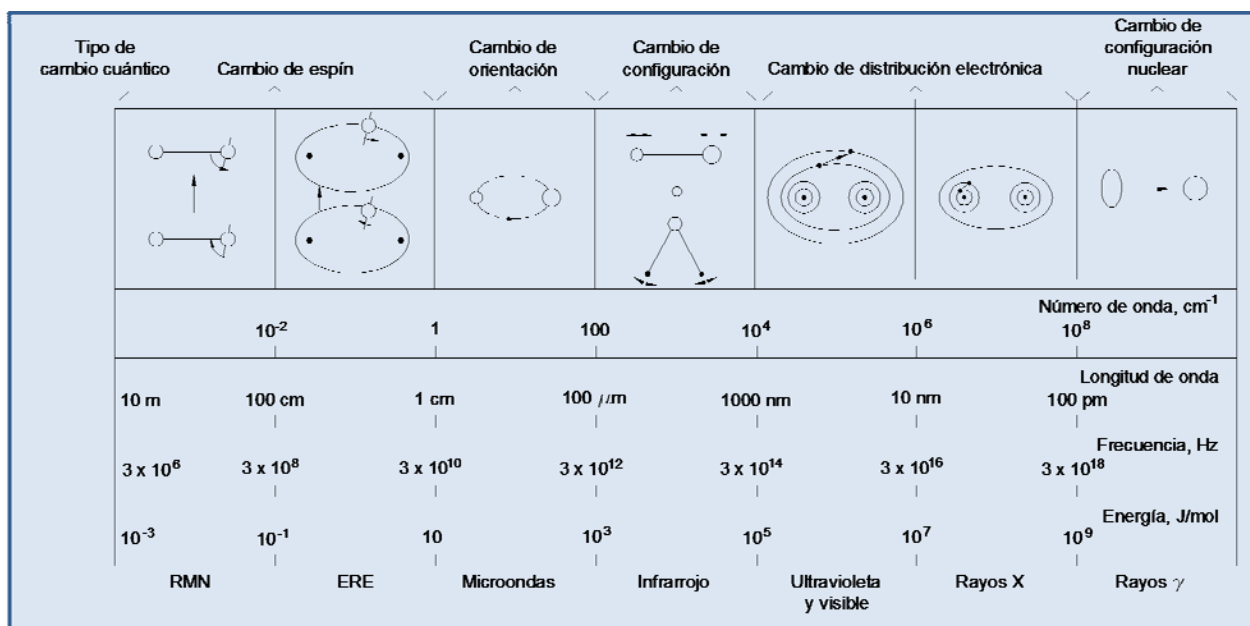


Figura 4-15. Regiones del espectro electromagnético (Skoog et al., 2001).

Este fenómeno es causado, fundamentalmente, por la excitación de átomos por medios térmicos o eléctricos; la energía absorbida induce los electrones, que se encuentran en un estado fundamental, a un estado de mayor energía. Un espectro de absorción se obtiene colocando la sustancia entre el espectrómetro y una fuente de energía que

proporciona radiación electromagnética en el intervalo de frecuencia, la energía transmitida con referencia a la energía incidente (Figura 4-16).

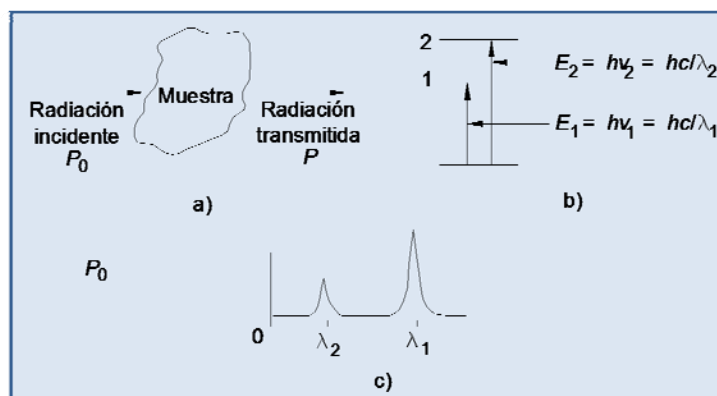


Figura 4-16. Métodos de absorción. El analito puede absorber parte de la energía radiante incidente P_0 y se transmite un haz de menor energía radiante P . Para que pueda haber absorción, la energía del rayo incidente debe corresponder a uno de los niveles de energía mostrados en b). En c) se ilustra el espectro de absorción del analito (Skoog et al., 2001).

4.5.3 Espectroscopía Infrarroja

La radiación infrarroja se refiere a aquella parte del espectro electromagnético entre las regiones del visible y del microondas, los espectros infrarrojos proporcionan numerosas bandas de absorción; muchas de las cuales pueden no ser asignadas con exactitud, pero pueden proporcionar una buena información estructural sobre la molécula.

La radiación infrarroja de frecuencia menores de 100 cm^{-1} es absorbida y convertida por una molécula en energía molecular de rotación. Cuando la radiación se encuentra entre 100 y 10000 cm^{-1} es absorbida y convertida por una molécula en energía de vibración molecular.

La absorción de radiación en la región del IR puede dar información acerca de la naturaleza de los compuestos, de la existencia o no de grupos funcionales y de la estructura de las moléculas (Skoog et al., 2001).

Los espectros de absorción infrarroja se obtienen, normalmente, colocando las muestras en un espectrómetro infrarrojo de doble luz y midiendo la intensidad relativa de la energía luminosa transmitida (ó absorbida) contra la longitud de onda o número de onda (Hernández-Padrón, 1998).

La absorción molecular de la radiación IR lleva a una serie de transiciones entre los niveles de energía de vibración de los estados energéticos electrónicos con la más baja excitación. La forma en que puede vibrar una molécula está relacionada con el número de sus enlaces y, por tanto, con el número de átomos que la componen.

Existen dos clases de vibraciones fundamentales para las moléculas: estiramiento (stretching), en la cual distancia entre dos átomos aumenta y disminuye, pero los átomos permanecen en el mismo eje de enlace, y deformación (bending) en la cual la posición de los átomos varía en relación al eje de enlace original (figura 4-17).

La espectroscopía infrarroja se utiliza de manera habitual en el análisis de muestras en estado gaseoso, líquido y sólido.

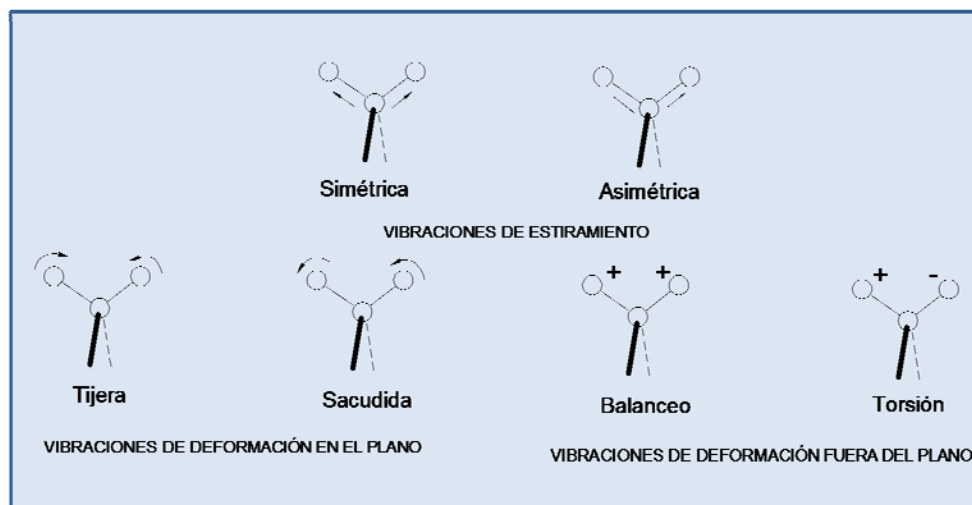


Figura 4-17. Vibraciones de un grupo de átomos (Hernández-Padrón, 1998).

Para el análisis de las muestras líquidas existen dos métodos. Si se trata de un líquido no volátil, podrá prepararse una muestra adecuada colocando una gota del líquido entre dos láminas de NaCl, formando una fina película con un grosor en general inferior a 0.01 mm. Los líquidos volátiles han de introducirse en una cubeta sellada para evitar su evaporación. Una forma de obtener espectros infrarrojos en disoluciones acuosas consiste

en usar la reflectancia total atenuada (RTA) en lugar de la de transmisión, el cual consiste en un cristal transparente a la radiación IR con un elevado índice de refracción, rodeado de una muestra con un índice de refracción más bajo. La radiación procedente de la fuente penetra en el cristal de RTA (Figura 4-18), donde sufre una serie de reflexiones internas totales antes de salir del cristal.

Durante cada reflexión, la radiación penetra en la muestra hasta una profundidad de pocas micras. El resultado es una atenuación selectiva de la radiación a las longitudes de onda en las que la muestra absorbe. Los espectros de RTA son similares, aunque no idénticos, a los que se obtienen midiendo la transmisión de la radiación.

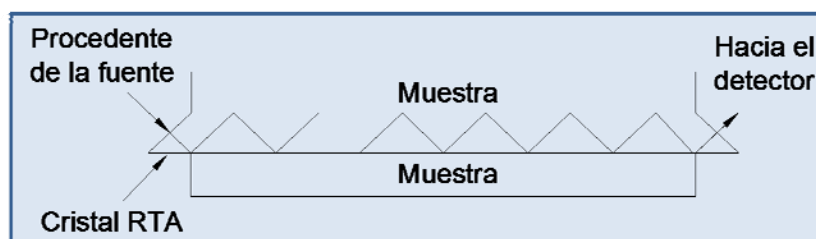


Figura 4-18. Cubeta de reflectancia total atenuada (RTA) para espectroscopía infrarroja (Harvey, 2002).

Las muestras sólidas transparentes pueden analizarse directamente, colocándolas en el haz IR. Sin embargo, la mayoría de las muestras sólidas son opacas y es necesario dispersarlas en un medio más transparente para poder registrar un espectro de transmisión tradicional. Si se dispone de un solvente adecuado, la muestra sólida podrá analizarse preparando una disolución que se analizará de la forma antes descrita. Si no se cuenta con un solvente, las muestras sólidas podrán analizarse preparando un jarabe de la muestra finamente pulverizada en un aceite adecuado. Otra posibilidad consiste en mezclar la muestra finamente pulverizada con KBr y formar mediante presión una bola óptimamente transparente. Otra forma de analizar las muestras sólidas consiste en aprovechar su reflectancia. El aparato de muestreo RTA (Figura 4-18), puede usarse para analizar muestras sólidas, siempre que ésta pueda ponerse en contacto con el cristal RTA. Entre los ejemplos de sólidos que se analizan con RTA se encuentran los polímeros, las fibras, los tejidos, los polvos y las muestras de tejidos biológicos (Harvey, 2002).

4.5.3.1 Caracterización de las muestras de asfalto mediante Espectroscopía infrarroja

El objetivo que persigue esta prueba es la de identificar la composición de las muestras mediante la detección de los grupos funcionales existentes en la muestra, además de observar si aun se siguen conservando dichos grupos cuando la muestra es sometida a envejecimiento, lo cual muestra si aún prevalece la liga química del asfalto con el polímero SBS.

Los compuestos fueron analizados en un espectrómetro Bruker Vector 33 por la técnica de Transmitancia Total Atenuada (ATR, por sus siglas en ingles). Las muestras (Figura 4-19) se prepararon en película mediante una solución de asfalto/tolueno en una concentración aproximada de 10^{-2} gr/ml, se colocaron en papel antiadherente y se dejaron evaporar a temperatura ambiente, fueron colocadas sobre un cristal de diamante dentro del espectrofotómetro (Figura 4-20) y se realizaron los análisis de las muestras A, AP2, APE, resina fenólica y estabilizador (resina fenólica mas azufre).



Figura 4-19. Obtención de la muestra a analizar.



Figura 4-20. Colocación de la película de la muestra en el cristal de diamante del espectrofotómetro.

4.6 Ensayo de tracción directa en plásticos (ASTM D638-10).

4.6.1 Significado y uso de la prueba

El ensayo de tracción directa mide la máxima deformación por tracción de un ligante asfáltico a baja temperatura. El ensayo mide las características de comportamiento de los ligantes como si estos hubieran sido expuestos a los procesos de mezclado en caliente.

Una pequeña muestra en forma de hueso de perro (Figura 4-21) se tracciona a velocidad constante.

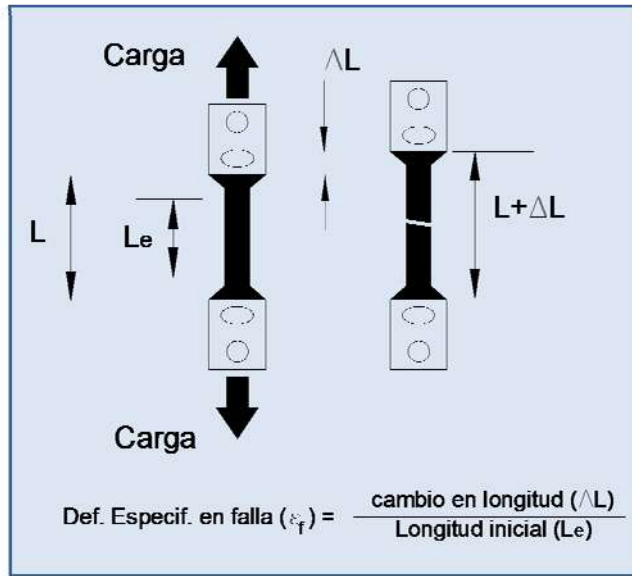


Figura 4-21. Ensayo de tracción directa (SUPERPAVE, 1994).

La deformación específica (ϵ_f) de la muestra en el momento de la falla es el cambio en la longitud (ΔL) dividido por la longitud efectiva. En el ensayo de tracción directa, la falla es determinada por la tensión en el momento de máximo valor de la carga (Figura 4-22) y no necesariamente por la carga cuando el espécimen falla. El esfuerzo de falla σ_f es la carga de rotura dividida por la sección transversal original de la muestra (36 mm²). La especificación de ligantes de SUPERPAVE exige una deformación específica mínima en la falla del uno por ciento.

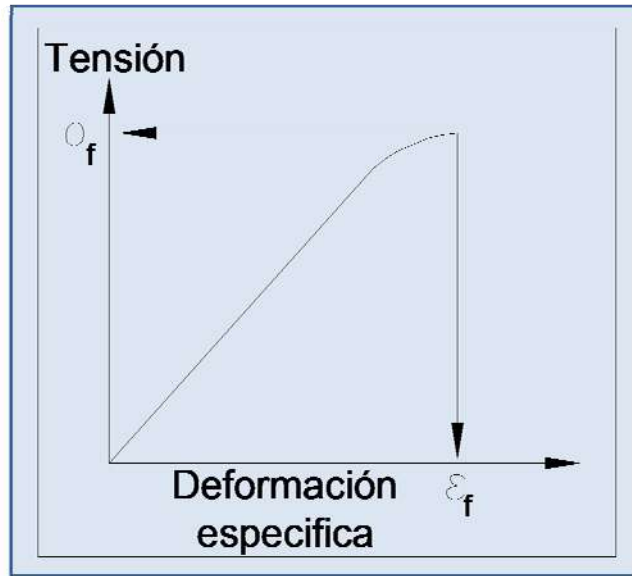


Figura 4-22. Tensión y deformación en la falla (SUPERPAVE, 1994).

4.6.2 Procedimiento de la prueba

Siguiendo el procedimiento marcado en la Norma *ASTM D638-10 Método de Prueba Estándar para Determinar las Propiedades de Tracción de los Plásticos*, se calentó una cantidad aproximada de 250 gramos de muestra (AP2, AP3, APE y APA) en el horno para que este tuviera la suficiente fluidez y pudiera ser manipulado. Lograda la consistencia fluida, se vació la muestra en moldes de silicón (Figura 4-23) con forma de "hueso de perro", para obtener la geometría requerida en la prueba y se dejaron enfriar a temperatura ambiente.

Transcurrido algún tiempo, se retiraron los especímenes de los moldes de silicón y con la ayuda de un vernier, se tomaron las medidas de ancho, espesor y longitud de cada espécimen obteniendo sus promedios, anotando los datos en una hoja de registro (Anexo 1).



Figura 4-23. Probetas de las muestras ensayadas.

Una vez preparadas las muestras se procedió a colocarlas en el equipo de tracción (Figura 4-24), se verificó la verticalidad de la muestra e inmediatamente se inició con el ensaye. Finalmente de cada muestra ensayada se obtuvieron los resultados de la prueba.



Figura 4-24. Colocación de la muestra en el equipo de tracción.

4.7 Ensayo de reómetro de corte dinámico (ASTM D7175-08).

4.7.1 Introducción

Debido a que el comportamiento del asfalto depende tanto del tiempo como de la temperatura, el ensayo ideal para los asfaltos debe evaluar ambas propiedades. El equipo empleado para medir estas propiedades se llama reómetro de corte dinámico, reómetros oscilatorios de corte, o reómetros dinámicos. Adaptando estos equipos para su uso con asfaltos, los efectos del tiempo y la temperatura pueden ser evaluados.

El principio de operación es sencillo: el asfalto es colocado entre un plato fijo y un plato oscilatorio (Figura 4-25). El plato oscilatorio se mueve desde el punto A hasta el punto B. Desde B regresa, pasando por A hasta llegar a C, y desde C el plato regresa a A. Éste movimiento de A a B a C y de nuevo a A conforma un ciclo.

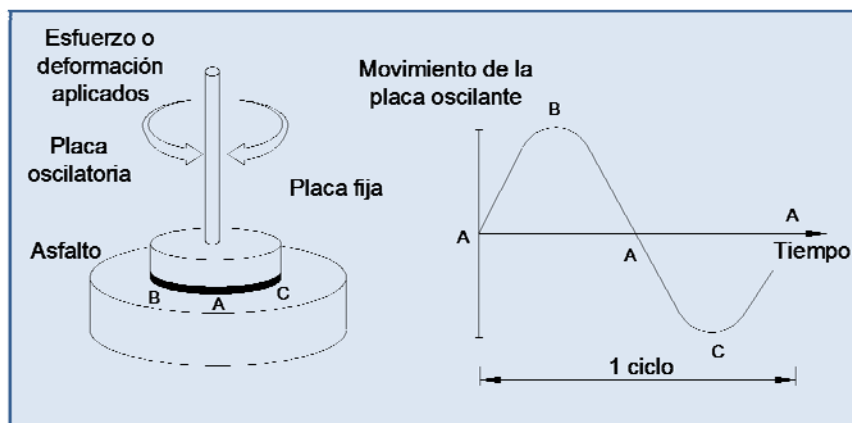


Figura 4-25. Reómetro de corte dinámico (SUPERPAVE, 1994).

La frecuencia de oscilación es simplemente el lapso que insume un ciclo. Un ciclo completo de oscilación en un segundo es un Hertz (Hz). Todos los ensayos SUPERPAVE de corte dinámico en ligantes se realizan a una frecuencia de 10 radianes por segundo, lo que equivale aproximadamente a 1.59 Hz. Hay dos tipos de comunes de reómetros oscilatorios de corte: de esfuerzo constante y de deformación constante. Los reómetros de esfuerzo constante aplican un esfuerzo rotatorio fijo para mover la placa oscilatoria de A a B. Este esfuerzo es determinado en función de la consistencia del ligante ensayado. Los ensayos SUPERPAVE en ligantes se realizan a esfuerzo constante.

4.7.2 Significado y uso de la prueba

El Reómetro de Corte Dinámico (DSR) es usado para caracterizar el comportamiento viscoso y elástico de los ligantes asfálticos. Para ello se mide el módulo de corte complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ) del ligante. G^* es una medida de la resistencia total de un material a la deformación cuando se somete repetitivamente al corte. El mismo tiene dos componentes: una elástica (recuperable) y otra viscosa (no recuperable). δ es un indicador de las propiedades de las deformaciones recuperable y no recuperable.

Los valores de G^* y δ en los asfaltos dependen en gran medida de la temperatura y frecuencia de carga. A altas temperaturas los asfaltos se comportan como fluidos viscosos, como indica el eje vertical en la Figura 4-26. Por otro lado, a temperaturas muy bajas los asfaltos se comportan como sólidos elásticos, como se muestra en el eje horizontal de la misma figura. A las temperaturas en que la mayoría de los pavimentos soportan el tráfico, los asfaltos (como los representados en los vectores 1 y 2) se comportan simultáneamente como líquidos viscosos y sólidos elásticos. Bajo carga parte de la deformación es elástica (recuperable) y parte es viscosa (no recuperable). Por ello el asfalto es definido como un material viscoelástico. En la Figura 4-26, aun cuando ambos asfaltos son viscoelásticos, el asfalto 2 es más elástico que el asfalto 1, por su menor ángulo de fase.

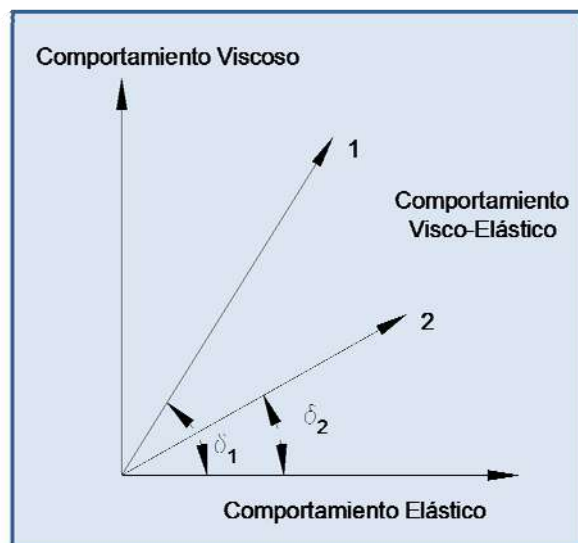


Figura 4-26. Comportamiento Elástico y Viscoso (SUPERPAVE, 1994).

