



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO.**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUIMICA**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS PROFESIONAL

***“Reciclaje de residuos sólidos mediante su incorporación a cementos
asfálticos para pavimentos flexibles”***

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

ING. JUDITH ALEJANDRA VELÁZQUEZ PÉREZ

ASESOR:

DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA

COASESOR:

DR. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, OCTUBRE 2018.



1. Resumen

Durante los últimos años la producción de residuos sólidos ha crecido significativamente, originando un sin número de problemas al ambiente y a la salud. Con el fin de proponer alternativas para hacer frente a estos problemas, este trabajo presenta el reciclado de residuos sólidos mediante su incorporación al cemento asfáltico para su uso en pavimentos flexibles, los residuos estudiados fueron hule molido de neumático, tereftalato de polietileno y poliestireno expandido, presentando el mejor desempeño para algunos ensayos el asfalto adicionado con Caucho molido y Poliestireno expandido.

Palabras clave: residuos, contaminación, reciclaje, asfalto, adición.

2. Abstract

During the last few years the production of solid waste has grown significantly, causing a number of problems to the environment and health. With the purpose of proposing alternatives to face these problems, this research presents the recycling of solid waste by means of its incorporation to the asphaltic cement for its use in flexible pavement, the studied wastes were ground rubber of tire, tereftalato of polyethylene and expanded polystyrene, presenting the best performance for some testing the asphalt added with Rubber and Expanded Polystyrene.

Keywords: waste, pollution, recycling, asphalt, addition.



Dedicatoria

A Dios, por regalarme la vida y por acompañarme paso a paso durante toda la vida.....

A mis padres Maurilio Velázquez Solorio, y Bertha Pérez García por ser la base de mi formación, por darme ejemplo de trabajo, entereza, por su tesón de salir y echarnos adelante, por ser la base en mi vida, por haberme dado la oportunidad de formar parte de una magnífica familia.

A mis Hermanos Fabián, Blanca, Maurilio, Bertha, Esmeralda y Daniel por ser amigos y compañeros incondicionales en esta travesía de la vida, por llenar la casa de alegría con sus ocurrencias y travесuras por hacer más livianas las adversidades.

A mi Amore por su Amor incondicional.

A Dios por haberme dado la bendición más grande...

Ellos...

Gracias por todo su Amor...



Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Química y a la Facultad de Biología de la U.M.S.N.H., por la formación académica integral recibida por parte de los profesores que laboran en el programa de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

Al CONACYT: Por el valioso apoyo económico para la realización del presente trabajo.

Al Instituto Mexicano del Transporte por su invaluable ayuda en el desarrollo de esta investigación.

A mis asesores y sinodales Elia Mercedes Alonso, Hugo Luis Chávez, José María Ponce, Luis Ochoa y Otoniel Buenrostro por haberme dirigido, guiado durante el desarrollo de esta investigación.

A todas las personas que contribuyeron para la realización de este trabajo.



3. Contenido

1. Resumen.....	2
2. Abstract.....	2
3. Contenido.....	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas.....	8
4. Introducción.....	9
5. Marco teórico	10
5.1 Desarrollo sostenible.....	10
5.2 Clasificación de los residuos	10
5.3 Generación de residuos	11
5.4 Gestión integral, prevención y control de los residuos sólidos.....	15
5.5 Problemática en México.....	26
5.6 Residuos en estudio.....	28
5.6.1 Poliestireno.....	28
5.6.2 Tereftalato de polietileno	31
5.6.3 Neumáticos.....	32
5.6.4 Uso actual de residuos de estudio.....	32
5.7 Problemas típicos de un pavimento asfáltico	33
5.7.1 Deformación permanente	33
5.7.2 Agrietamiento por fatiga.....	34



5.7.3	Agrietamiento por baja temperatura	34
5.8	Asfalto	34
5.9	Asfalto modificado	36
5.10	Clasificación de los Cementos Asfálticos.....	36
5.11	Propiedades reológicas del asfalto	37
5.12	Caracterización por grado PG.....	41
6.	Antecedentes	42
7.	Planteamiento del problema.....	44
8.	Hipótesis	45
9.	Objetivo	45
10.	Alcances	46
11.	Metodología.....	46
12.	Resultados y discusiones	48
12.1	Viscosidad rotacional	48
12.2	Densidad, método del picnómetro	49
12.3	Punto de reblandecimiento.	50
12.4	Recuperación elástica por torsión.....	51
12.5	Ensayo de película delgada en horno rotatorio en cementos asfálticos. 52	
12.6	Ensayo de reómetro de corte dinámico en condición original (DSR)	53
12.7	Ensayo de reómetro de corte dinámico después de RTFO	56
12.8	Ensayo de reómetro de corte dinámico después de después de PAV .	58
12.9	Determinación de la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el	



reómetro de viga a flexión (BBR).....	60
12.10 Prueba de Reología en el ligante adicionado con ETONIS 930,850 y con 6% de Caucho molido Retenido en la malla #.100.	62
12.11 Separación del polímero mediante punto de reblandecimiento en ligantes modificados.	64
13. Conclusiones.....	74
Bibliografía	75

Índice de figuras

<i>Figura 1</i> Producción per-cápita en el mundo (%).....	13
<i>Figura 2</i> Disposición final y reciclaje de residuos sólidos urbanos por tipo de tiradero a nivel nacional en el año 2013 (%) (INEGI)	14
<i>Figura 3</i> Generación de los residuos sólidos urbanos (%) por tipo de residuo a nivel nacional en el año 2013 (INEGI).....	15
<i>Figura 4</i> Orden por prioridad de la jerarquía de residuos.....	18
<i>Figura 5</i> Plan integrado de manejo de residuos sólidos.....	19
<i>Figura 6</i> Principios que constituyen la gestión integral de los residuos sólidos en el país.	20
<i>Figura 7</i> México, generación anual de RSU por tipo de residuos 1992-2012	27
<i>Figura 8</i> Símbolo Internacional del Reciclaje	29
<i>Figura 9</i> Forma de identificación de los plásticos.....	30
<i>Figura 10</i> Comportamiento elástico y viscoso.....	38
<i>Figura 11</i> Importancia de δ (ángulo de fase) en la reología	39
<i>Figura 12</i> Respuesta esfuerzo–deformación de un material visco elástico.....	40
<i>Figura 13</i> Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG.	42
<i>Figura 14</i> Viscosidad rotacional (ASTM D4402-15) en Ekbe, PP 2.5, EM, H 6 y	



SBS	49
<i>Figura 15</i> Densidad de materiales s por el método del picnómetro (ASTM D-07-09)	49
<i>Figura 16</i> Punto de reblandecimiento (ASTM D36-14).....	50
<i>Figura 17</i> Recuperacion elastica por torsión (M-MMP-4-05-024-02).....	51
<i>Figura 18</i> Cambio de masa despues de RTFO (ASTM D2872-12)	52
<i>Figura 19</i> DSR en condición original (ASTM D 7175-15).	54
<i>Figura 20</i> Variacion de G^* y δ en condición original.....	55
<i>Figura 21</i> DSR en condición RTFO (ASTM D7175-15)	56
<i>Figura 22</i> Variacion de G^* y δ en condición de envejecimiento (RTFO)	57
<i>Figura 23</i> DSR despues de la condiciñon PAV.	59
<i>Figura 24</i> DSR condición PAV	60
<i>Figura 25</i> Ensaye de la determinacion de la rigidez (S) por medio del ensaye de reometro de viga a flexión (BBR).	61
<i>Figura 26</i> Ensaye para determinar la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el reómetro de viga a flexión (BBR).....	62

Índice de tablas

Tabla 1	12
Tabla 2.	13
Tabla 3	14
Tabla 4	51
Tabla 5	53
Tabla 6	54
Tabla 7	56
Tabla 8	57
Tabla 9	58
Tabla 10	63
Tabla 11	63