4.7.3 Procedimiento de la prueba

Una vez que se verificó la correcta operación del equipo, se prendió el equipo y se esperó un tiempo de 30 minutos para la estabilización de éste (Figura 4-27). A la par se colocaron las 3 muestras de 250 gramos (A, AP2 y APE) dentro del horno para que se calentara y tuviera una consistencia fluida y poder manipularlo. Cuando el asfalto tuvo una consistencia fluida se vació una cantidad de 0.70 gr en un molde de silicón en una forma de círculo regular (Figura 4-28), de cada una de las muestras, y se dejaron en ese molde a que se enfriara a temperatura ambiente.

Durante ese lapso se limpiaron los platillos que estarían en contacto con el asfalto durante la prueba, y se colocaron en su lugar dentro del equipo para realizar su calibración. Se realizó la operación de "zero gap" es decir, que ambos platillos quedaran en su posición adecuada tocando uno al otro y se verificó su horizontalidad. Se dejaron precalentando los dos platillos dentro del reómetro a fin de que alcanzara la temperatura que se requirió para el primer ensaye.



Figura 4-27. Preparación del reómetro para la realización del ensaye de módulo de corte dinámico.



Figura 4-28. Muestras preparada para la realización de la prueba.

Alcanzada la temperatura, se levantaron ambos platillos e inmediatamente se colocó la pastilla de muestra, retirando el exceso de asfalto con un utensilio caliente y se colocó el capuchón que cubre los dos platos.

Una vez realizado esto se esperó a que se estabilizara la temperatura de prueba (46°C) que es en la cual se inicia el ensaye, y se inició con la operación del equipo para la determinación de los datos de ángulo de fase y módulo de corte dinámico, éste procedimiento se hizo para cada una de las temperaturas de prueba: 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82 y 88 °C (Para muestras sin envejecer y envejecidas en TFOT); y 22, 25, 28, 31, 34, 37 y 40 °C (Para muestras en envejecidas en PAV).

4.8 Prueba de viscosidad rotacional (ASTM D4402-12).

4.8.1 Introducción

La viscosidad rotacional se utiliza para evaluar la "manejabilidad" (workability) del asfalto a altas temperaturas. Se usa un viscosímetro cilíndrico coaxial rotacional, como el aparato Brookfield.

Se mide la viscosidad del ligante asfáltico a alta temperatura con el objetivo de asegurar que el asfalto es suficientemente fluido para las operaciones de bombeo y mezcla. Por lo tanto la viscosidad se mide sobre el asfalto sin envejecer ("tank asphalt") y no debe, de acuerdo con la especificación SUPERPAVE para ligantes, superar los 3 Pa.s para la temperatura de 135°C.

4.8.2 Significado y uso de la prueba

La viscosidad rotacional se determina midiendo el torque necesario para mantener constante la velocidad rotacional de un vástago cilíndrico sumergido en la muestra a una temperatura constante (Figura 4-29).

El torque necesario para mantener al vástago rotando a una velocidad constante está directamente relacionado con la viscosidad de la muestra de ligante, la cual es determinada automáticamente por el viscosímetro.

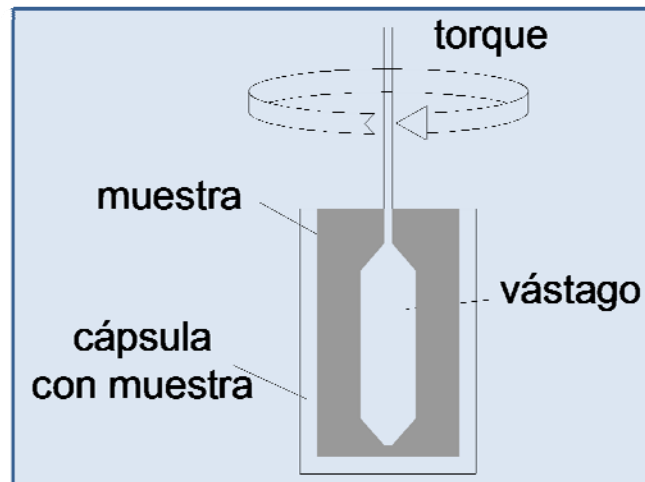


Figura 4-29 Principio de funcionamiento del viscosímetro rotacional (SUPERPAVE, 1994).

El empleo que tiene esta prueba radica en obtener la viscosidad aparente de los asfaltos en las temperaturas de manipulación, mezclado y aplicación, y permite determinar mediante la curva Viscosidad - Temperatura, la temperatura que debe tener el asfalto en el

proceso de la elaboración de la mezcla asfáltica, así como la temperatura de compactación de la mezcla en obra.

4.8.3 Procedimiento de la prueba

Primeramente se calentaron 100 gramos de las muestras a emplear: A, AP2 y APE (envejecidas y sin envejecer) en una estufa, cuidando de no sobrepasar los 150°C. A la par se colocó y niveló el viscosímetro en una mesa de trabajo adecuada. Paso seguido se colocó la geometría y el contenedor vacío y se precalentó el conjunto a la temperatura inicial de prueba (110°C).

Transcurrido hora y media, se retiró del viscosímetro el contenedor y se vació en éste una cantidad aproximada de 10 gramos de asfalto e inmediatamente se colocó nuevamente el recipiente en el viscosímetro ya con el asfalto en su interior, y se sumergió la geometría (Figura 4-30) en el recipiente tratando de que la aguja se cubriera completamente por el asfalto. Se centró la aguja en el contenedor y se esperó un tiempo de 30 minutos para que la temperatura del contenedor, la geometría y la muestra se estabilizara.



Figura 4-30. Colocación de la geometría dentro del recipiente con muestra.

Pasado este tiempo se encendió el motor del viscosímetro (Figura 4-31) y se dejó así durante 5 minutos, que es el tiempo que se requiere para que la lectura del viscosímetro se estabilice, transcurrido este tiempo se tomaron tres lecturas a los minutos uno, dos y tres respectivamente. Posteriormente se apagó el motor, se seleccionó la siguiente temperatura de prueba, se esperó media hora para la estabilización de la temperatura y se realizó el mismo proceso mencionado líneas arriba



Figura 4-31. Proceso de rotación de la geometría empleada del viscosímetro.

4.9 Determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas mediante el ensaye Marshall

4.9.1 Significado y uso de la prueba

Este ensaye permite evaluar los porcentajes de vacíos (VMC), porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos ocupados por el asfalto (VFA) existentes en la mezcla asfáltica; además determina la estabilidad (carga) y flujo (deformación) que se tiene en una mezcla asfáltica cuando es sometido a carga bajo un radio constante de deformación. Con esta información se puede evaluar de manera relativa diferentes tipos de mezclas asfálticas.

4.9.2 Caracterización del agregado pétreo

Antes de llevar a cabo éste ensaye se realizó la caracterización del agregado pétreo empleado en la prueba para garantizar que tuviera un buen desempeño en la mezcla, así como verificar que cumpla con los requisitos indicados en la normativa *N-CMT-4-04/08 Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas* de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). El material pétreo utilizado proviene del Banco Las Brujas ubicado en la Autopista Querétaro-Celaya km 27 desviación izquierda. Básicamente consiste en una andesita basáltica, de origen ígneo de composición básica, de textura afanítica y buena sanidad.

Granulometría del Agregado Pétreo.- Se siguió el procedimiento descrito en la Normativa *M-MMP-4-04-002/02 Granulometría de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, desde la preparación y separación del material, proceso de cribado (Figura 4-32) y obtención de los pesos del material retenido en cada malla. Se determinó la distribución de tamaños de las partículas de agregado, con lo cual se construyó la curva granulométrica (Anexo 5).



Figura 4-32. Proceso de cribado del material pétreo.

Partículas Alargadas y Lajeadas de Material Pétreo.- Basándose en la Normativa *M-MMP-4-04-005/08 Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se realizaron todos los pasos necesarios desde el cuarteo y selección del material, determinación del material retenido en el calibrador de longitudes para las partículas de forma alargadas (Figura 4-33) y el material que pasó por el calibrador de espesores para las partículas en forma de laja.



Figura 4-33. Retención del material pétreo en el calibrador del ensaye de partículas alargadas.

Desgaste del Material Pétreo mediante la Prueba de Los Ángeles.- Tomando como guía la Normativa *M-MMP-4-04-006/02 Desgaste Mediante la Prueba de Los Ángeles de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se preparó la cantidad de material requerido en éste ensaye; inmediatamente se seleccionó la cantidad de material pétreo y esferas requeridas para la prueba, se realizó el ensaye en la máquina de Los Ángeles (Figura 4-34), se retiró el material de la maquina, se desecho aquel que pasaba por la malla 12, se lavó la muestra, se dejó secar al horno, y finalmente se obtuvieron los pesos del material. Con los pesos de los materiales antes y después de haber realizado el proceso de trituración, se calculó el porcentaje por desgaste de trituración (Pa) del material pétreo.



Figura 4-34. Proceso de trituración del material en la máquina de Los Ángeles.

Densidad Relativa del Material Pétreo.- Atendiendo lo indicado en la Norma M-MMP-4-04-003/02 *Densidad Relativa de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, se separó la muestra en dos porciones tal como lo indica la norma y se preparó cada una de las porciones de material (el que pasa por la malla Número 4 y el que se retiene en la malla 3/8"); se calibró el matraz para el ensaye del material que pasa la malla Número 4, se colocó este material en el matraz con agua destilada y se obtuvo su peso, además de la temperatura de prueba para la determinación del peso del matraz con agua. En el caso del material que se retiene en la malla 3/8", se colocó este material en el picnómetro y con el auxilio de una probeta graduada se obtuvo el volumen desalojado, y posteriormente el peso del agregado pétreo una vez secado en horno. Finalmente se calculó la densidad relativa de ambas fracciones del agregado pétreo.

Equivalente de Arena del Agregado Pétreo.- El procedimiento de esta prueba se basó en la norma M-MMP-4-04/02 *Equivalente de Arena de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, empezando con la preparación de la solución utilizada para separar las arenas de los finos, preparación del material pétreo utilizado en la prueba, e introducción de la solución de trabajo en el cilindro hasta una altura de 4 pulgadas. Paso seguido se colocó la muestra de material pétreo en el cilindro y se dejó reposar 10 minutos. Se realizó el

agitado del cilindro (Figura 4-35), se le colocó la solución de trabajo para que cubriera toda la muestra y se dejó reposar 20 minutos. Finalmente se midieron las alturas superiores de los finos y de las arenas y con éstas, se calculó el porcentaje de equivalente de arena.



Figura 4-35. Proceso de agitado del cilindro con la muestra y la solución.

4.9.3 Elaboración de las pastillas para el ensaye Marshall (Normas de Construcción SCT 1981 Tomo IX, 5-5.10, ASTM D 6926)

Con el tamaño nominal obtenido en el análisis granulométrico del material pétreo (Anexo 5) y tomando como base los *Requisitos de Granulometría del Material Pétreo para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de la norma N-CMT-4-04/08* de la SCT (Anexo 4), se seleccionó la granulometría (Anexo 6) empleada en la elaboración de las mezclas asfálticas para las pastillas Marshall.

Con la granulometría adoptada, se procedió a realizar dosificaciones en una cantidad aproximada de 1,100 gr, haciéndose esto por triplicado y para cada porcentaje de asfalto. La cantidad de asfalto que se agregó a cada muestra se determinó tomando como

base el contenido mínimo de asfalto de acuerdo a la Norma de Construcción SCT (1981), Tomo IX, parte primera, capítulo 5, sección 5.4, lo cual se ilustra en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Determinación del contenido mínimo de asfalto.

Material		Constante de área	Superficie parcial	Índice Asfáltico	Contenido Parcial de Asfalto
Tamaño	% Peso	M ² /kg	M ² /kg	Kgs/M ²	Kgs/kg
	Granulometría adoptada (1)	Constante de Área (SCT) (2)	(3) = (1)*(2)	Índice (SCT) (4)	(5) = (3)*(4)
3/4" a # 4	46	0.41	0.19	0.0075	0.00141
# 4 a # 40	39.50	2.05	0.81	0.0075	0.00607
# 40 a # 200	9.50	15.38	1.46	0.0075	0.01096
Pasa # 200	5	53.30	2.67	0.0075	0.01999
				Total	0.03843

Se decidió adoptar como contenido mínimo de asfalto el valor de 4.5%, ya que se contempló que en las mezclas con asfalto modificado el contenido óptimo de asfalto pudiera ser mayor al valor que se obtiene en mezclas con asfalto convencional. La tabla 4-3 muestra los porcentajes de asfalto empelados.

Tabla 4-3. Porcentajes de asfalto utilizados en las mezclas asfálticas.

Especificación	Contenido de Asfalto
Contenido mínimo calculado	3.84 %
Contenido mínimo adoptado	4.50 %
Contenido mínimo adoptado + 0.50%	5.00 %
Contenido mínimo adoptado + 1.00%	5.50 %
Contenido mínimo adoptado + 1.50%	6.00 %
Contenido mínimo adoptado + 2.0%	6.50 %
Contenido mínimo adoptado + 2.50%	7.00 %
Contenido mínimo adoptado + 3.0%	7.50 %

Con los proporcionamientos realizados, se calentó el material pétreo en el horno (Figura 4-36) manteniéndolo a una temperatura de 120°C durante 12 horas previas a la realización de la mezcla. Por su parte el asfalto se calentó a una temperatura constante de 175°C, 15 minutos antes de realizar las mezclas y posteriormente se introdujo en el horno de calentamiento para que mantuviera su temperatura constante.



Figura 4-36. Calentamiento del agregado pétreo en el horno.

Una vez que el material pétreo y el asfalto alcanzaron la temperatura de calentamiento, se procedió a sacar del horno el pétreo y colocarlo en la charola de mezclado e inmediatamente se le agregó el asfalto (Figura 4-37) de acuerdo al porcentaje de asfalto y pétreo empleado, y se pesó la charola previamente tarada, para determinar el peso de la mezcla.



Figura 4-37. Incorporación del asfalto al agregado pétreo.

Se mezclaron los agregados y el cemento asfáltico (Figura 4-38) en una estufa de calentamiento, verificando continuamente que la temperatura de mezclado se encontrara en el rango indicado en la Tabla 5-11.



Figura 4-38. Proceso de mezclado del agregado pétreo con el asfalto.

Una vez que el material pétreo se encontró cubierto completamente por el asfalto, se procedió a colocar la mezcla elaborada en los moldes Marshall (base, molde y collarín) previamente calentados en el horno a una temperatura de 110 °C y se inició el proceso de compactación de la mezcla para la formación de las pastillas, monitoreando que la temperatura de compactación fuera la indicada en la Tabla 5-11.

El número de golpes empleado fue de 75 en cada cara, de acuerdo a los *Requisitos de Calidad para Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de la normativa N-CMT-4-05-003/08* (Anexo 7) para un número de ejes equivalentes entre uno y diez millones.

Finalizada la compactación de la pastilla, se retiró el molde junto con la pastilla y se dejó que se enfriara a temperatura ambiente, se retiró el espécimen del molde, se identificó y se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 24 horas (Figura 4-39).



Figura 4-39. Proceso de enfriamiento de pastilla.

El procedimiento descrito anteriormente se realizó para cada porcentaje de asfalto por triplicado y para las tres tipos de muestras de asfalto empleadas (A, AP2 y APE).

4.9.4 Determinación de los porcentajes de vacíos existentes en la mezcla asfáltica (VMC, VAM Y VFA) (Normas de Construcción SCT 1981 Tomo IX, 5-5.12, ASTM D 1188-96)

Se determinó el peso volumétrico de cada pastilla siguiendo la metodología propuesta en la Norma *ASTM D 1188-96 Método Estándar para la Determinación de la Gravedad Específica y Densidad de Mezclas Compactadas empleando Muestras con Parafina*, midiendo el espesor de la pastilla (Figura 4-40), y se pesó al aire (Figura 4-41).



Figura 4-40. Determinación del espesor de la pastilla.



Figura 4-41. Peso de la pastilla sin recubrir al aire.

Posteriormente se envolvió con estereato de zinc y se etiquetó, se cubrió con parafina y se peso la pastilla cubierta con parafina tanto al aire (Figura 4-42) como sumergida. Finalmente con estos datos se calcularon los pesos volumétricos y vacíos existentes en las pastillas.



Figura 4-42. Peso de la pastilla cubierta con parafina al aire.

4.9.5 Determinación de la Estabilidad y Flujo de los especímenes Marshall (ASTM D 6927-06)

Atendiendo a lo indicado en la Norma *ASTM D 6927-06 Método Estándar para la Determinación de la Estabilidad y Flujo de Mezclas Asfálticas*, se le retiró la capa de parafina a la pastilla y se sumergieron en un tanque de saturación con agua a temperatura de 60°C durante un tiempo de 30 minutos (Figura 4-43), se retiró la pastilla del tanque y se secó superficialmente con una franela, se colocó el espécimen en entre las dos secciones de la cabeza de prueba y se centró el conjunto en la máquina de compresión Marshall. Se colocaron el medidor de flujo y el extensómetro del anillo en ceros y se le aplicó la carga al espécimen a una velocidad de 50 mm por minuto hasta la falla del espécimen (Figura 4-44), momento en el cual se registró la carga máxima soportada (estabilidad) y la deformación (flujo) asociada a ésta.



Figura 4-43. Especímenes en saturación a 60°C.



Figura 4-44. Ensayo de Estabilidad y Flujo en proceso.

Finalmente con los datos obtenidos anteriormente se graficaron y se determinó el contenido óptimo de asfalto siguiendo el procedimiento mencionado en la sección 5.7.3 de este documento.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Ensaye de película delgada en horno (TFOT)

5.2 Ensaye de cámara de envejecimiento a presión (PAV)

Debido a que los ensayos TFOT y PAV son consideradas técnicas de envejecimiento, no se informan los resultados con excepción de la pérdida de masa posterior al envejecimiento TFOT. La Tabla 5-1 indica los porcentajes de pérdida que experimentaron las tres muestras ensayadas.

Tabla 5-1. Porcentajes de pérdida de masa de las muestras envejecidas en TFOT.

Muestra	Espécimen	Masa original (gr)	Masa envejecida (gr)	% Pérdida
A	1	50.27	49.35	1.83
	2	50.34	49.47	1.73
AP2	1	50.07	49.46	1.22
	2	50.31	49.76	1.09
APE	1	50.29	49.73	1.11
	2	50.31	49.67	1.27

De la tabla anterior se visualiza que existe una mayor pérdida de masa en la muestra A que en los otros. En lo que respecta a los asfaltos modificados se observa que la muestra APE presenta una mayor pérdida de masa en comparación con la muestra AP2, lo cual sugiere que la muestra pierde mayor cantidad de fracción liviana (volatilización) durante este envejecimiento.

5.3 Caracterización de las muestras de asfalto mediante Espectroscopía infrarroja

Las muestras analizadas mediante espectroscopía infrarroja permitieron observar la liga química existente entre el asfalto y el polímero SBS mediante la identificación de los grupos funcionales que se presentaron en las dos muestras de asfalto modificado (AP2 y APE) tanto sin envejecer como envejecidas en TFOT y PAV, lo que permitió visualizar la unión química prevaleciente en el composito asfalto - polímero SBS, ya que éste es el objetivo primordial de esta investigación.

Se realizaron observaciones de las muestras de asfalto modificado AP2 y APE sin envejecer para determinar los grupos funcionales que existen en estas muestras originalmente.

Posteriormente se observaron los grupos funcionales de las mismas muestras envejecidas en TFOT y PAV para ver su comportamiento cuando son sometidas a volatilización y oxidación.

En la Figura 5-1 del espectro de la muestra A, se observan bandas anchas lo que indica que existen un gran número de compuestos químicos que corresponden a los asfaltenos, maltenos (parafinas naftalenicos y resinosos) del asfalto, pudiéndose identificar las bandas características para el sulfóxido (S=O) en 1031 y 1376 cm^{-1} , la banda 853 cm^{-1} que corresponde a la absorción del grupo C-H aromático sustituido en 1,2,4. La sustitución aromática de C-H 1,2,4 y 1,4 le corresponde la banda 812 cm^{-1} , la sustitución 1,2 de C-H esta en 742 cm^{-1} , la banda 727 cm^{-1} corresponde a la cadena $-(\text{CH}_2)_n-$ (con $n > 4$), y el S-O se encuentra entre el intervalo 870-810 cm^{-1} .