Tabla 12	64
Tabla 13	64
Tabla 14	64
Tabla 15	65
Tabla 16	65
Tabla 17	65
Tabla 18	67
Tabla 19	69
Tabla 20	70
Tabla 21	71
Tabla 22	72
Tabla 23	73
Tabla 24	74

4. Introducción

La relación entre el manejo de los residuos sólidos, la salud humana y la economía de las comunidades es reconocida mundialmente, siendo el no generarlos la forma más simple y efectiva de controlarlos. Las políticas o jerarquías para la gestión de los residuos sólidos definidas en diferentes países, ubican al aprovechamiento (reúso, reciclado) como estrategia base para el manejo de los residuos generados. Las características de las materias primas a procesar están influenciadas por eventos que ocurren en el lugar que se generan y en el lugar que se disponen, siendo así el generador quien decide si es simplemente una basura o le da un valor, identificando opciones de aprovechamiento (Luis F. Marmlejo, 2009).

Los desechos plásticos son el producto de una sociedad con un cambio en sus usos y costumbres, tales como, la comida rápida y los productos desechables; todo esto genera grandes cantidades de residuos tanto de tereftalato de polietileno como de poliestireno expandido. Por otro lado la generación de los neumáticos y sus características, como una alta durabilidad a consecuencia de la demanda del



consumidor, los convierte en productos poco degradables generando la acumulación en sitios de disposición final que pronto llegan a su capacidad máxima de servicio debido al gran volumen que ocupan dichos residuos.

Una vez teniendo el conocimiento de la producción y la problemática que causan estos residuos, se proponen formas para la valorización de los mismos, tratando de incorporarlos como materia prima en la industria de la construcción enfocándolo en el área de mezclas asfálticas para pavimentos.

5. Marco teórico

5.1 Desarrollo sostenible

El concepto de desarrollo sostenible promulgado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, CNUAM 1992, está basado en tres aspectos: el económico, social y ambiental; estos han hecho comprender que el medio ambiente y el desarrollo no son dos conceptos separados sino las dos caras del mismo concepto, que están interrelacionadas y deben tratarse de forma integrada ya que estos encierran temas como el transporte, los productos químicos, la minería, el marco decenal sobre programas de modalidades de consumo y producción sostenible, la gestión de desechos que comprende el tema de los residuos sólidos y propicia reducir la generación de desechos, a maximizar el reciclaje y reúso de todo material, el tratamiento y disposición de los residuos de forma ambientalmente segura. Para garantizar el desarrollo sostenible, el gobierno, el sector privado y las comunidades deben establecer políticas, programas y planes conjuntos donde los operadores de los servicios y la comunidad desempeñen un papel fundamental que conlleve al manejo racional de los residuos sólidos (Unidas, 2010) (Guido Acurio, 1997).

Un residuo es un material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, líquido o gas contenido en recipientes o depósitos y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (Camara de diputadosdel H. consejo de la unión, 2015).

5.2 Clasificación de los residuos

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF4) el 8 de octubre de 2003, define:



Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.

Residuos Peligrosos: Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio.

Residuos de Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (Camara de diputados del H. consejo de la unión, 2015).

5.3 Generación de residuos

Durante el último siglo, la humanidad ha modificado su ambiente más intensamente y extensamente que en cualquier otro periodo de la historia fundamentalmente para atender las enormes demandas de recursos naturales y energéticos de una población y economía que crece aceleradamente. Los impactos que se produjeron en el ambiente, en sus inicios puntuales, hoy tienen carácter global, con importantes consecuencias sociales y económicas (Robert T. Watson, 2005). Este crecimiento acelerado de la población en los últimos años, así como el proceso de industrialización y la expansión del comercio, han aumentado la generación de residuos aunque desde cualquier perspectiva de análisis, la generación de residuos sólidos remite como causa fundamental a los patrones de consumo, consumo productivo y consumo directo de bienes y satisfactores. La llamada sociedad de consumo, así como la influencia que en ella tienen los medios de comunicación privados y de manera especial la publicidad, origen de sus cuantiosos ingresos y acumulación de poder, provocan un círculo vicioso de status económico-consumo-desecho consumo-estatus económico. De esta manera nuestra vida diaria transcurre en una continua generación de residuos sólidos, que al depositarse sin ningún tipo de consideración se convierten



en enormes volúmenes de basura.

Por diversas razones: falta de conocimiento e información, insuficientes recursos económicos, presiones políticas o simple descuido, autoridades y sociedad en general han pretendido resolver este problema quitando los residuos de la vista, arrojándolos a las afueras de las ciudades, a las barrancas, los cauces de los ríos o en el mar, u ocultándolo mediante enterramiento (Secretaría de Urbanismo y medio ambiente, 2008).

Según el informe del Banco Mundial “What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management” nos da cifras de residuos generados per-cápita en el mundo por regiones las cuales observamos en la tabla 1 y figura 1, la generación de residuos varía en función de la riqueza. Las regiones en las que divide son: África Subsahariana, Asia Oriental y el pacífico, América Latina y el caribe, Oriente medio y África del Norte, OCDE, Europa y Asia Central, Asia Meridional (Bhadrata, 2012).

Tabla 1
Producción per-cápita por regiones en el mundo.

Regiones del mundo	Producción per-cápita (kg/hab/día)	Producción anual (t/año)
África Subsahariana	0.65	62 000 000
Asia y el Pacífico	0.95	270 000 000
Europa y Asia central	1.1	93 000 000
América Latina y el Caribe	1.1	160 000 000
Oriente medio y África del Norte	1.1	63 000 000
OECD	2.2	527 000 000
Asia Meridional	0.45	70 000 000

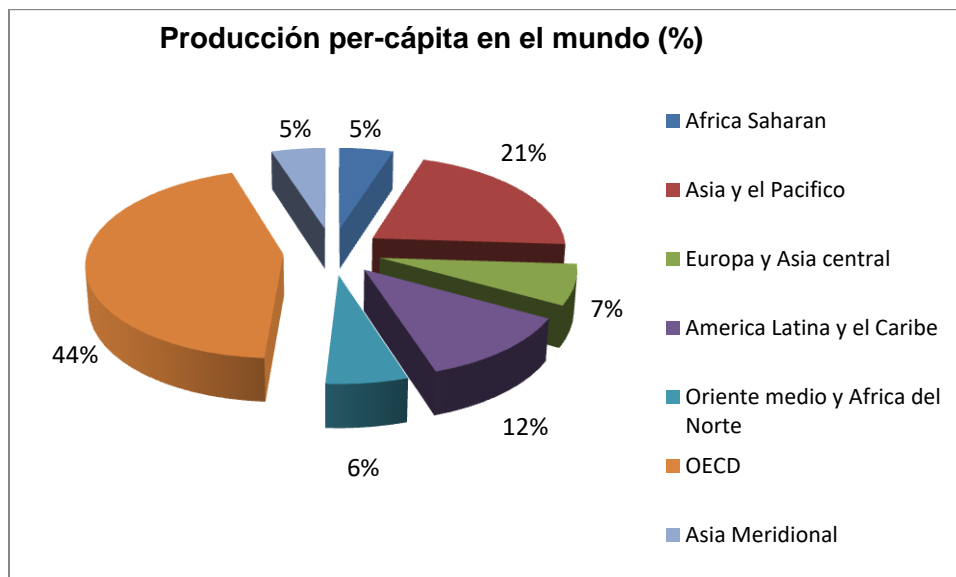


Figura 1 Producción per-cápita en el mundo (%)

En México según la base de datos de INEGI las cantidades de residuos sólidos generados en las ciudades incluye desechos generados en casa habitación, comercios, instituciones, lugares de recreación y otros, pertenecen al año 2013 y son los mostrados en la tabla 2 y grafica 2, estas muestran los porcentajes de residuos depositados en distintos tiraderos y los que fueron susceptibles de valorización con un porcentaje de 5% para el año 2013, en la tabla y figura tres observamos los porcentajes de cada uno de los materiales que fueron susceptibles de reciclarse, presentando el porcentaje más alto el vidrio.