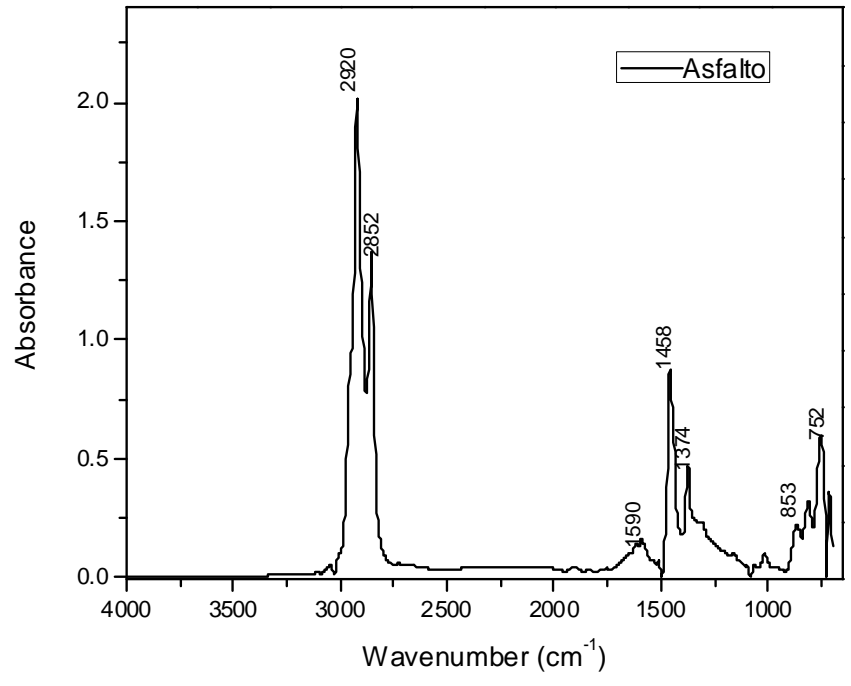


Figura 5-1. Espectro IR de absorbancia de la muestra A sin envejecer.

En cada uno de los espectros se han identificado las bandas características de cada tipo de polímero y del asfalto, en el caso de la muestra A, la banda característica es a 1374 cm⁻¹, para el caso del SBS-411 (Figura 5-2) la banda identificada es 965 cm⁻¹.

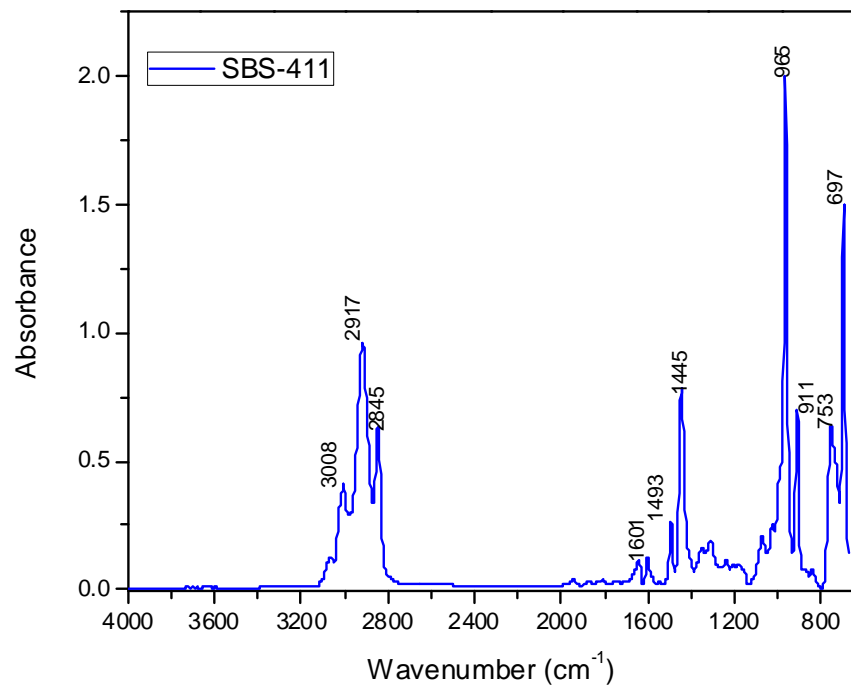


Figura 5-2. Espectro IR de absorbancia del polímero SBS-411.

En el espectro del estabilizador (Figura 5-3), es posible observar la banda de absorción en 1740 y 1680 cm^{-1} asimétrica y simétrica de grupo carboxilo ($\text{C}=\text{O}$) respectivamente. La banda de absorción en 1236 cm^{-1} corresponde al grupo $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ de la resina fenólica.

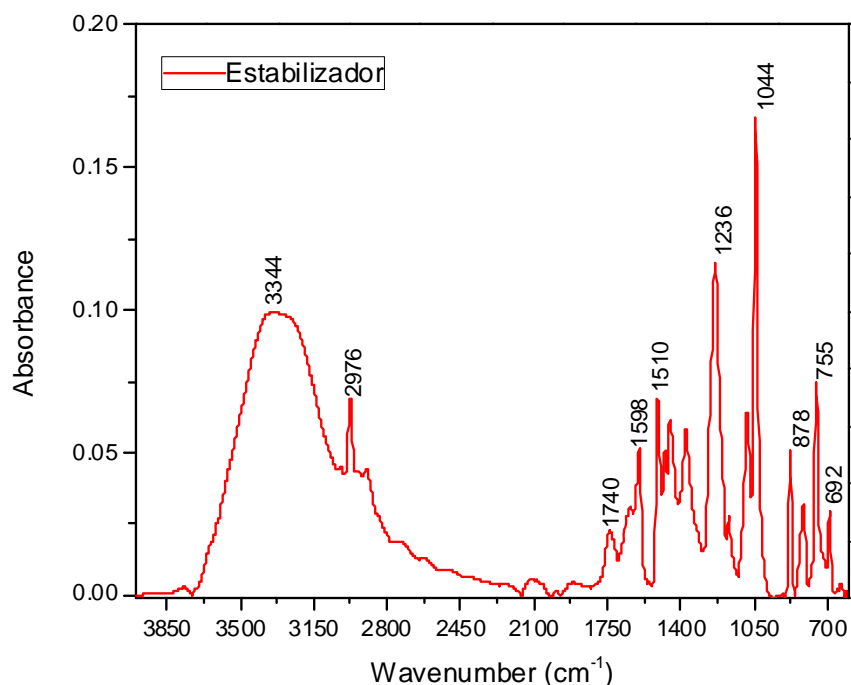


Figura 5-3. Espectro IR de absorbancia del estabilizador.

La Figura 5-4 muestra que no existe variación de las muestras AP2 y APE cuando aun no se han sometido a ningún tipo de envejecimiento, es decir conservan los mismos grupos funcionales.

Una vez que las muestras AP2 y APE son sometidas a volatilización que es simulada por el envejecimiento TFOT, se aprecia (Figura 5-5) que la muestra AP2 comienza a degradarse, no así en el caso de la muestra APE la cual conserva la misma forma que presentaba cuando aun no se sometía a ningún tipo de envejecimiento, lo que indica que el proceso de volatilización repercute mas en el asfalto modificado que no contiene el estabilizador, en otras palabras el estabilizador le proporciona al polímero SBS estabilidad química.

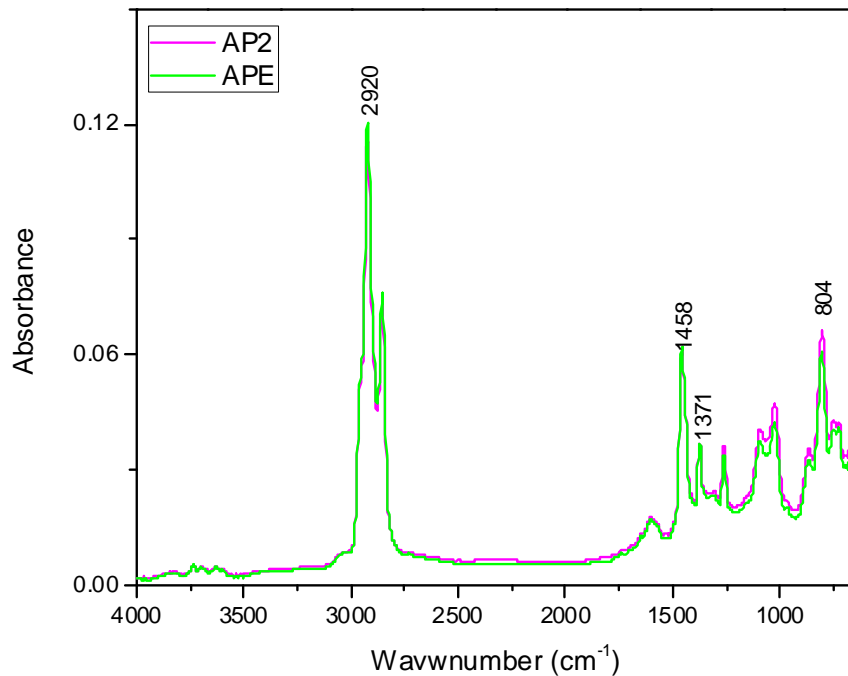


Figura 5-4. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE sin envejecer.

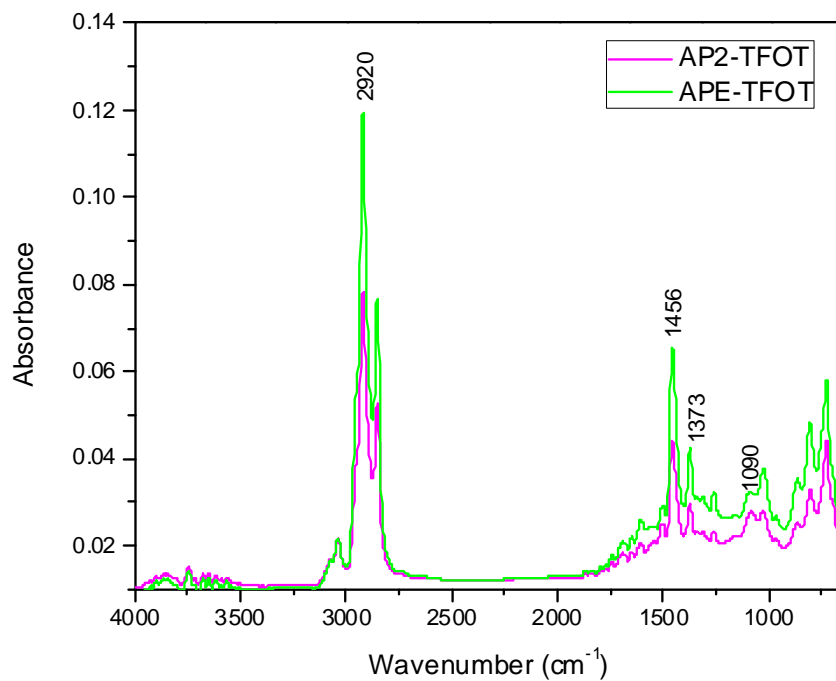


Figura 5-5. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE envejecidas en TFOT.

La Figura 5-6 muestra que cuando las muestras AP2 y APE son sometidas a oxidación, la muestra APE tiende a degradarse más que la muestra AP2, esto se debe a que el estabilizador contiene azufre, el cual promueve que se de esta degradación.

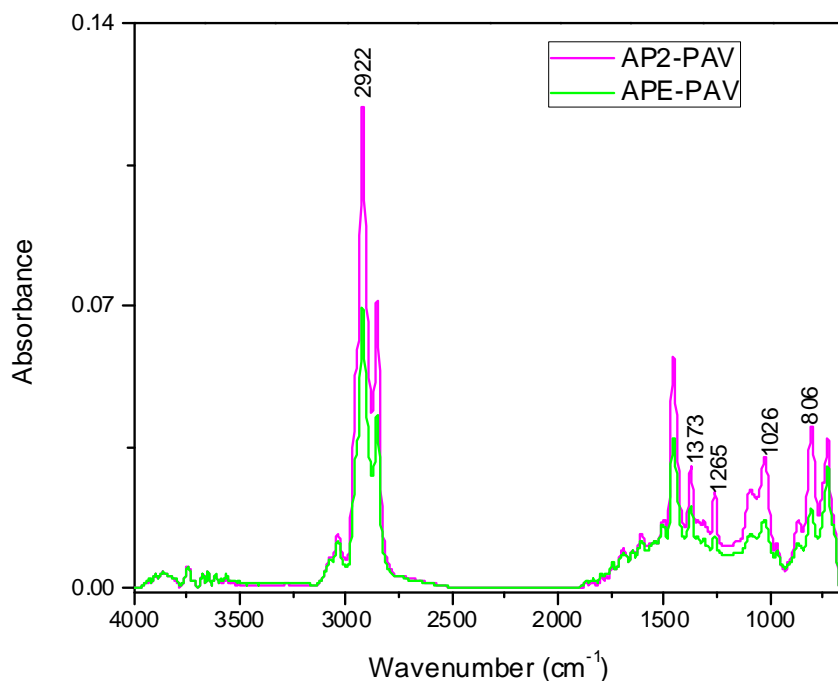


Figura 5-6. Espectro IR de absorbancia de las muestras AP2 y APE envejecidas en PAV.

Se observa que la muestra APE conserva los grupos funcionales de la muestra AP2 antes y después de estar sujetos a los dos tipos de envejecimiento (TFOT y PAV) tal como se muestra en la Figura 5-7; lo que significa que a pesar de la volatilización y oxidación que experimentaron ambas muestras, se sigue teniendo los mismos grupos funcionales, lo cual indica que se sigue manteniendo la liga química entre el asfalto y el polímero SBS, es decir el estabilizador propuesto cumplió con su objetivo de unirlos químicamente.

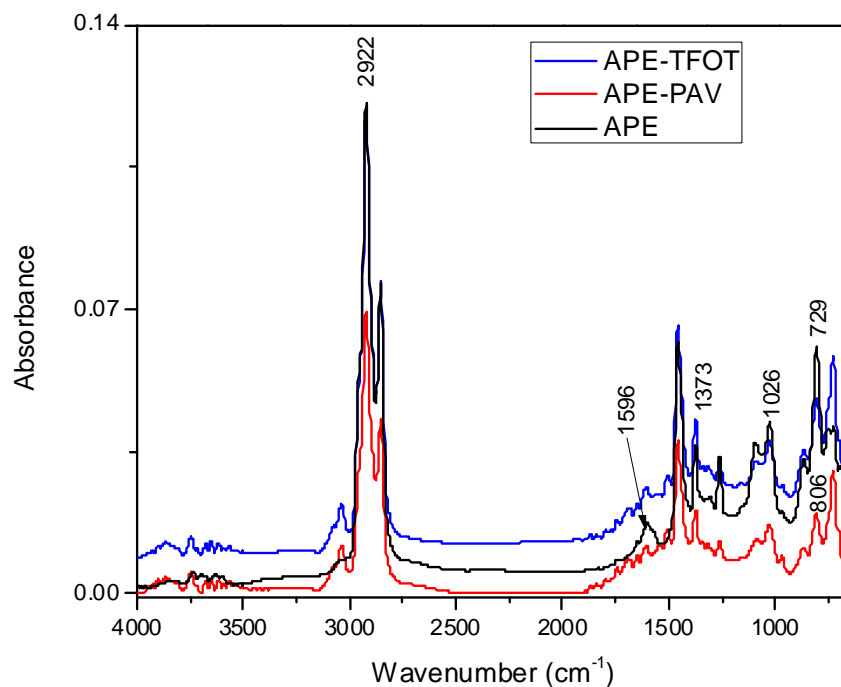


Figura 5-7. Espectro IR de absorbancia de la muestra APE tanto sin envejecer como envejecida.

5.4 Ensayo de tracción directa en plásticos.

Se construyó la grafica Esfuerzo - Deformación (Figura 5-8), de las muestras ensayadas la cual se muestra a continuación.

Como primer punto se observa que el aumentar la cantidad de polímero SBS al asfalto repercute en un ligero incremento en el valor del módulo de elasticidad tal como se aprecia en la muestra AP3, cuyo módulo de elasticidad de 16.54 MPa resultó mayor al de la muestra AP2 que presenta un valor de 15.85 MPa.

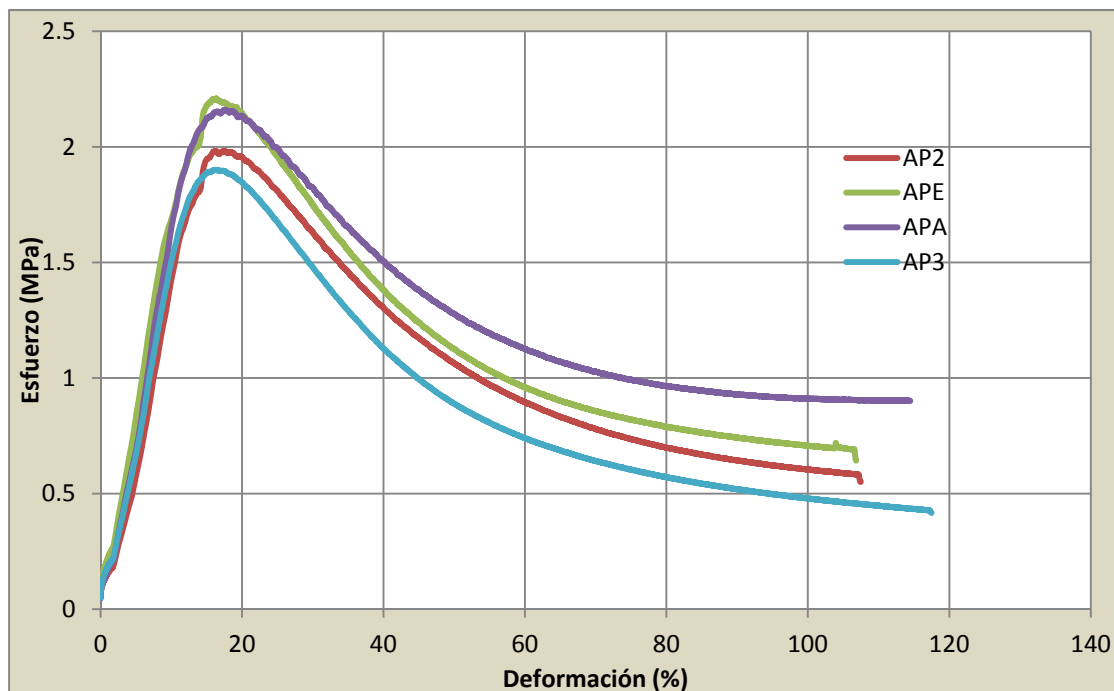


Figura 5-8. Gráfica Esfuerzo - Deformación de las muestras ensayadas en la prueba de tracción.

Las muestras APE y APA presentan valores de módulo de elasticidad mayores a los que tienen los asfaltos que solo son modificados con polímero SBS; lo cual indica que la adición de agente estabilizador mejora la respuesta elástica de un asfalto modificado con polímero SBS. En este mismo sentido la muestra APE tiene un módulo de elasticidad de 19.33 MPa, el cual es mayor al que tiene la muestra APA cuyo valor es de 18.76 MPa, lo que pone de manifiesto que la resina fenólica le otorga un aumento en las propiedades elásticas al agente estabilizador.

5.5 Ensayo de reómetro de corte dinámico.

De los ensayos realizados en muestras sin envejecer y envejecidas en TFOT, se obtuvieron los datos de módulo de corte complejo (G^*), ángulo de fase (δ) y módulo de corte dinámico ($G^* / \sin \delta$), los cuales son mostrados en las tablas siguientes.

Tabla 5-2. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A sin envejecer.

Muestra: A			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46	32360	75.875	33.37
52	13495	78.680	13.76
58	5655	81.375	5.72
64	2332.50	83.795	2.35
70	963.85	86.03	0.97
76	419.20	88.32	0.42

Tabla 5-3. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 sin envejecer.

Muestra: AP2			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46	49365	66.665	53.76
52	22370	67.800	24.16
58	10430	71.810	10.98
64	4827	77.150	4.95
70	2255	81.485	2.28
76	1091	84.635	1.10
82	560.40	87.005	0.56

Tabla 5-4. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE sin envejecer.

Muestra: APE			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46	59925	66.080	65.56
52	26805	66.315	29.27
58	12715	66.200	13.90
64	6367	66.785	6.93
70	3355	68.955	3.59
76	1803.50	72.095	1.90
82	980.30	74.625	1.02
88	554	76.040	0.57

Tabla 5-5. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A envejecida en TFOT.

Muestra: A (TFOT)			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46			
52			
58	12955	77.035	13.29
64	5827.50	79.665	5.92
70	2640	82.284	2.66
76	1241	84.627	1.25

Tabla 5-6. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 envejecida en TFOT.

Muestra: AP2 (TFOT)			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46			
52			
58			
64	9487	71.594	10.00
70	4893.50	74.191	5.09
76	2503.50	77.724	2.56
82	1276	81.241	1.29

Tabla 5-7. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE envejecida en TFOT.

Muestra: APE (TFOT)			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* / sen δ (kPa)
46			
52			
58			
64			
70	6756.50	68.539	7.26
76	3522	70.330	3.74
82	1883.50	72.714	1.97
88	1030.50	75.337	1.07

Atendiendo la normativa *N-CMT-4-05-004/08 Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG de la SCT* (Anexo 2), y comparando con los datos obtenidos en la prueba, se puede apreciar que el grado de desempeño aumenta considerablemente en las muestras con asfalto modificado (AP2 y APE) en comparación con el asfalto convencional (A). En ese mismo sentido, se observa como la muestra con estabilizador (APE) resultó en un grado de desempeño mayor a la muestra que solo contiene polímero (AP2).

En lo que respecta a las muestras una vez envejecidas se aprecia que el grado PG aumenta en las muestra A y AP2, esto debido a la rigidez que le proporciona el envejecimiento, sin embargo aunque estos valores resultaron mayores, el grado de desempeño corresponde al proporcionado por las muestras sin envejecer.