Tabla 2.
Cantidad de residuos sólidos urbanos con disposición final y reciclaje por tipo de tiradero en el año 2013 a nivel nacional (INEGI).

Tipo de tiradero en 2013	Cantidad de residuos (t)	Cantidad de residuos (%)
Total	42923300	
Rellenos sanitarios	28503000	66.40
Rellenos de tierra controlados	3459600	8.06
Tiraderos a cielo abierto	8733400	20.35
Reciclaje	2227000	5.19

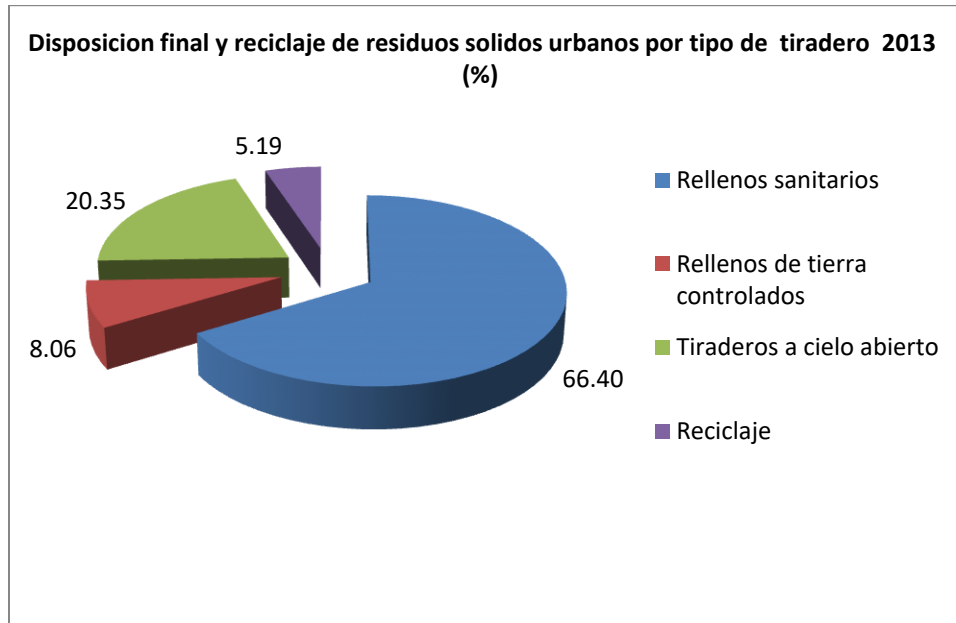


Figura 2 Disposición final y reciclaje de residuos sólidos urbanos por tipo de tiradero a nivel nacional en el año 2013 (%) (INEGI)

Tabla 3

Generación de por tipo de residuos a nivel nacional en el año 2013 (INEGI)

Tipo de residuo en 2013	Cantidad de residuos (t)	Cantidad de residuos (%)
Total	42923300	100
Papel, cartón, productos de papel	5936400	13.83
Textiles	613800	1.43
Plásticos	4674400	10.89
Vidrios	2523900	5.88
Metales	1476500	3.44
Basura orgánica	22500300	52.42
Otro	5198000	12.11