Con los valores del módulo de corte complejo y ángulo de fase se construyeron gráficas que permitieron conocer en qué zona (viscosa ó elástica) se encuentra cada muestra a diferentes temperaturas de prueba. Se muestra a continuación gráficas de zona elástica - zona viscosa en las muestras sin envejecer para tres temperaturas de pruebas. Las gráficas conteniendo todas las temperaturas de prueba se pueden consultar en el anexo 3.

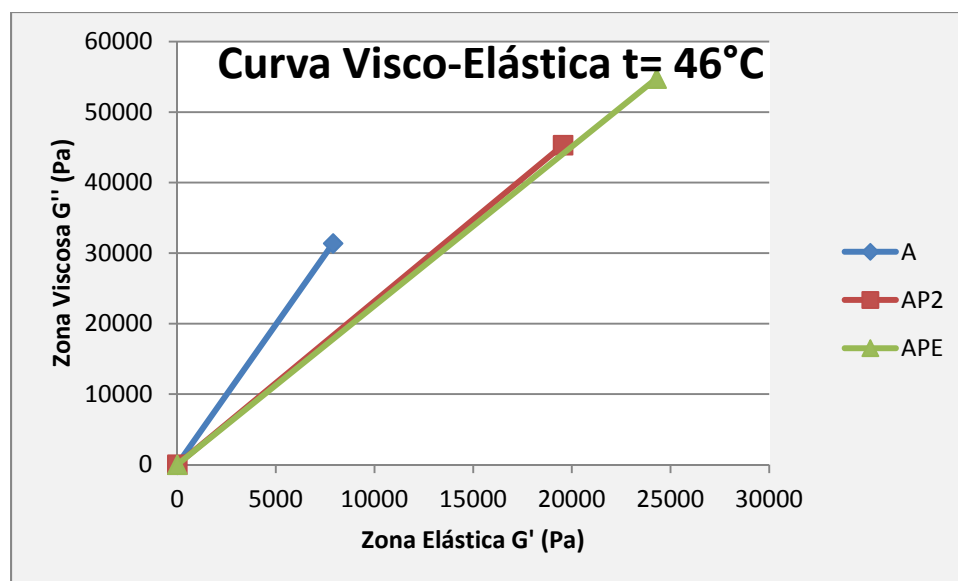


Figura 5-9. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 46°C.

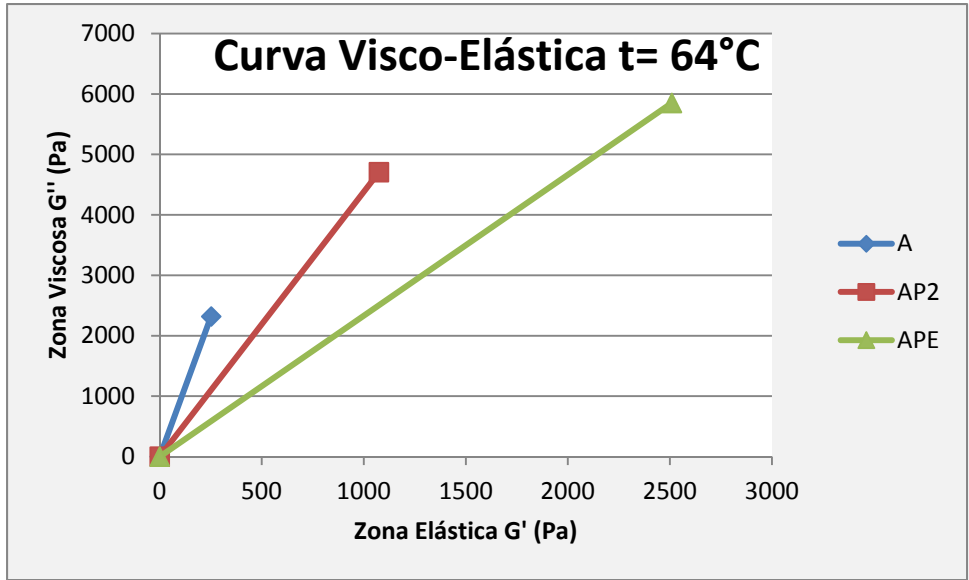


Figura 5-10. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 64°C.

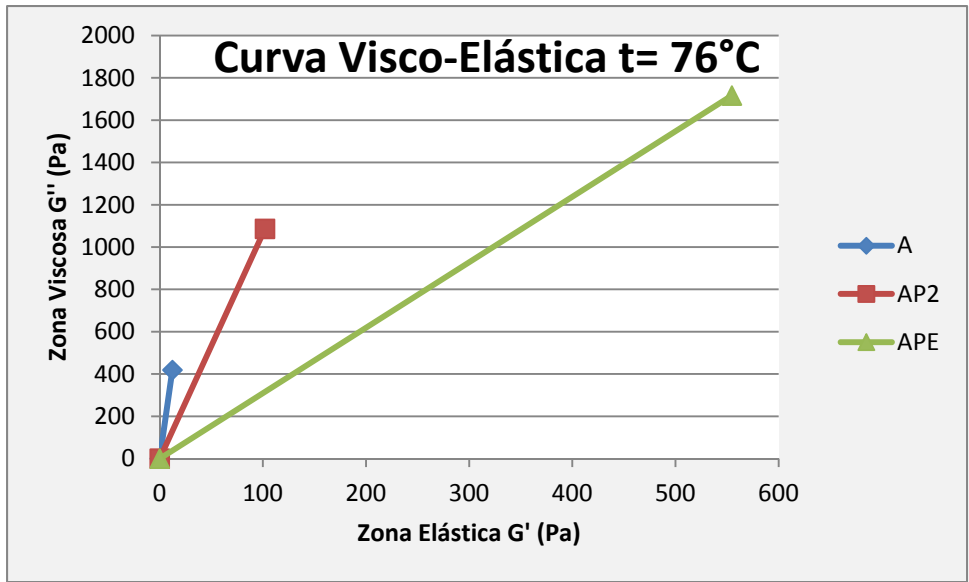


Figura 5-11. Gráfica de la zona viscosa-elástica de las muestras ensayadas a 76°C.

Se puede apreciar en las gráficas anteriores que conforme aumenta la temperatura las muestras A, AP2 tienden hacia la zona viscosa, no así la muestra APE, la cual se mantiene casi constante en un valor de ángulo de fase, lo que muestra que su comportamiento es satisfactorio debido a que conserva ambas zonas (viscosa y elástica) que si bien tiende hacia un comportamiento viscoso, su zona elástica permitirá que éste al ser

sometido a las cargas impuestas por el tráfico tenga mayor capacidad de recuperación a la deformación permanente. Esto queda evidenciado por el llamado factor de ahuellamiento (*rutting factor*), $G^*/\text{sen}(\delta)$, que representa el componente viscoso de la rigidez total del ligante a alta temperatura.

Las muestras envejecidas en TFOT, presentan un comportamiento similar al explicado anteriormente, con la salvedad que los valores del ángulo de fase son menores indicando una reducción de la componente viscosa. De igual manera las gráficas se pueden consultar en el anexo 3.

En el caso de las muestras con envejecimiento PAV ensayadas en el reómetro de corte dinámico, las temperaturas de prueba fueron menores ya que se hace en función de temperaturas intermedias que alcanza el asfalto en servicio. Las siguientes tablas muestran los valores obtenidos en el ensaye.

Tabla 5-8. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra A envejecida en PAV.

Muestra: A (PAV)			
Temperatura de prueba (°C)	G^* (Pa)	δ (°)	$G^* \times \text{sen} \delta$ (kPa)
22	8500000	41.139	5592.05
25	5805000	43.077	3964.70
28	3917500	45.119	5528.71
31	2633500	47.162	3591.40
34			
37			
40			

Tabla 5-9. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra AP2 envejecida en PAV.

Muestra: AP2 (PAV)			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* x sen δ (kPa)
22			
25	7986500	38.842	5008.93
28	5615000	40.670	3659.30
31	3925500	42.501	2652.08
34	2722000	44.345	1902.62
37	1868000	46.225	1348.81
40			

Tabla 5-10. Datos reológicos obtenidos de la prueba de reómetro de corte dinámico de la muestra APE envejecida en PAV.

Muestra: APE (PAV)			
Temperatura de prueba (°C)	G* (Pa)	δ (°)	G* x sen δ (kPa)
22			
25	6774500	38.269	4195.82
28	4732500	40.063	3045.98
31	3288500	41.838	2193.52
34	2274000	43.583	1567.71
37	1554500	45.404	1106.92
40	1058000	47.235	776.73

Se puede apreciar que los valores del ángulo de fase para varias temperaturas, son menores en la muestra APE lo que indica nuevamente un comportamiento elástico.

Se observa también que el valor $G^* \times \sin(\delta)$ denominado factor de agrietamiento por fatiga de la muestra APE, resulta menor que el de la muestra AP2, lo cual es bueno ya que se sabe que mucho de los asfaltos modificados tienen el problema de que no resisten fisuración por fatiga debido al valor tan alto (mayores a 5000kPa) que obtienen de factor de agrietamiento.

5.6 Prueba de viscosidad rotacional.

La Figura 5-12 muestra la curva Viscosidad-Temperatura de las muestras sin envejecer ensayadas.

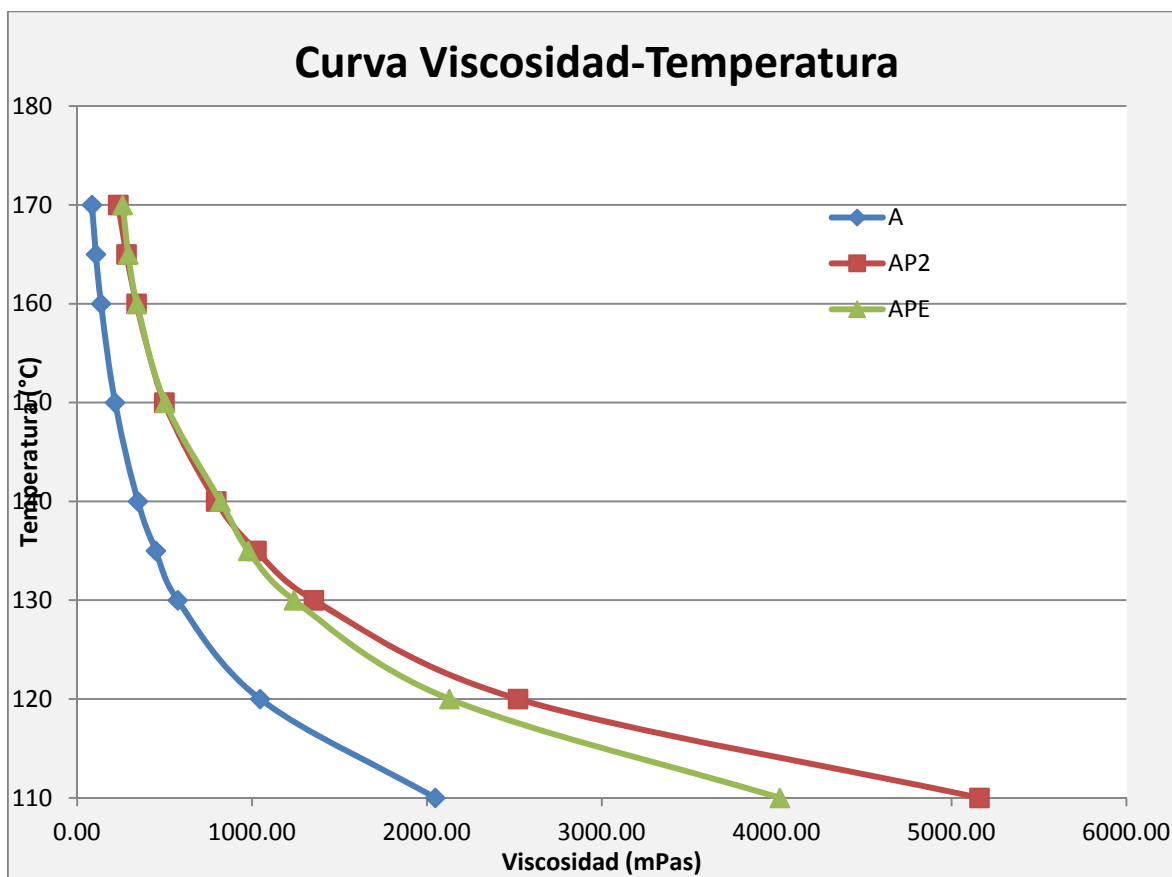


Figura 5-12. Curva viscosidad-temperatura de las muestras sin envejecer.

Se observó que la viscosidad de la muestra A para una misma temperatura, resultó menor que las obtenidas en las muestras AP2 y APE.

Se visualizó además en los asfaltos modificados (AP2 y APE), que a temperaturas inferiores a 135°C, la muestra AP2 tuvo una viscosidad mayor que la muestra APE; lo que indica que la muestra AP2 puede contener mayor cantidad de fracción pesada (asfaltenos) debido a la fracción liviana que absorbe el SBS cuando se incorporó al asfalto.

Se aprecia también que conforme se incrementa la temperatura, la viscosidad de ambas muestras tiende a ser igual, esto es porque al incrementarse la temperatura de la muestra APE pierde fracción liviana y su comportamiento es equiparable con el de la muestra AP2 que ya ha perdido proporción de maltenos.

Atendiendo a las recomendaciones indicadas en el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2008, en el cual se manejan dos rangos de viscosidades requeridas en el asfalto para la elaboración y compactación de las mezclas asfálticas, y con el auxilio de la Figura 5-12, se obtuvieron las temperaturas requeridas para llevar a cabo el mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. La Tabla 5-11 muestra estos resultados.

Tabla 5-11. Temperaturas de mezclado y compactación para la elaboración de mezclas asfálticas.

Característica	Tipo de asfalto		
	(A)	(AP2)	(APE)
Rango de temperaturas de mezclado, °C	150-160	172-180	180-190
Rango de temperaturas de compactación, °C	140-150	160-168	160-172

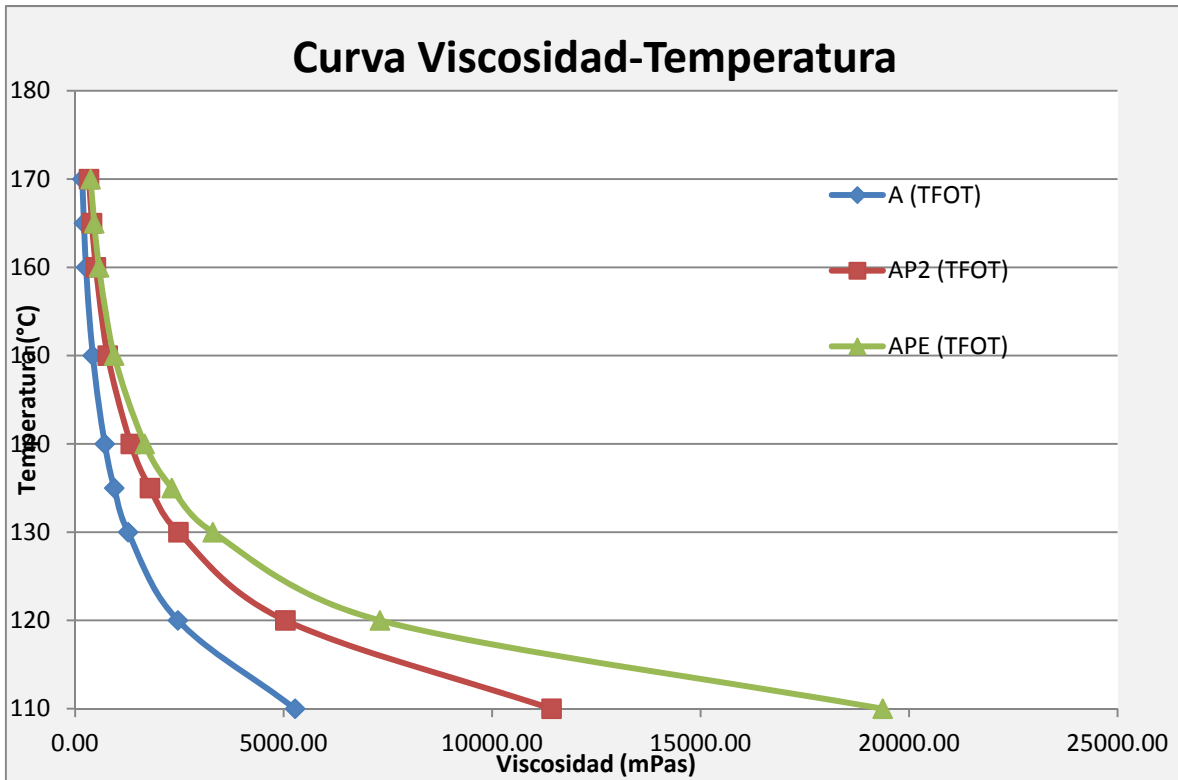


Figura 5-13. Curva viscosidad-temperatura de las muestras envejecidas en TFOT.

La Figura 5-13 muestra la curva viscosidad-temperatura de las muestras envejecidas en TFOT. Se puede notar claramente como todas las muestras incrementan su valor de viscosidad, esto se debe a que en el proceso de envejecimiento en TFOT perdieron gran cantidad de la fase maltenica debido a la volatilización que se generó.

Se aprecia además que la viscosidad de la muestra APE resultó ser mayor que la de la muestra AP2, muy probablemente obedezca al hecho de separación de fases (polímero - asfalto) que se haya presentado en la muestra AP2 durante el proceso de envejecimiento, mientras que la muestra APE conservó la unión de las dos fases del asfalto modificado.

5.7 Determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas asfálticas mediante el ensaye Marshall

5.7.1 Caracterización del agregado pétreo

Como primer resultado de esta prueba se tienen los datos obtenidos de la caracterización del agregado pétreo (Tabla 5-12), la cual muestra que el pétreo empleado cumple con los requisitos estipulados por la normativa SCT, por lo que el material se considera aceptable para su utilización en las mezclas asfálticas.

Tabla 5-12. Calidad del material pétreo empleado en la realización de las mezclas asfálticas.

Manual	Prueba	Valor Obtenido	Valor de Especificación	Normativa
<i>M-MMP-4-04-005/08</i>	Partículas Alargadas y Lajeadas	27.60 % 31.72%	40 % (Máximo)	<i>N-CMT-4-04/08</i>
<i>M-MMP-4-04-006/02</i>	Desgaste del Material Pétreo mediante la Prueba de Los Ángeles	15.66 %	35 % (Máximo)	
<i>M-MMP-4-04-003/02</i>	Densidad Relativa del Material Pétreo	2.67	2.40 (Mínimo)	
<i>M-MMP-4-04/02</i>	Equivalente de Arena del Agregado Pétreo	77 %	50 % (Mínimo)	

Se muestran a continuación los resultados obtenidos de la realización del ensaye Marshall en los cuales se indica el comportamiento que tuvo cada característica de la mezcla de las tres tipos de muestra de asfalto empleadas.

Como primer puntos se puede observar (Figura 5-14), que la mezcla en la que se utilizó la muestra A, tiene un peso volumétrico mayor en comparación con las mezclas con muestra AP2 y APE.

5.7.2 Características volumétricas, de carga y deformación de las mezclas asfálticas elaboradas (A, AP2 y APE)

Se aprecia también que el porcentaje de asfalto asociado al peso volumétrico máximo resulta menor en las muestras con asfalto modificado (AP2 y APE), siendo la mezcla con APE la que tiene un porcentaje de asfalto menor.

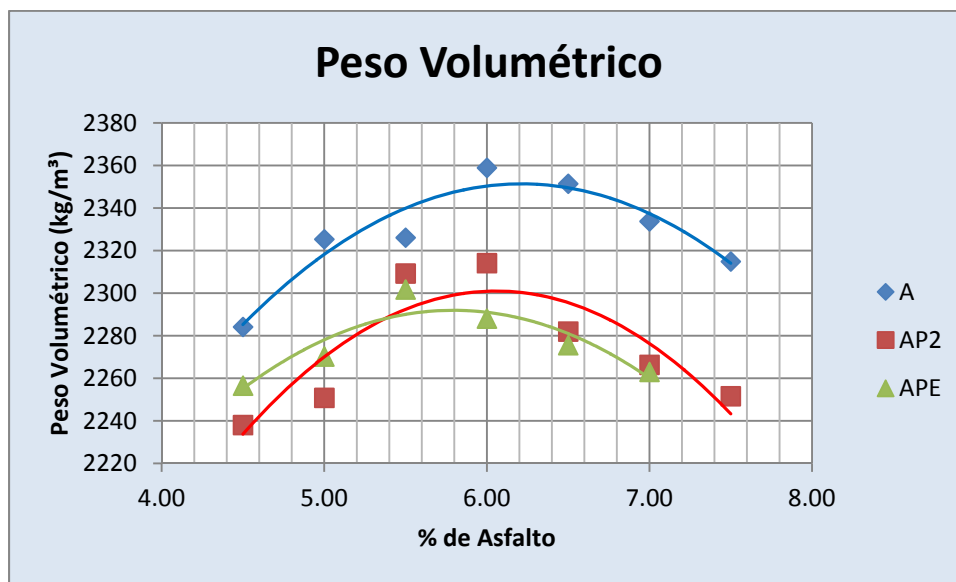


Figura 5-14. Curva Peso Volumétrico - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

La estabilidad mayor (Figura 5-15), la presenta la mezcla asfáltica que contiene la muestra APE, siguiéndole en orden descendente la que contiene la muestra AP2 y finalmente la que tiene la muestra A, asociados a un incremento en su porcentaje de asfalto respectivamente. De lo anterior resulta evidente el incremento de estabilidad que se obtiene cuando el asfalto es modificado con polímero SBS y estabilizador.

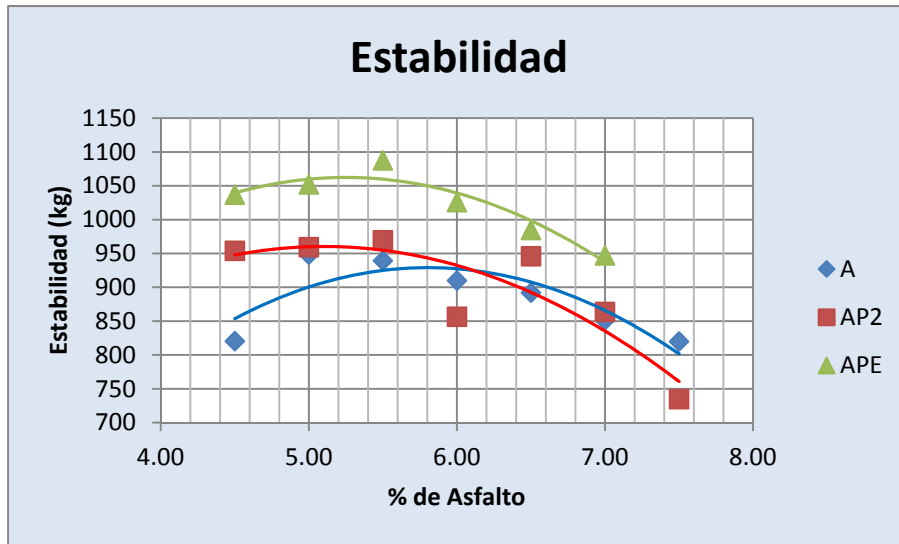


Figura 5-15. Curva Estabilidad - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

La mezcla que contiene muestra de asfalto A, tiende a presentar un menor valor de flujo en porcentajes menores de asfalto (por debajo de 6%), y mayor valor de flujo en porcentajes de asfalto arriba del 7% (Figura 5-16), no así en el caso de la mezcla elaborada con muestra AP2 la cual se mantiene en un rango de flujo entre 2 y 2.27%. Por su parte la mezcla con APE presenta un comportamiento diferente a las dos mezclas anteriores, ya que al incrementarse el contenido de asfalto, el flujo tiende a reducirse; esto puede deberse al comportamiento elástico que tiene la muestra APE.

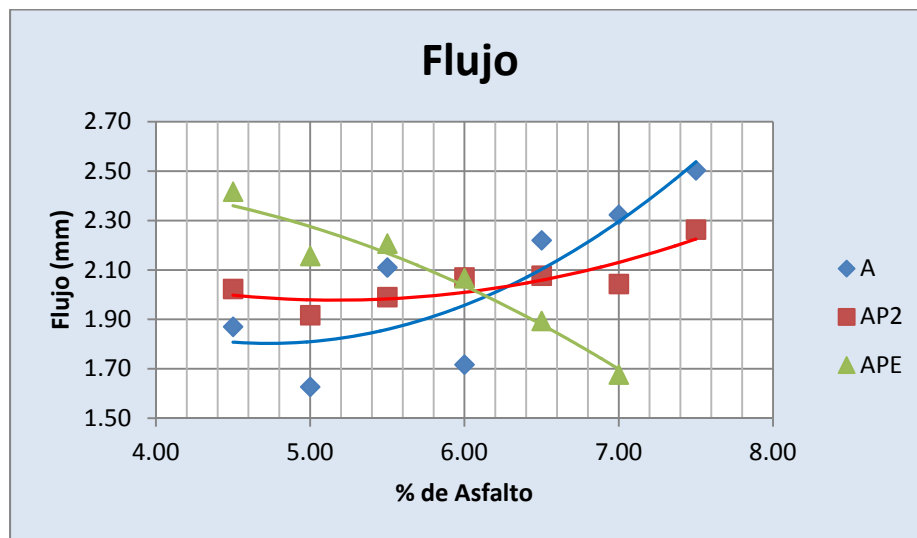


Figura 5-16. Curva Flujo - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

Se observa (Figura 5-17), que conforme aumenta la cantidad de porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica con la muestra A presenta la tendencia a una reducción de los vacíos. La mezcla con muestra AP2 y APE sin embargo, a pesar de que se incremente el porcentaje de asfalto (mayor a 5.60%) se mantienen valores adecuados de vacíos; pero cuando se reduce el porcentaje de asfalto los vacíos incrementan, superando el valor máximo indicado en la normativa SCT (5%). La tendencia de estas dos mezclas muestra que la muestra APE es la que presenta mayor valor de vacíos para un mismo porcentaje de asfalto.

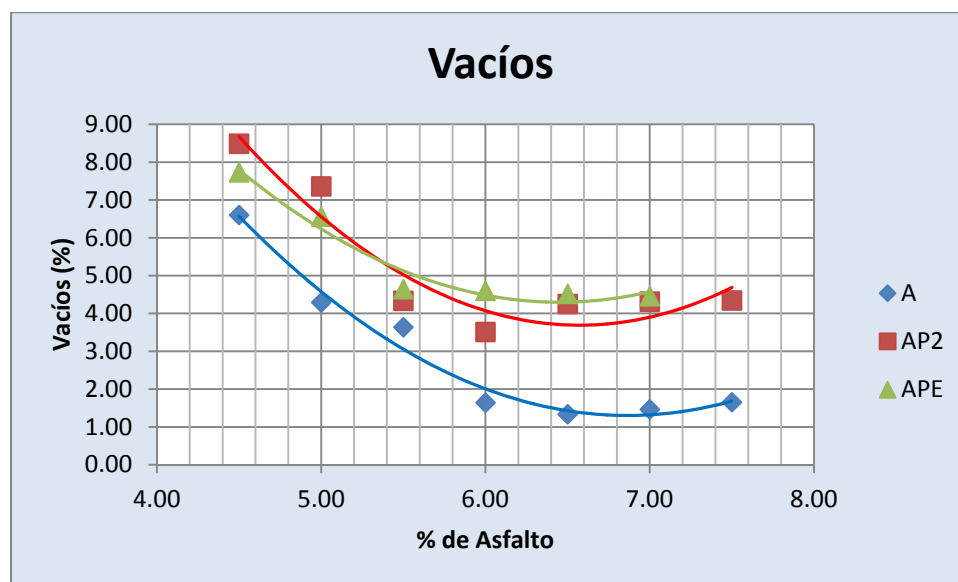


Figura 5-17. Curva Vacíos - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

En la Figura 5-18, se puede ver que las tres mezclas tienen un comportamiento satisfactorio en lo referente al VAM ya que en los tres casos los valores mínimos en las curvas son mayores a los requeridos por normativa SCT, a pesar de esto la mezclas compuestas por las muestras AP2 y APE son las más convenientes ya que permiten obtener valores mayores de VAM asociados a un porcentaje de asfalto menor, siendo ligeramente menor el de la mezcla con APE.

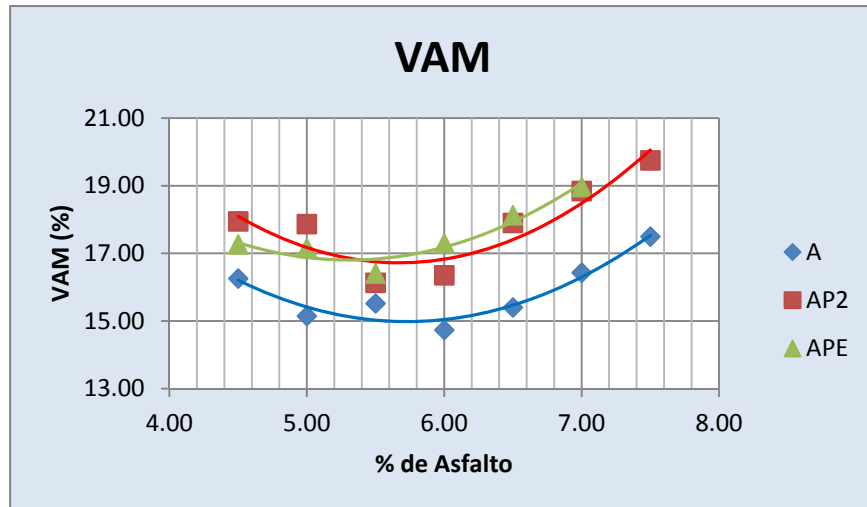


Figura 5-18. Curva Vacíos - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

La mezcla con muestra A (Figura 5-19), se encuentra limitada a un porcentaje de asfalto menor a 5.20% ya que al aumentar se supera el valor de VFA requerido por normativa SCT. Por su parte las mezclas con AP2 y APE toleran valores mayores de porcentaje (entre 5.20 y 5.95%) de asfalto antes de llegar al límite de VFA, inclusive la mezcla con APE es capaz de tener aun mayor porcentaje de asfalto antes de verse rebasada su aplicación para cumplir con los valores de VFA; lo cual indica que tiene un mejor comportamiento a deformación permanente ya que aunque se incremente el porcentaje de asfalto, no presentará problemas de roderas como en el caso de las mezclas con asfalto convencional.

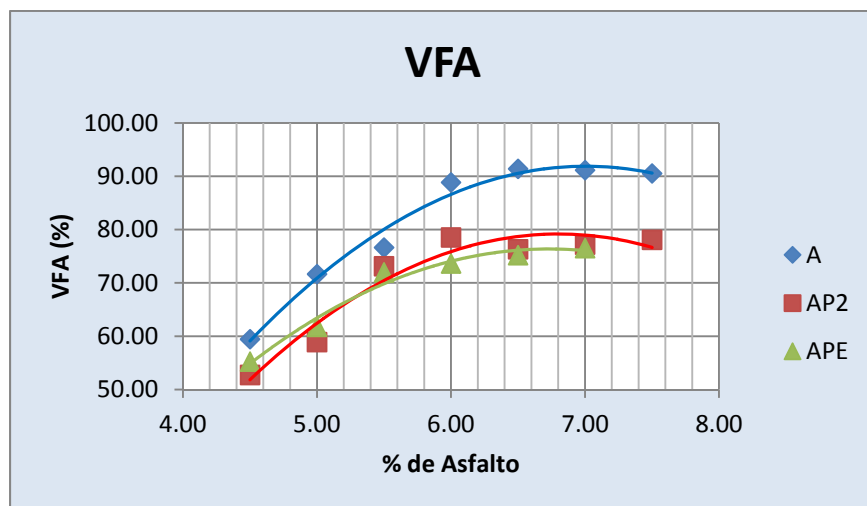


Figura 5-19. Curva VFA - % de Asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas.

5.7.3 Determinación del contenido óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas elaboradas (A, AP2 y APE)

Para la determinación del óptimo de asfalto, se siguió la metodología expuesta por Garnica et al. (2004), en la cual se entró en la gráfica Vacíos - % de Asfalto (Figura 5-17) y se interceptó la curva con el valor correspondiente al 4% de vacíos que es el promedio para el diseño de las mezclas asfálticas, obteniéndose el porcentaje de asfalto, el cual fue evaluado en las otras gráficas (Figura 5-14 a Figura 5-19) para determinar las características correspondientes de la mezcla analizada. Las Tablas 5-13 a la 5-15 muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5-13. Características obtenidas en la mezcla con muestra A.

Muestra	% óptimo de asfalto	Característica	Datos	Especificación
A	5.17	Peso Volumétrico (kg/m ³)	2327	-
		Vacíos (%)	4.00	3-5
		VAM (%)	15.23	14 (Mín)
		VFA (%)	74.33	65-75
		Estabilidad (kg)	911	816.50
		Flujo (mm)	1.82	2-3.5

Para el caso de la mezcla en donde se empleó muestra A el contenido óptimo de asfalto es de 5.17%. Se puede observar (Tabla 5-13), que se cumplen todos los requisitos exigidos en la normativa SCT (Anexo 7 y 8), con excepción del valor del flujo que resulta ligeramente menor al límite que estipula la norma.

En la mezclas asfáltica con muestra AP2, al determinar el porcentaje de asfalto correspondiente al valor de 4% de vacíos y evaluar el valor obtenido de porcentaje en las características de las mezclas, se observó que el valor de VFA se encontraba en un valor

mayor al que indica la normativa, por lo cual se decidió reducir el porcentaje de asfalto hasta cumplir este requisito, y a la vez tratar que el valor resultante de los vacíos se encontrara cercano de 4%; el valor que cumplió ambas condiciones fue de 5.90% de porcentaje de asfalto. La Tabla 5-14 muestra las características obtenidas con este porcentaje de asfalto.

Tabla 5-14. Características obtenidas en la mezcla con muestra AP2.

Muestra	% óptimo de asfalto	Característica	Datos	Especificación
AP2	5.90	Peso Volumétrico (kg/m ³)	2300	-
		Vacíos (%)	4.21	3-5
		VAM (%)	16.78	14 (Mín)
		VFA (%)	75.00	65-75
		Estabilidad (kg)	938	816.50
		Flujo (mm)	2.00	2-3.5

La mezcla asfáltica con muestra APE presentó el mismo inconveniente que tuvo la mezcla con muestra AP2 además de presentar un flujo menor al requerido por normativa, por lo cual también se redujo el porcentaje de asfalto hasta encontrar un valor que permitiera tener valores de VFA y flujo dentro de normativa y a la vez un valor de vacíos cercanos al 4%. El porcentaje que cumplió con esas condiciones fue el de 6.14%. La tabla 5-15 muestra las características de la mezcla evaluada con el porcentaje óptimo obtenido.

Tabla 5-15. Características obtenidas en la mezcla con muestra APE.

Muestra	% óptimo de asfalto	Característica	Datos	Especificación
APE	6.14	Peso Volumétrico (kg/m ³)	2289	-
		Vacíos (%)	4.39	3-5
		VAM (%)	17.35	14 (Mín)
		VFA (%)	74.86	65-75
		Estabilidad (kg)	1030	816.50
		Flujo (mm)	2.00	2-3.5

De los resultados anteriores, se puede observar que el contenido óptimo de asfalto para las mezclas con muestra AP2 y APE son mayores en comparación con la mezcla que emplea muestra A. Si bien es cierto que se requiere una mayor cantidad de asfalto en las mezclas que tienen muestra AP2 y APE, se ve que existe un incremento en el valor de la estabilidad que soportan estas mezclas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El asfalto modificado con polímero SBS y Estabilizador es más propenso a perder fracción liviana (maltenos) durante el proceso de elaboración de la mezcla en comparación con el asfalto que es modificado solo con polímero SBS, debido a que el estabilizador es un aromático de peso molecular bajo que se adhiere a las resinas y aceites del asfalto natural, lo que incrementa la fracción liviana que es propensa a volatilizarse durante este proceso.

El estabilizador propuesto cumple con el objetivo de mantener ligados el asfalto y el polímero SBS, ya que aún después de haber sido sometidos los asfaltos modificados con estabilizador a volatilización y oxidación, mantienen sus grupos funcionales lo que sugiere que se sigue conservando la liga química.

El asfalto modificado con polímero SBS y estabilizador tiende a degradarse con el paso del tiempo una vez que ya se encuentra en servicio, debido a que el estabilizador contiene azufre que acelera el proceso de degradación.

Existen ligeras mejoras en el módulo de elasticidad en un asfalto modificado que contiene estabilizador en comparación con el que solo contiene polímero SBS.

El estabilizador formado por resina fenólica y azufre permite un módulo de elasticidad mayor en comparación con el asfalto modificado que solo contiene azufre como estabilizador.

El asfalto modificado con SBS y Estabilizador permite obtener asfaltos con un mejor grado de desempeño que el modificado sólo con SBS.

El estabilizador propuesto permite que el asfalto tenga mayor capacidad de recuperación de deformación permanente a altas temperaturas ante las sollicitaciones dadas por los vehículos, debido a que su factor de ahuellamiento es mayor en comparación con el asfalto modificado con SBS.

Además de poseer buena respuesta ante deformación permanente, el asfalto modificado con polímero y estabilizador presenta valores del factor de agrietamiento por fatiga menores a los que tiene un asfalto modificado de manera convencional.

La temperatura de mezclado y compactado requerida en la elaboración de las mezclas asfálticas es mayor en el asfalto modificado con estabilizador que en aquel que solo contiene polímero.

El proceso de envejecimiento a corto plazo en asfaltos modificados con polímero SBS, puede provocar la separación del polímero y el asfalto; ya que al realizarse la volatilización se pierde gran cantidad de fracción liviana que el polímero SBS absorbió cuando el asfalto fue modificado, por lo cual se dispersa del asfalto generando el proceso de segregación.

Las mezclas asfálticas modificadas tienden a tener un menor peso volumétrico en comparación con las mezclas realizadas con asfalto convencional.

La mezcla asfáltica modificada con polímero SBS y estabilizador es capaz de soportar mayor carga en comparación con la mezcla modificada con polímero SBS.

La mezcla modificada con polímero SBS y estabilizador presentan mayor capacidad de recuperación ante deformación permanente permitiendo reducir las rodaduras que se presentan en mezclas elaboradas con exceso de asfalto.

Se concluye que el estabilizador propuesto cumple la función de liga química entre el asfalto y el polímero SBS además de que no se presenta un decremento en las propiedades mecánicas del asfalto modificado.

Se recomienda realizar un estudio proponiendo varios porcentajes de estabilizador hasta encontrar el óptimo, buscando siempre que se cumpla la función primordial que es conseguir la unión química polímero-asfalto.

Del punto anterior se propone que se manejen diferentes proporciones tanto de la resina fenólica y del azufre buscando siempre que se mantenga la liga química, y tratando de reducir en la medida de lo posible la degradación que se da en el asfalto modificado con

polímero SBS y estabilizador una vez que se presenta la volatilización y oxidación del mismo, y finalmente realizar una evaluación de sus propiedades reológicas y mecánicas.

A fin de poder contar con un conocimiento más enfocado a la aplicación del estabilizador en mezclas de concreto asfáltico modificado, se recomienda se continúe con el siguiente paso de esta investigación que es el diseño de las mezclas asfálticas, aplicando la metodología SUPERPAVE a fin de obtener datos mucho más completos de cómo será el desempeño del estabilizador en una mezcla asfáltica.

Como recomendación final, proponer que la disposición de las muestras de asfalto una vez realizadas las muestras, se dispongan en pequeñas cantidades, a fin de que sea mucho más fácil su manipulación además de que se evita el sobrecalentamiento de la misma una y otra vez.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmedzade, P., M. Tigdemir, S.F. Kalyoncuoglu. 2007. *Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS*. Journal of Construction and Building Materials; 21: 626-633.
- Arias, L., P. Joscowicz, I. Rojas., C. Villegas, J. Escobar, C. Eleazar. 2008. Asfalto Venezolano modificado con polímero SBS. 4to Congreso Venezolano del Asfalto.
- Askeland, D. Phulé, P. 2004. Ciencia e ingeniería de los materiales. Cuarta edición. Ed. Thomson. Pag. 669.
- Asphalt Institute. 1993. Un manual básico de emulsiones asfálticas. 1era Edición en español. Traducción autorizada por Asphalt Institute a la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Bardesi, A. et al. 1999. *Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumen With Additives in Pavement Applications*. Technical Committee Flexible Roads (C8) World Road Association (PIARC).
- Becker Y, Méndez MP, Rodríguez Y. 2001. *Polymer modified asphalt*. Vis Technol; 9(1):39-50.
- Blanco, R., R. Rodríguez, M. García, y V. M. Castaño. 1995. *Morphology and Tensile Properties of Styrene-Butadiene Copolymer Reinforced Asphalt*. Journal of Applied Polymer Science. Pp. 56:57-64.
- Brule, B. 1996. *Polymer-modified asphalt cements used in the road construction industry: Basic principles*. Transportat Res Record. pp. 1535.
- Cavaliere, M. G. E. Diani, M.D. Dia. 1996. *Proceedings of 1st Euroasphalt and Eurobitume Congress*, Strasbourg, France.
- Chen, J., C.C. Huang. 2007. *Fundamental Characterization of SBS-Modified Asphalt Mixed With Sulfur*. Journal of Applied Polymer Science; 103:2817-2825.

- Cisneros, R. M. 1997. Modificación de asfaltos con polímeros sbs, negromex. Memorias del primer ciclo de seminarios sobre pavimentos flexibles.
- Collins, J. *Thermoplastic block copolymers for the enhancement of asphaltic binder in paving applications*. Presented at the Paving and Transportation Conference, Albuquerque, NM.
- Cortizo M.S., D.O. Larsen, H. Bianchetto, J.L. Alessandrini. 2004. *Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts*. Polymer Degradation and Stability;86(2):275-282.
- Creswell, C., C. Runquist, M.M. Campbell. 1979. Análisis Espectral de Compuestos Orgánicos. Ed. Diana, 1a Edición, México.
- Cruz, L. 2011. Huella dactilar del polímero en el asfalto. Avances en la identificación química. Revista Técnica Numero 14 Vías Terrestres. AMIVTAC. Pp. 4-6.
- Daquan, S. et al. 2006. *Storage stability of SBS-modified road asphalt: Preparation, morphology, and rheological properties*. Petroleum Science and Technology; 24:1067-1077.
- Delgado, J. 2006. Asfaltenos composición, agregación, precipitación. Universidad de los Andes. Cuaderno FIRP S369-A. Mérida-Venezuela.
- Dogan, M., E. Bayramli. 2009. *Effect of Polymer Additives and Process Temperature on the Physical Properties of Bitumen-Based Composites*. Journal of Applied Polymer Science; 113:2331-2338.
- Figuroa, I. A., F. A. Reyes, D. Hernández, C. Jiménez, y N. Bohórquez. 2007. Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. Revista Ingeniería e Investigación; 27(003):5-15.
- Flory, P.J. 1952. *Principles of Polymer Chemistry*. Cornell Univ. Press, Ithaca, N.Y.