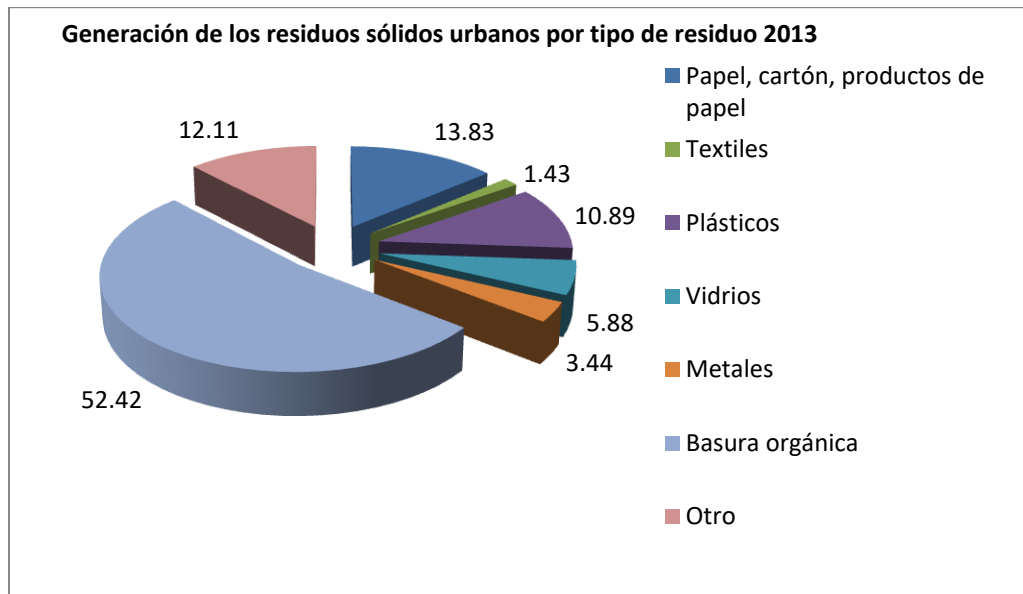


Figura 3 Generación de los residuos sólidos urbanos (%) por tipo de residuo a nivel nacional en el año 2013 (INEGI).

5.4 Gestión integral, prevención y control de los residuos sólidos.

A nivel mundial, se quintuplicó la generación de basura. En América Latina y El Caribe (ALC), la generación per cápita promedio de residuos sólidos domésticos es de 1.1 kg/hab/día lo que representa un problema para la gestión adecuada de los residuos. En el manejo de los residuos sólidos urbanos confluyen elementos estructurales, tales como el crecimiento poblacional y la urbanización, sobre todo si se trata de países en vías de desarrollo con poca o nula planificación urbana por ende, con deficiencia en los servicios públicos (Anabel Rojas Carmona, 2015).

La gestión integral de los residuos es el conjunto articulado o interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (Camara de diputados del H. consejo de la unión, 2015).

A pesar de los avances logrados en la gestión de los residuos sólidos urbanos y peligrosos en los últimos años, aún es necesario continuar con la instrumentación de acciones que permitan alcanzar los objetivos de un manejo sustentable de los



residuos. En particular, la gestión de los residuos de manejo especial es la que presenta mayor rezago en la integridad de las acciones realizadas, a pesar de que se han dedicado esfuerzos importantes para fomentar el reciclaje, reúso o reincorporación de este tipo de residuos en las cadenas productivas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2012).

Como se puede observar, hasta ahora la problemática de la generación de los residuos sólidos por diversas causas es un problema a diferentes escalas a nivel mundial tanto países desarrollados como en vías de desarrollo; en algunos países, incluido el nuestro, se ha hecho presente el surgimiento de programas para minimizar la cantidad de residuos generados y la disposición inadecuada que contribuye a la contaminación de aire, agua, suelo, y la proliferación de agentes que causan enfermedades, programas que tienen como objetivo la valorización de los residuos por medio de la reintegración de estos a procesos productivos incluyendo la elaboración de planes de manejo, así como programas de concientización y educación.

De acuerdo al informe de la UNEP (programa de naciones unidas para el medio ambiente) y la ISWA (Asociación internacional de los residuos sólidos) publicado en el año 2015 los objetivos globales de la gestión de residuos propuestos por "Global Waste Management" tienen el potencial de dar lugar a drásticas reducciones en los gases de efecto invernadero, la creación de millones de empleos verdes y beneficios económicos en cientos de miles de millones de dólares así como también ver realizados los objetivos del Desarrollo Sostenible; una solución global para el problema de los residuos incluye el llamamiento a la mejora inmediata de la recogida y eliminación de residuos, la prevención de residuos y la maximización de la reutilización así como el reciclado de los recursos además de un cambio de la economía lineal "take-make-use-waste" hacia el enfoque circular de "reducir-reutilizar-reciclar" al ciclo de vida de los materiales.