- Fu H., L. Xie, D. Dou, L. Li, M. Yu, S. Yao. 2007. *Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer*. Construction and Building Materials; 21:1528-1533.
- Garnica, P., H. Delgado, J.A. Gómez, S. Alonso y H. A. Alarcón. 2004. Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica Núm. 246.
- Hardin, J. 1995. *Physical Properties of Asphalt Cement Binder*. ASTM STP 1241 (ASTM 04-012410-08), ASTM. Philadelphia.
- Harvey, D. 2002. Química Analítica Moderna. Depaw University. Ed. McGraw Hill. 1a Edición.
- Hernández-Padrón, G. 1998. Espectroscopía Infrarroja. Curso: Técnicas Modernas de Caracterización en la Ciencia y Tecnología de Suelos Arcillosos. Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.
- Hernández-Padrón, G. R. Lima, R. Nava, M. García-Garduño, V. Castaño. 2002. *Preparation and Characterization of SiO₂-Functionalized Resin Hybrid Materials*. Advances in Polymer Technology; 2(2):116-124.
- Hernández-Padrón, G., F. Rojas, M. García-Garduño, M. A. Canseco, V. M. Castaño. 2003. *Development of Hybrid Materials Consisting of SiO₂ Microparticles Embedded in Phenolic-Formaldehydic Resin Polymer Matrices*. Journal of Materials Science & Engineering; 355(1-2):338-347.
- Hernández-Padrón, G. 2012. Síntesis de resina fenólica tipo Novolac. UNAM Campus Juriquilla, Querétaro.
- Hernández, G. 2006. Importancia de la calidad de asfaltos modificados en la aplicación de pavimentos y uso de copolímeros de estireno-butadieno como polímeros modificadores. Revista Técnica Numero 7 Asfáltica. Asociación Mexicana del Asfalto. Pp. 35-40.

- Hernández, G. y Alonso, L. 2006. Estudio de modificación de asfalto usando un SBS tribloque secuencial. Dynasol Elastómeros S.A.de C.V. Revista Técnica Numero 6 Asfáltica. Asociación Mexicana del Asfalto. Pp. 28-35.
- Hernández, G., E. Medina, R. Sanchez, A. Mendoza. 2006. *Thermomechanical and Rheological Asphalt Modification Using Styrene-Butadiene-Triblock Copolymers With Different Microstructure*. Journal of Energy & Fuels; 20(6):2623-2626.
- IMT. 2006. Instituto Mexicano del Transporte. N.CMT-4.05-002/06. Libro: Características de los Materiales. Materiales para Pavimentos. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. Calidad de Materiales Asfálticos Modificados.
- Jasso, M. D. Bakos, J. Stastna, L. Zanzotto. 2012. *Conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite*. Applied Clay Science;70:37-44.
- King, G., H. King, R.D. Pavlovich, A.L. Epps and P. Kandhal. 1999. *Additives in asphalt*. J. Association of Asphalt Paving Technologist, 75th Historical Review and Index of Journals 1975-1999. 68A. 32-39.
- Komatsubara, T. 1993. *Polymer Materials and Technology. Part I: Introduction to Thermosetting Resins*; 2:6.
- Kraton 1987. *Thermoplastic Rubber in Asphalt Products*. Technical Bulletin SC:57-84, Shell Chem. Co.
- Lesueur, D. J.F. Gerard, P. Claudy, J.F. Letofe, J.P. Planche, D.J. Martin. 1996. *A Structure-Related Model to Describe Asphalt Linear Vicoelasticity*. Journal of Rheology; 40:813-836.
- Liewald, W., R.S. Porzio. 2007. Mejoramiento de asfalto con SBR: ejemplo de mezcla en caliente en Ecuador. BASF The Chemical Company. Revista Técnica Numero 9 Asfáltica. Asociación Mexicana del Asfalto. Pp. 22-35.

- Limon, R., J. Miller, R. Castruita. 1996. Aprovechamiento y tendencias de desarrollo de los asfaltos en México. XII Reunión Nacional de Vías Terrestres. S.L.P.,S.L.P., México.
- Lu, X., U. Isacson. 1997. *Rheological Characterization of Styrene-Butadiene-Styrene Copolymer Modified Bitumens*. Journal of Construction and Building Materials;2:23-32.
- Lu, X., U. Isacson, J. Eklab. 1999. *Phase Separation of SBS Polymer Modified Bitumens*. Journal of Materials in Civil Engineering; 2(1):51-57.
- Magaña del Rio, G., J. Pierre. 1996. Asfalto polimerizado, sus usos y beneficios. XII Reunión Nacional de Vías Terrestres. S.L.P.,S.L.P., México
- Montejo, A. 2006. Ingeniería de Pavimentos, Evaluación Estructural, Obras de Mejoramiento y Nuevas Tecnologías. Vol. 2. 3a Ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Olivera, F. 2004. Estructuración de vías terrestres. Ed. cecsa. Pp. 186
- Ouyang C., S. Wang, Y. Zhang, Y. ZhanG. 2005. *Preparation and properties of styrene-butadiene-styrene copolymer/kaolinite clay compound and asphalt modified with the compound*. Polymer Degradation and Stability;87:309-317.
- Polacco G., A. Muscente, D. Biondi, S. Santini. 2006. *Effect of composition on the properties of SEBS modified asphalts*. European Polymer Journal;42:1113-1121.
- Polacco G, Kriz P, Filippi S, Stastna J, Biondi D, Zanzotto L. Rheological properties of asphalt/SBS/Clay blends. European Polymer Journal 2008;44:3512-3521.
- Protocolo AMAAC PA-MA 01/2008. 2008. Diseño de Mezclas Asfálticas de Granulometría Densa de Alto Desempeño.
- Rodríguez, T. R., V. M. Castaño, y M. Martínez. 2001a. Emulsiones Asfálticas. Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico Número 23.

- Rodríguez, T. R., V. M. Castaño, M. Martínez, y G. Hernández. 2001b. Desarrollo de aditivos para asfaltos modificados con bajos contenidos de hule. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica Núm. 160.
- Sánchez, D, 1987. Materiales asfálticos utilizados en la pavimentación. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura. Dirección General de Servicios Tecnicos.
- Sanz, J. 1994. Innovaciones en emulsiones asfálticas. XI Reunión Nacional de Vías Terrestres. Morelia, Michoacán, México.
- Sing, M. 2012. *Evaluating Physical, Rheological and Chemical Properties of Modified Bitumen*. Journal of Industrial Engineering and Management Science; 2(4):168-173.
- Skoog, D., D.M. West, F.J. Holler, S.R. Crouch. 2001. Química Analítica. Ed. McGraw Hill. 7a Edición.
- Stockmayer, U.H. 1944. *J. Chem. Phys.* u,45(1943); 12,125.
- SUPERPAVE.1994. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de Superpave. Caracas, Venezuela. Ed. CIC-LEMIT, IPC.
- Terrel, R., J. Walter. 1986. *Modified Asphalt pavement materials: The European experience*. J. Assoc. Asphalt Paving Technology. pp. 55-482.
- Thompson, D.C., A.J.Hoiberg AJ. 1979. *Bituminous materials: asphalt tars and pitches*. Robert Krieger Publishing Co.
- Wright, P., K. Dixon. 2011. Ingeniería de carreteras. Ed.Limusa Wiley. Pp. 598.
- Xiang L., J. Cheng, G. Que. 2009. *Microstructure and performance pf crumb rubber modified asphalt*. Construction and Building Materials;23:3586-3590.
- Yildirim, Y. 2005. *Polymer modified asphalt binders*. Journal of Construction and Building Materials. Pp. 66-72.

Zhang F., J. Yu, S. Wu. 2010. *Effect of ageing on rheological properties of storage-stable/sulfur-modified asphalts*. Journal of Hazardous Materials;182:507-517.

Zhang, F., C. Hu. 2013. *The research for SBS and SBR compound modified asphalts with polyphosphoric acid and sulfur*. Journal of Construction and Building Materials;43:461-468.

8. ANEXOS

Anexo 1. Geometría de los especímenes ensayados en la prueba de tracción para plásticos.

Muestra	Número de espécimen	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
AP2	1	18.10	4.82	5.97
	2	17.98	4.84	6.21
	3	17.25	4.42	5.34
	4	17.32	4.67	5.46
AP3	1	17.27	4.83	5.29
	2	17.55	4.53	4.71
	3	16.92	5.43	5.15
	4	17.01	5.48	5.29
APE	1	16.97	4.89	6.50
	2	16.41	4.66	4.98
	3	17.42	4.75	5.15
	4	17.19	5.08	4.85
APA	1	17.10	4.26	4.67
	2	17.06	4.37	5.04
	3	17.93	4.50	5.24
	4	16.94	4.53	5.79

Anexo 2. Requisitos de calidad para cementos asfálticos Grado PG (N-CMT-4-05-004/08).

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	≥22	≥28	≥34	≥40	≥22	≥28	≥34	≥40	≥22	≥28	≥34	≥22	≥28	≥34	≥22	≥28	≥34
Asfalto Original																	
Punto de inflamación Cleveland ^[1] , °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135°C ^[1] ; Pa-s(P ^[2]), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^{[2][3]} , kPa, mínimo	1																
- Temperatura de prueba @ 10rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno ^[1]																	
Pérdida por calentamiento; % máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G*/senδ) ^[2] ; kPa, mínimo	2.2																
- Temperatura de prueba @ 10rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vasija de precisión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C																	
En climas normales	100				100				100			100			100		
En climas desérticos	100				100				100			100			100		
Índice de endurecimiento físico ^[4] , máximo	Reportar																
Rigidización (G*senδ) ^[1] ; kPa, máxima	5000																
- Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión s(t) ^{[1][5]} ; Mpa, máximo (m=0.3mín)	300																
- Temperatura de prueba @ 60s, °C	-12	-18	-34	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

[1] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

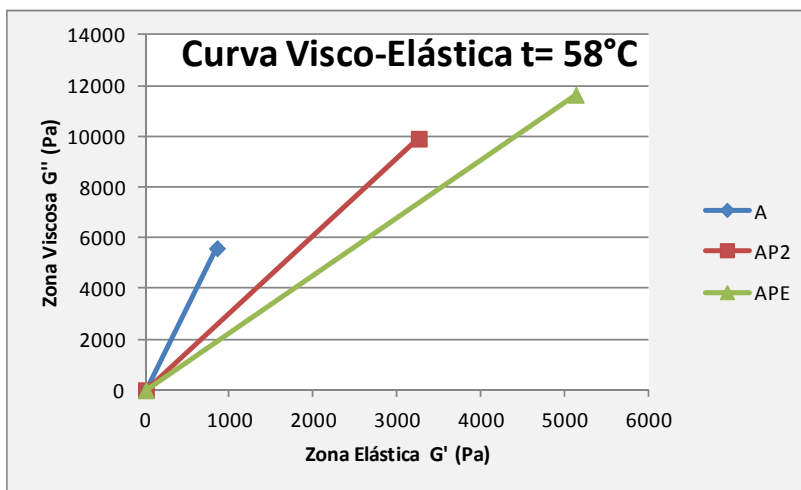
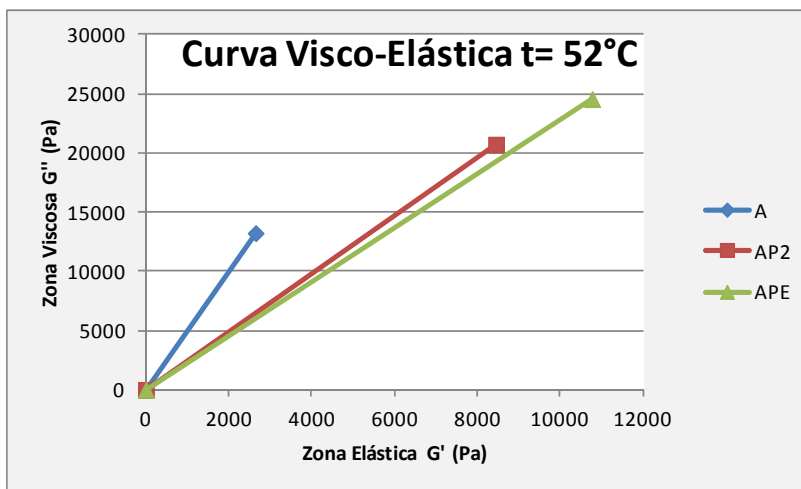
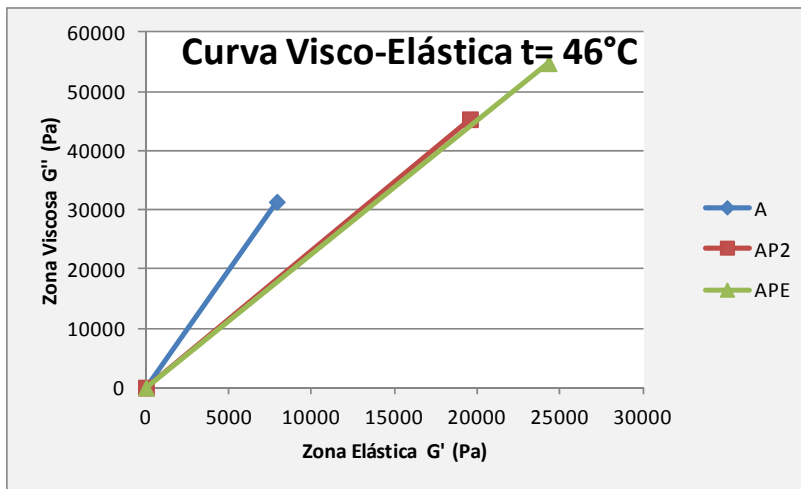
[2] Poises

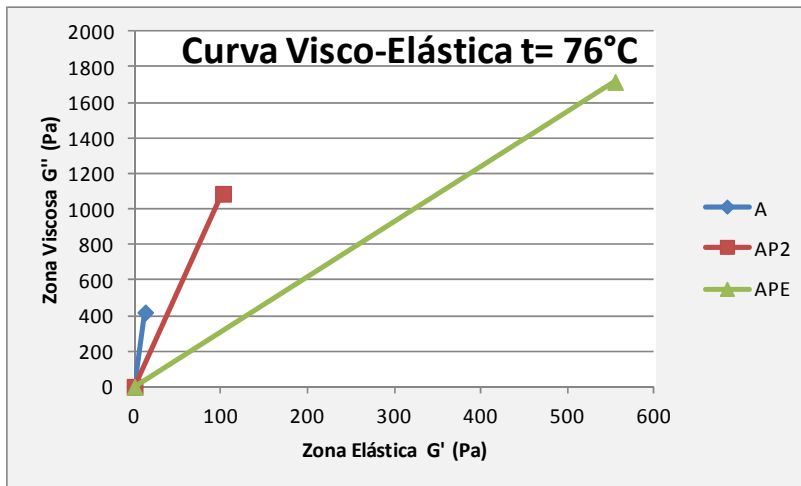
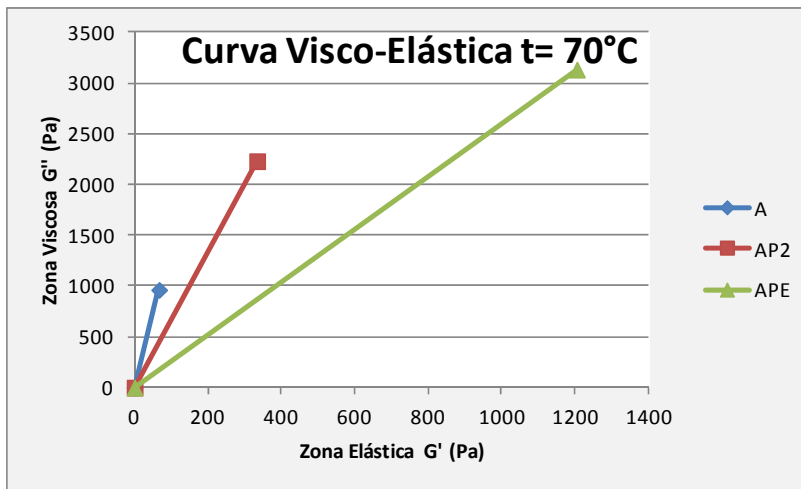
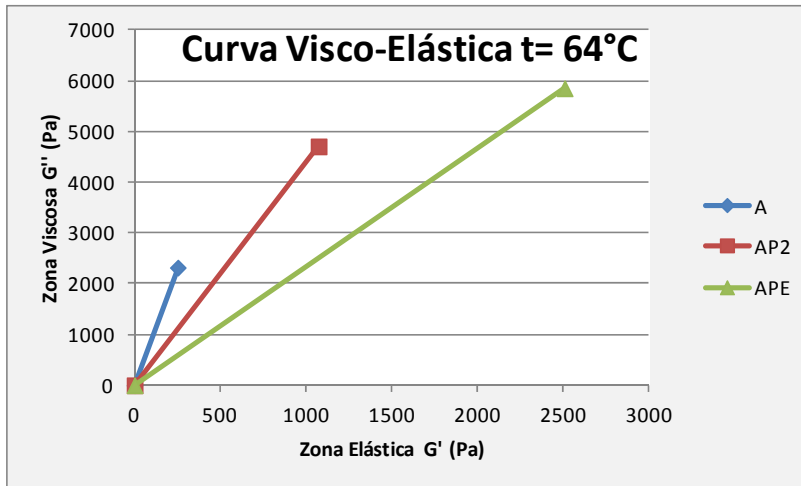
[3] Para control de calidad de producción de asfaltos normales sin modificar, cuando sean líquido newtoniano, la viscosidad dinámica del cemento asfáltico original puede sustituir al módulo de corte dinámico G*/senδ, a las temperaturas de prueba.

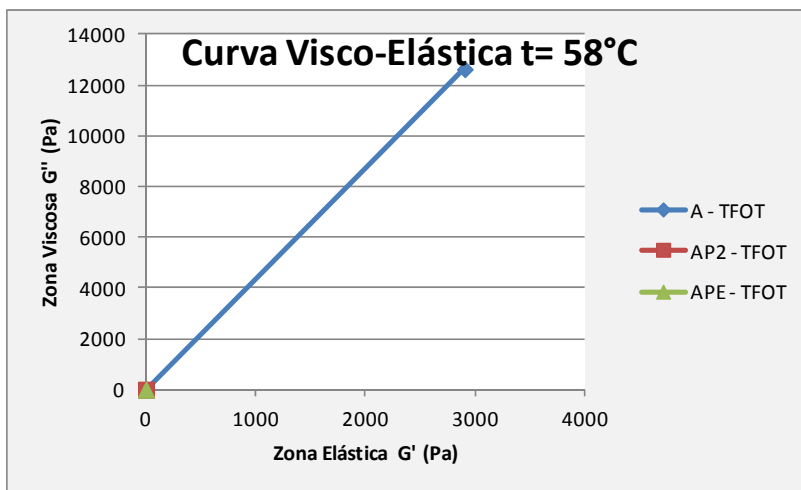
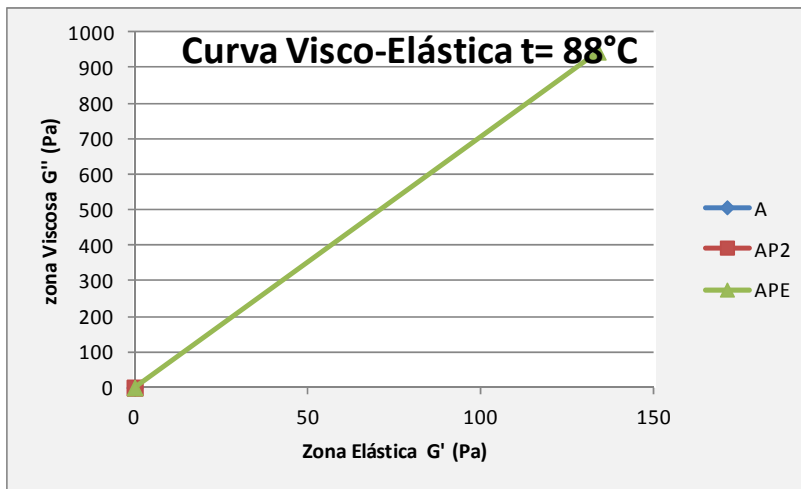
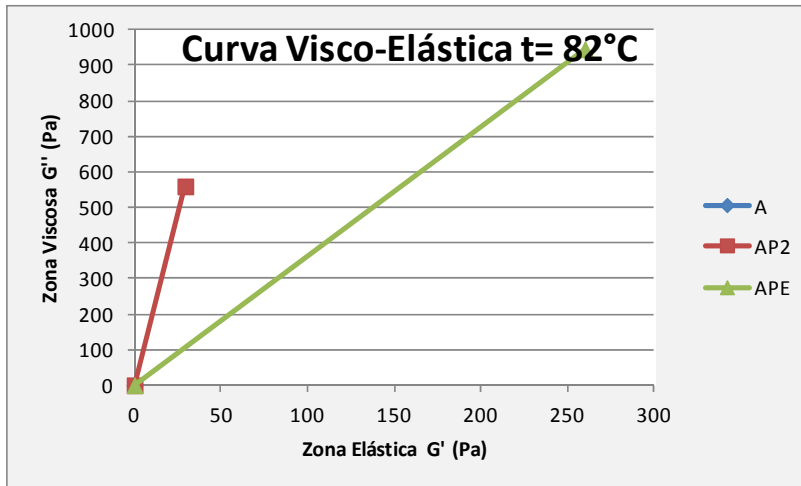
[4] El endurecimiento físico del asfalto es desarrollado de acuerdo con el número de muestras de viga, conforme a la determinación de la rigidez de flexión, mediante el Reómetro de flexión de viga BBR, excepto que las condiciones de tiempo se extiendan a 2 h y el valor m sea reportado únicamente para propósitos de información.

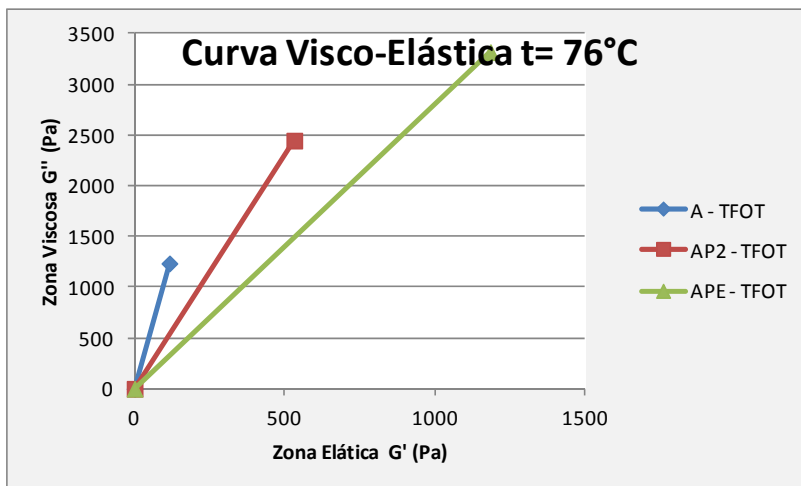
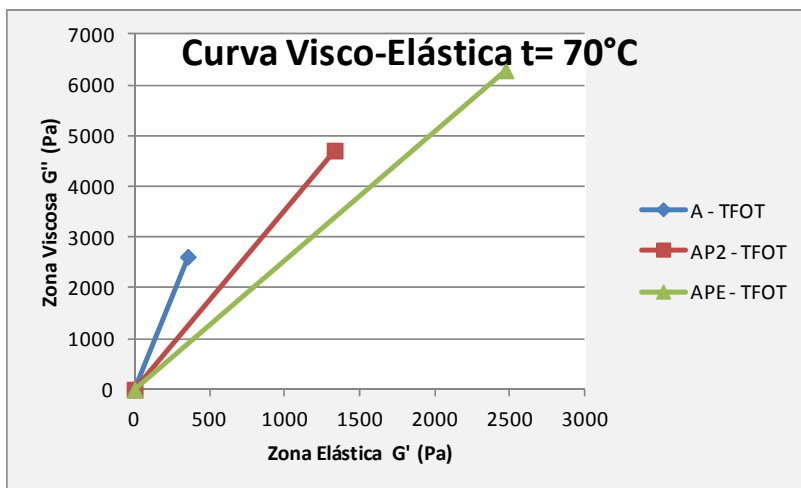
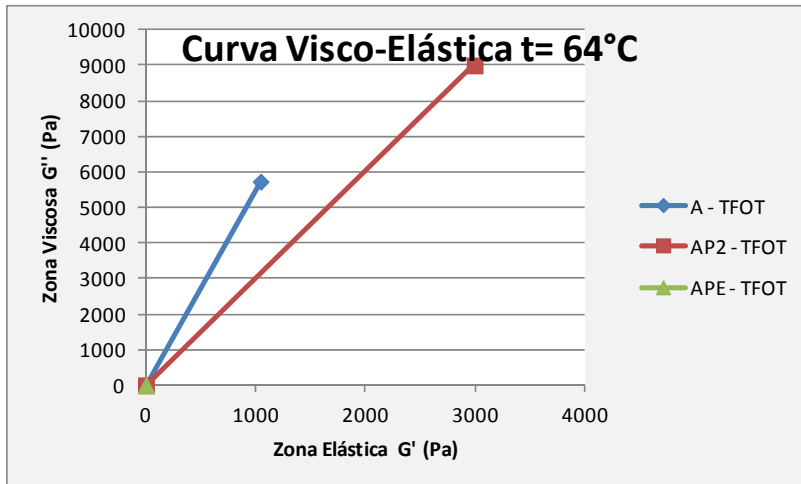
[5] Si la rigidez de flexión es menor de 300 Mpa, no es necesario la prueba de tensión directa. Si la rigidez de flexión resulta entre 300 y 600 MPa, se requiere que la deformación a la ruptura en la prueba de tensión directa cumpla también con lo indicado en esta Tabla. El valor de m requerido será satisfactorio en ambos casos.

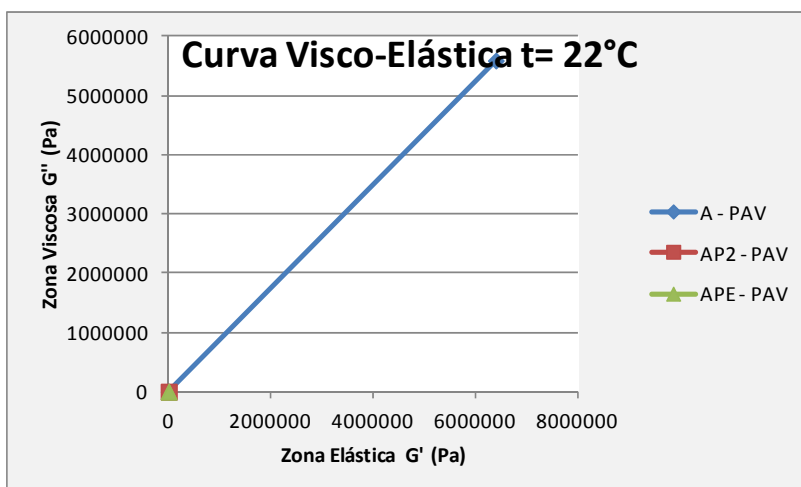
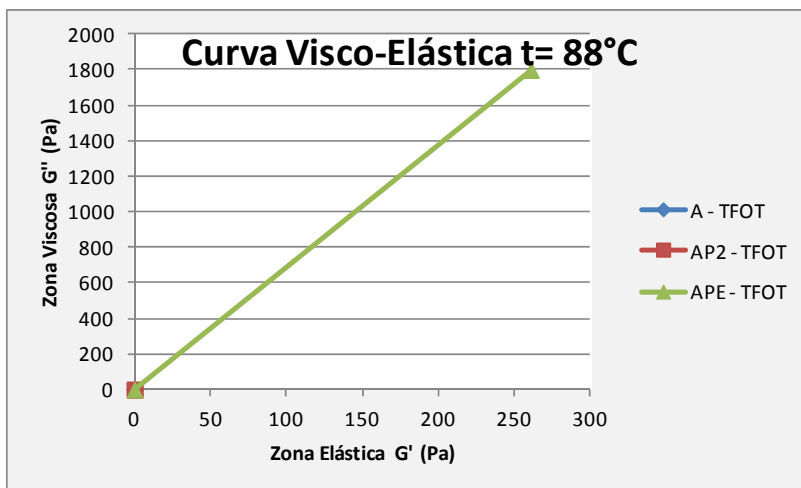
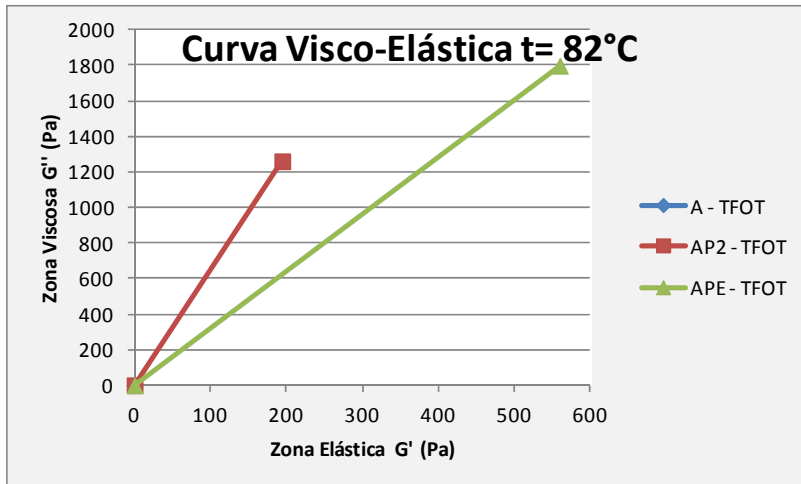
Anexo 3. Gráficas de la zona visco-elástica de las muestra ensayadas en el reómetro.

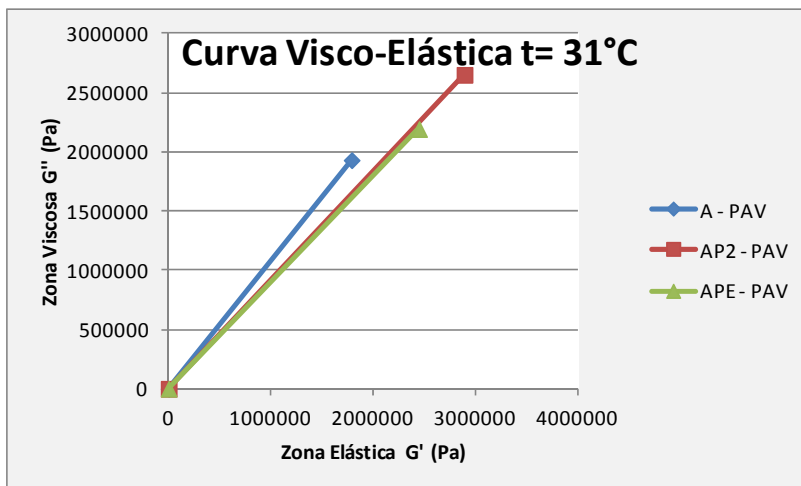
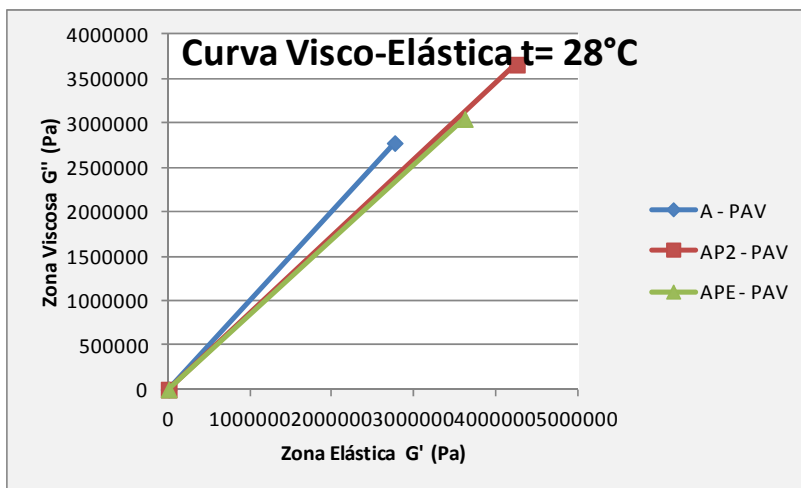
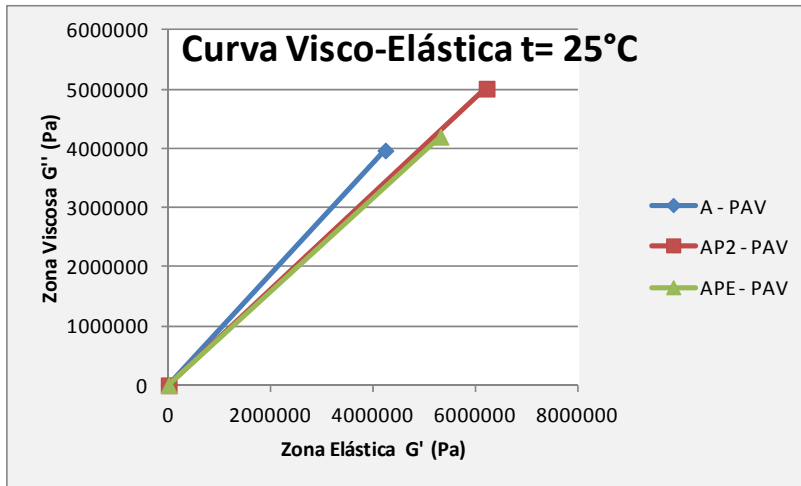


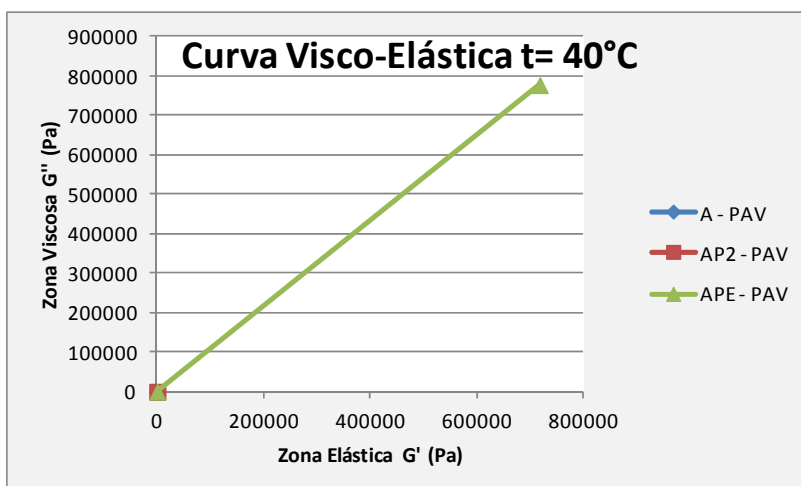
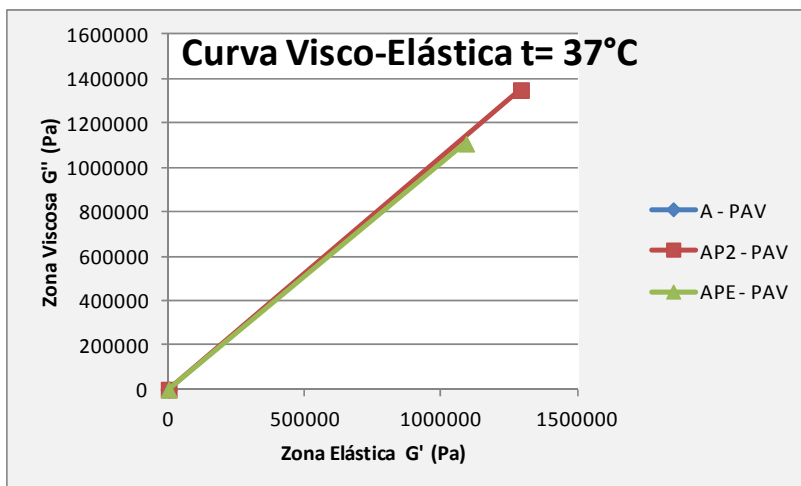
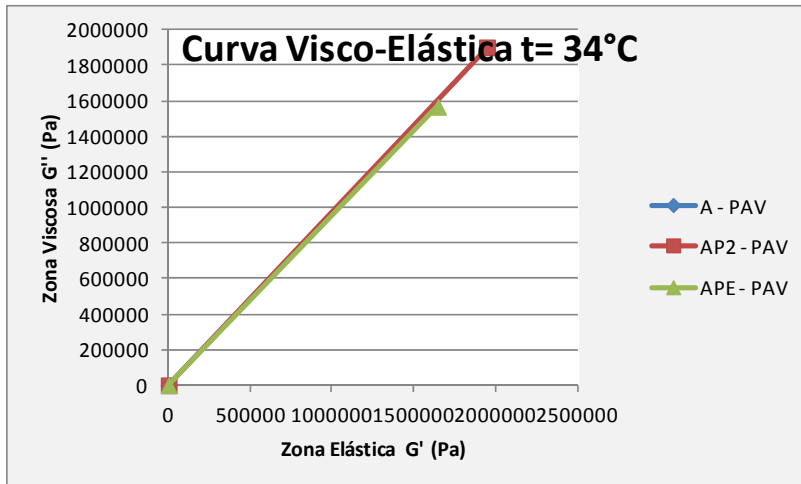