Los países deben cumplir políticas proactivas que fomenten la minimización de los desechos y el reciclaje, los productores deben estar involucrados en la gestión de todo el ciclo de vida de sus productos, es conveniente tratar los recursos y residuos, como una manera de reducir los costos de eliminación de residuos y obtener beneficios adicionales de las materias primas recuperadas, alentar a un cambio en el pensamiento sobre los desechos como mera amenaza para la salud y el medio ambiente, hacia un concepto más amplio de gestión de los recursos



(David C. Wilson, 2015) (ONU Medio Ambiente).

Existen poblaciones en diferentes continentes que han apostado por diversos programas con ejemplares resultados. Estas ciudades comprueban que no solo se reduce el problema de los residuos, sino que se consiguen varios beneficios económicos y ambientales. Ejemplos de ellos son:

Cebú (Filipinas). Tras Manila, con casi un millón de habitantes. En 2005 diseñó un plan de gestión sostenible, con la separación de residuos biodegradables, reciclables y orgánicos, campañas de educación ambiental, un sistema de multas e incentivos, que redujo la basura un 30% en 2012 y generó unos 200 empleos verdes.

Flandes (Bélgica). Posee el crecimiento, en la recuperación de los residuos, más alta de Europa, pasando de casi cero en 1980 a más del 70% en 2013. Este hito ha sido posible con una mezcla de políticas sociales, fiscales y legales, educación ambiental, centros de reutilización o el sistema "Pay As You Throw" (PAYT): cuanto menos basura producen sus ciudadanos, menos impuestos o tasas municipales pagan.

Kiribati (Oceanía). En el año 2000 puso en marcha una práctica de separación en origen; en 2004, un sistema de depósito de envases de bebidas; y en 2012, un sistema de pago por bolsas de basura que ha reducido la cantidad de basura y un 60% menos de residuos en vertedero.

Malmö (Suecia). Ha integrado un "modelo de eco-ciclo" que incluye separación en origen, instalaciones que generan energía de la basura, reutilización, reciclaje y compostaje a partir de restos de comida y jardín. Gracias a ello los residuos que llegan al vertedero han pasado del 22% en 2001 al 0,7% en 2013; se cubre el 60% de las necesidades de calefacción de Malmö y el área de Burlöv, evitando combustibles fósiles; producen biofertilizante, composta y biogás. Eso por mencionar algunos ya que tenemos ejemplos muy parecidos como el caso de Cochabamba (Bolivia), Bo (Sierra Leona), Bogotá (Colombia) (David C. Wilson, 2015) (Eroski Consumer), (ONU Medio Ambiente)

Las acciones que se proponen en el mundo para tener una prevención y un buen control de los residuos son:

Separar los residuos desde la fuente, gestionando los tres tipos por separado en instalaciones ecológicamente racionales, a fin de proteger la salud humana y el



medio ambiente, sensibilizar tanto a las empresas como al público en general, esto es particularmente importante en aquellos países de bajos ingresos donde la quema incontrolada de los desechos mixtos siguen siendo comunes, cerrar el ciclo del material asegurando que el reciclaje y la recuperación de energía sean compatibles, optar por la economía circular al construir "circuitos de retroalimentación", reúso de los residuos que sean susceptibles de valorización así como la recuperación de energía (David C. Wilson, 2015).

El orden de prioridad general de la jerarquía de residuo debe ser:



Figura 4 Orden por prioridad de la jerarquía de residuos.