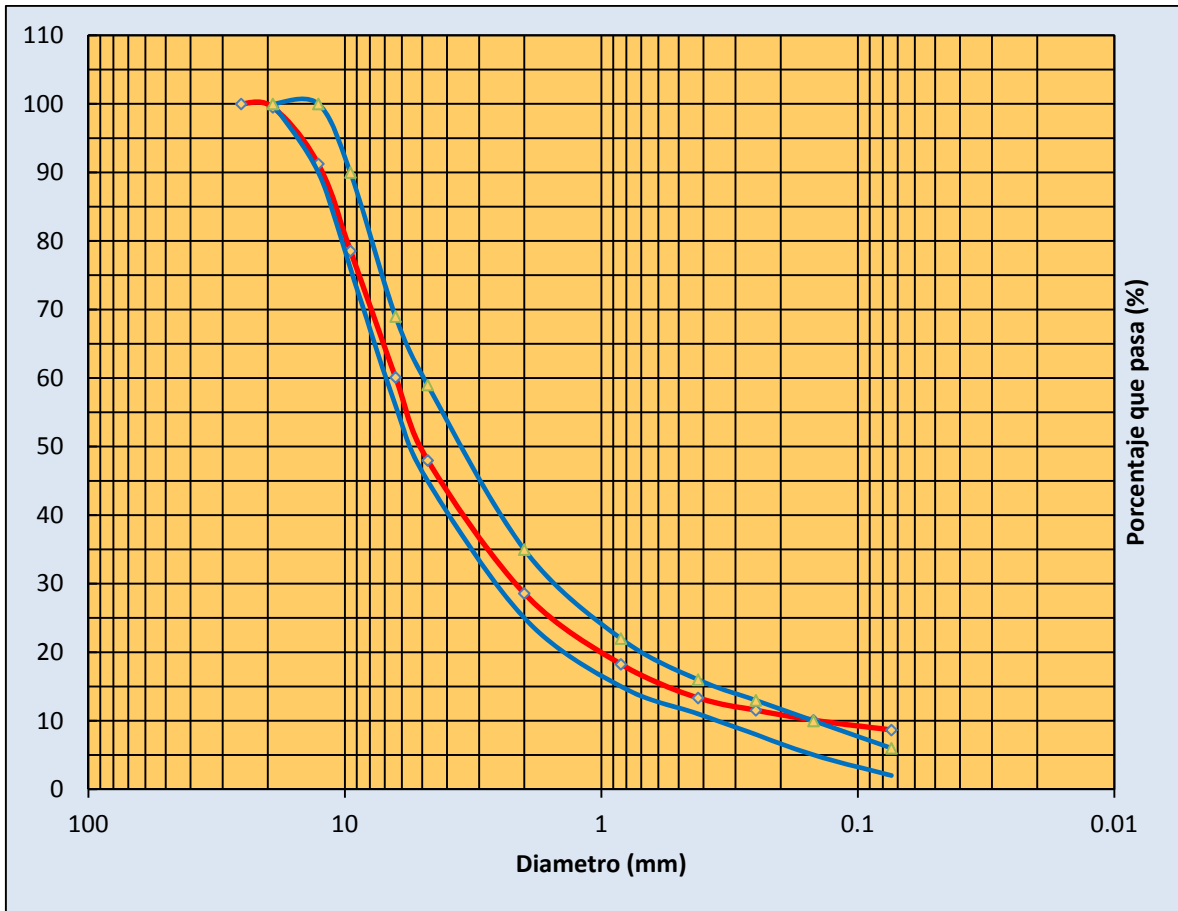




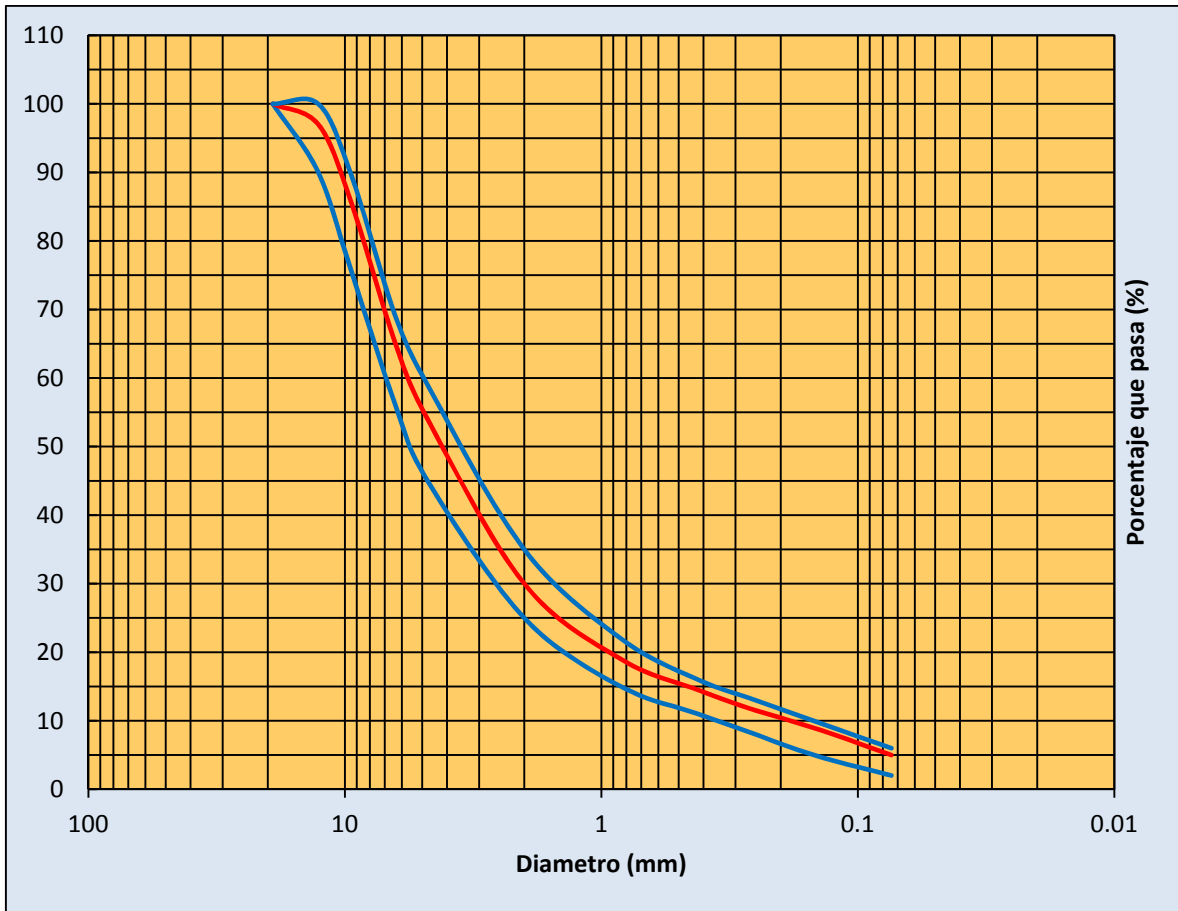
Anexo 4. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (para cualquier valor de ΣL) (N-CMT-4-04/08).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9.5 (3/8)	12.5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37.5 (1 1/2)
		Porcentaje que pasa				
50	2"	-	-	-	-	100
37.5	1 1/2"	-	-	-	100	90-100
25	1"	-	-	100	90-100	74-90
19	3/4"	-	100	90-100	79-90	62-79
12.5	1/2"	100	90-100	72-90	58-71	46-60
9.5	3/8"	90-100	76-90	60-76	47-60	39-50
6.3	1/4"	70-81	56-69	44-57	36-46	30-39
4.75	N° 4	56-69	45-59	37-48	30-39	25-34
2	N° 10	28-42	25-35	20-29	17-24	13-21
0.85	N° 20	18-27	15-22	12-19	9-16	6-13
0.425	N° 40	13-20	11-16	8-14	5-11	3-9
0.25	N° 60	10-15	8-13	6-11	4-9	2-7
0.15	N° 100	6-12	5-10	4-8	2-7	1-5
0.075	N° 200	2-7	2-6	2-5	1-4	0-3

Anexo 5. Granulometría original del material pétreo empleado en las mezclas asfálticas.



Anexo 6. Granulometría empleada en las mezclas asfálticas.



Anexo 7. Requisitos de calidad para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall (N-CMT-4-05-003/08).

Características	Número de ejes equivalentes de diseño ΣL ^[1]	
	$\Sigma L \leq 10^6$	$10^6 < \Sigma L \leq 10^7$ ^[2]
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta	50	75
Estabilidad; N (lb _f), mínimo	5340 (1200)	8000 (1800)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2-4 (8-18)	2-3.5 (8-14)
Vacios en la mezcla asfáltica (VMC); %	3-5	3-5
Vacios ocupados por el asfalto (VFA); %	65-78	65-75

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8.2 t (ESAL), esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Para tránsitos mayores de 10⁷ ejes equivalentes de 8.2 t, se requiere un diseño especial de la mezcla.

Anexo 8. Vacíos en el agregado mineral (VAM) para mezclas asfálticas de granulometría densa, diseñadas mediante el método Marshall (N-CMT-4-05-003/08).

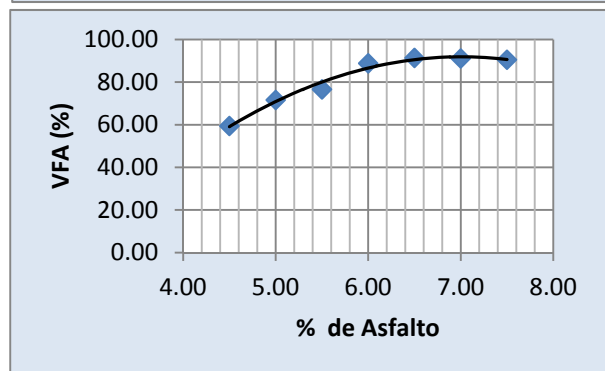
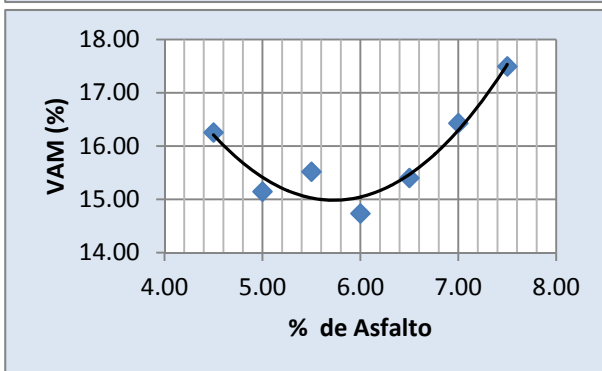
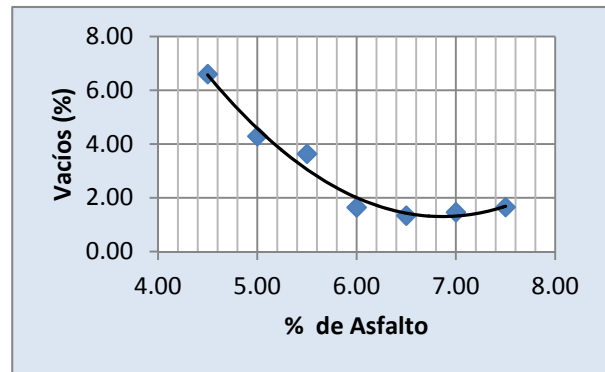
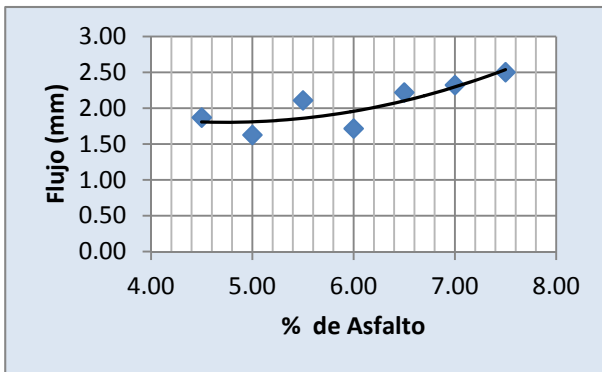
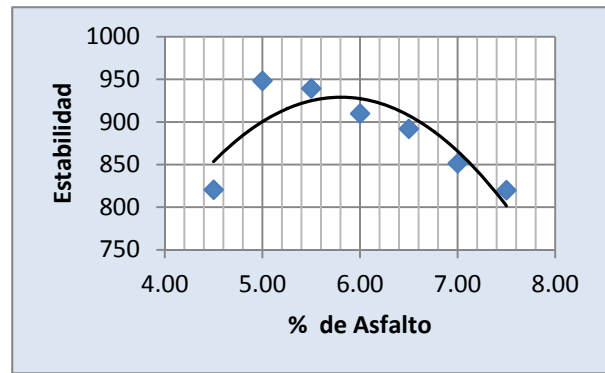
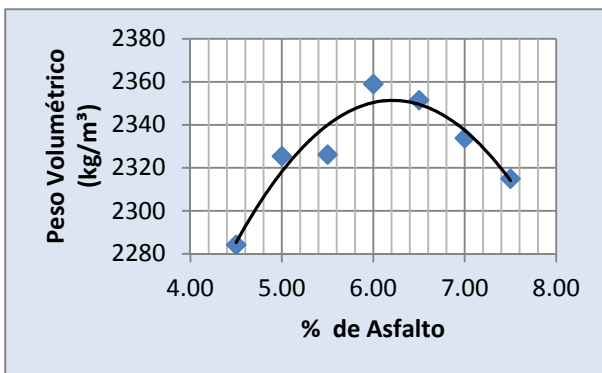
Tamaño nominal del material pétreo utilizado en la mezcla ^[1]		Vacíos en la mezcla asfáltica (VMC) de diseño %		
		3	4	5
mm	Designación	Vacíos en el agregado mineral (VAM) %, mínimo		
9.5	3/8"	14	15	16
12.5	1/2"	13	14	15
19	3/4"	12	13	14
25	1"	11	12	13
37.5	1 1/2"	10	11	12

[1] El tamaño nominal corresponde al indicado en la cláusula D. de la Norma N-CMT-4-04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*, para el tipo y granulometría del material pétreo utilizado en la mezcla.

Anexo 9. Resultados del Ensaye Marshall.

MUESTRA: A

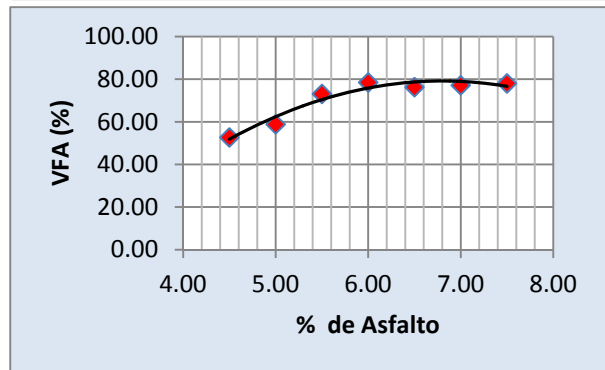
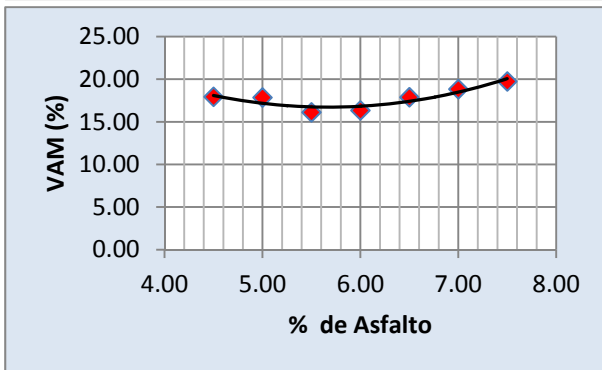
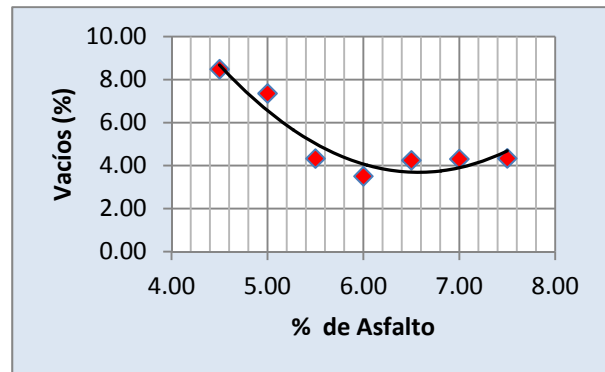
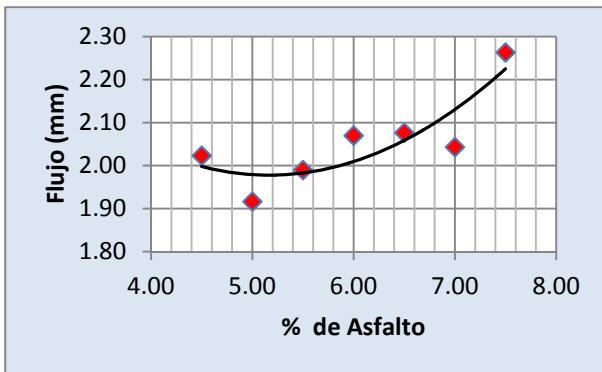
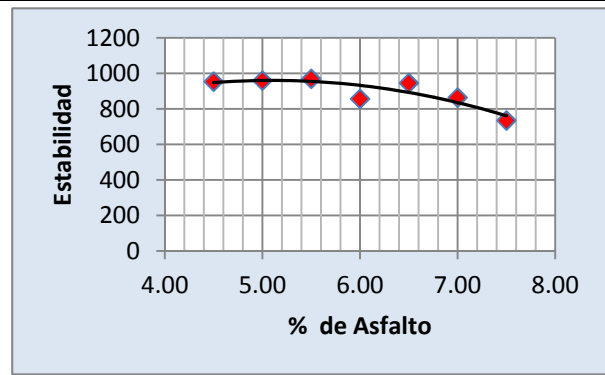
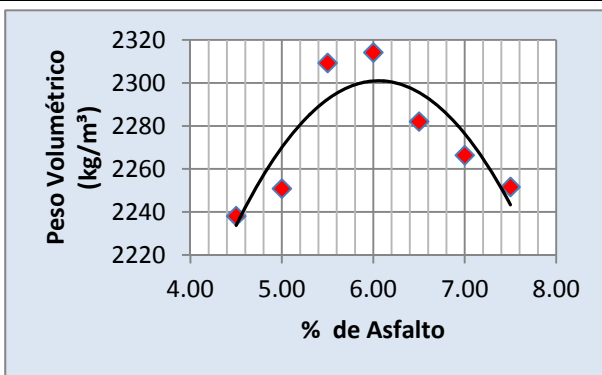
Contenido de C.A. (%)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Vacios (%)	VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
4.50	2284	6.60	16.26	59.45	820	1.87
5.00	2325	4.29	15.15	71.66	948	1.63
5.50	2326	3.64	15.52	76.63	939	2.11
6.00	2359	1.64	14.73	88.86	910	1.72
6.50	2351	1.34	15.40	91.41	892	2.22
7.00	2334	1.47	16.43	91.16	851	2.32
7.50	2315	1.66	17.50	90.55	820	2.50



Muestra	% Ópt Asf	Característica	Datos	Especificación
A	5.17	Peso Esp (kg/m ³)	2327	
		Vacios (%)	4.00	3-5
		VAM (%)	15.23	14 (Mín)
		VFA (%)	74.33	65-75
		Estabilidad (kg)	911	816.50
		Flujo (mm)	1.82	2-3.5

MUESTRA: AP2

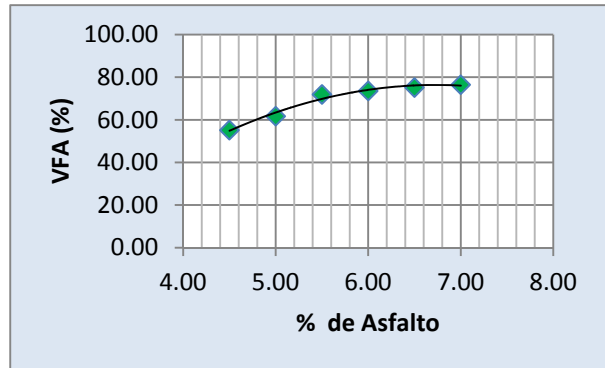
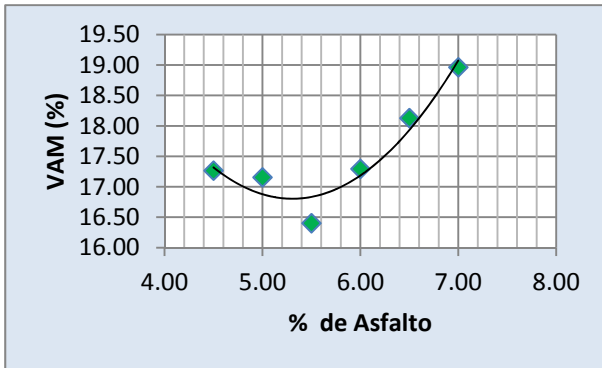
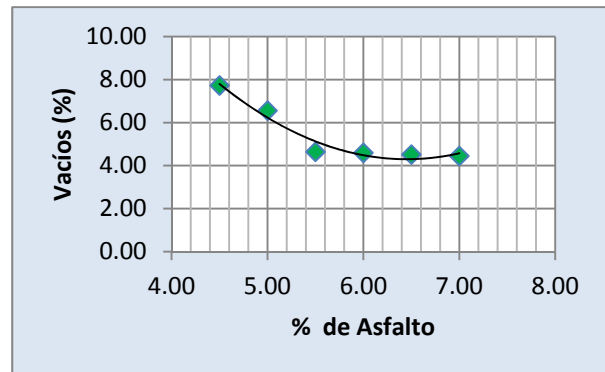
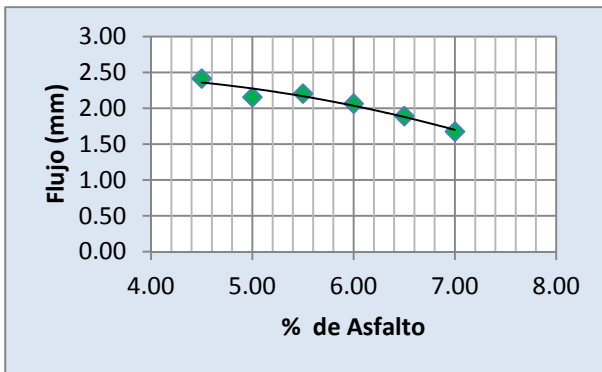
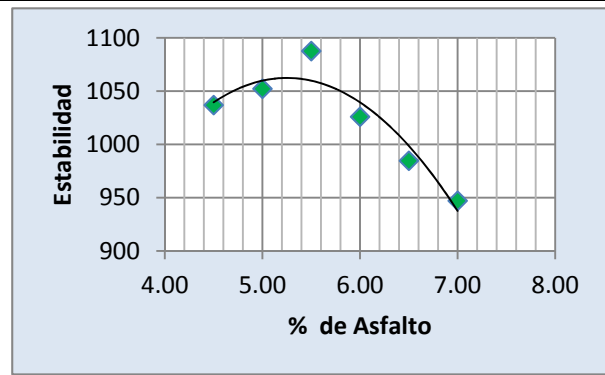
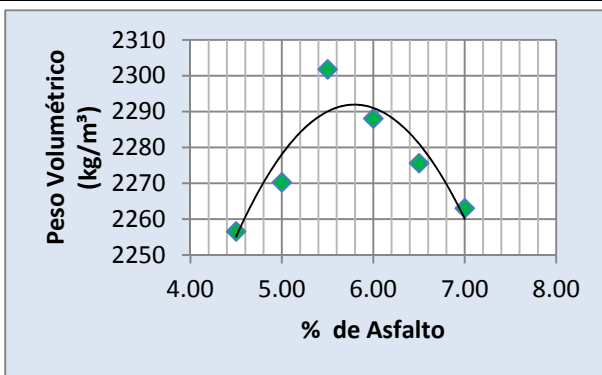
Contenido de C.A. (%)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Vacios (%)	VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
4.50	2238	8.49	17.95	52.73	954	2.02
5.00	2251	7.36	17.87	58.89	959	1.92
5.50	2309	4.34	16.13	73.14	969	1.99
6.00	2314	3.51	16.35	78.54	857	2.07
6.50	2282	4.25	17.90	76.32	946	2.08
7.00	2266	4.31	18.84	77.20	864	2.04
7.50	2252	4.34	19.75	78.09	735	2.26



Muestra	% Ópt Asf	Característica	Datos	Especificación
AP2	5.90	Peso Esp (kg/m ³)	2300	
		Vacios (%)	4.21	3-5
		VAM (%)	16.78	14 (Mín)
		VFA (%)	75.00	65-75
		Estabilidad (kg)	938	816.50
		Flujo (mm)	2.00	2-3.5

MUESTRA: APE

Contenido de C.A. (%)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Vacíos (%)	VAM (%)	VFA (%)	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)
4.50	2257	7.73	17.27	55.23	1037	2.42
5.00	2270	6.56	17.16	61.76	1052	2.16
5.50	2302	4.65	16.40	71.97	1088	2.21
6.00	2288	4.60	17.30	73.63	1026	2.07
6.50	2276	4.52	18.13	75.21	985	1.89
7.00	2263	4.45	18.96	76.52	947	1.68



Muestra	% Ópt Asf	Característica	Datos	Especificación
APE	6.14	Peso Esp (kg/m ³)	2289	
		Vacios (%)	4.39	3-5
		VAM (%)	17.35	14 (Mín)
		VFA (%)	74.86	65-75
		Estabilidad (kg)	1030	816.50
		Flujo (mm)	2.00	2-3.5