Reciclaje: se entiende por reciclaje a la circulación de materiales dentro de un sistema cerrado con el propósito de optimizar recursos, disminuir generación de basura, propiciar la separación de desperdicios e introducir los mismos al sistema productivo para generar nuevos recursos. (industrial, 2000)

Es útil distinguir entre el reciclaje de materiales reciclados secos y orgánicos húmedos. Para la mayoría de los materiales secos encontramos comúnmente desechos como metales, vidrio, papel, plásticos y textiles para estos existen cadenas de valor industrial bien establecidas. Los productos orgánicos reciclados vuelven a la cadena de valor agrícola como piensos o acondicionadores de suelos.

Los dirigentes para el reciclaje incluyen el valor de mercado del material, así como las políticas y obligaciones legales; estos últimos se han establecido debido a diversas preocupaciones sobre 'fallas del mercado', incluyendo mercados inestables, escasez de recursos.

Los factores clave para determinar la factibilidad del reciclaje incluyen la concentración y la calidad (niveles de pureza) de los materiales recolectados. En



la separación de la fuente, mantener los materiales limpios y separados es crítico, ya que un material concentrado y limpio es un recurso, mientras que el mismo material mezclado con residuos generales será, en el mejor de los casos contaminante e incluso puede convertir la mezcla en un residuo peligroso. La separación y recolección para el reciclaje sólo tienen sentido económico si el material es realmente reciclado, lo cual depende de que exista un mercado para el material. Algunos mercados son relativamente locales, por ejemplo para la composta como acondicionador del suelo; Otros pueden ser nacionales o regionales. Otra de las acciones que se considera dentro de la gestión y manejo integral de los residuos es un plan integrado de manejo de los residuos. Componentes de un Plan Integrado de Manejo de Residuos Sólidos (Bhada-Tata, 2012) que debe contener lo que se muestra en la siguiente figura.



Figura 5 Plan integrado de manejo de residuos sólidos.

El desarrollo sustentable a nivel nacional depende de la conservación y aprovechamiento racional de los recursos naturales y la protección de sus ecosistemas, es necesario establecer sistemas de prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos, de manejo especial y peligrosos, que sean ambientalmente adecuados, técnicamente factibles, económicamente viables y socialmente aceptables.



A nivel nacional tenemos el “Programa Nacional para la prevención y gestión integral de los residuos” que está elaborado con base en principios que fundamentan la gestión integral de los residuos en el país y que constituyen una base única y homogénea para el desarrollo de esta actividad, a continuación se indican estos principios:

Principio de autosuficiencia	Principio de desarrollo sustentable	Principio de prevención y minimización de los residuos.	Principio de manejo seguro y ambientalmente adecuado.
Principio de comunicación, educación y capacitación.	Principio de información.	Principio de participación social.	Principio de responsabilidad compartida.
Principio de quien contamina paga.	Principio de desarrollo tecnológico.	Principio de armonización de las políticas.	Principio precautorio

Figura 6 Principios que constituyen la gestión integral de los residuos sólidos en el país.

La aplicación de estos principios apoya la definición de una política ambiental nacional en materia de residuos que busca prevenir su generación, y fomentar la reutilización y el reciclado de los mismos, enmarcados en sistemas de gestión integral en los que aplique la responsabilidad compartida y diferenciada entre los distintos actores y órdenes de gobierno, para el logro de un desarrollo sustentable y el cumplimiento cabal de los compromisos internacionales de México.

La política ambiental que plantea este programa busca reorientar el manejo de los residuos que tradicionalmente han hecho las entidades federativas y municipios consistente primordialmente en su recolección y disposición final, hacia una gestión integral de los residuos, que incluya entre otros aspectos la recolección total de los residuos del país: a través de una red de recolección, conectadas regionalmente con estaciones de transferencia que amplíen la cobertura regional



del servicio (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

Las estaciones de transferencia son un elemento que se ha convertido en una parte importante de los sistemas modernos de gestión, debido a que los rellenos sanitarios cada vez se encuentran más alejados de los centros urbanos. Las estaciones de transferencia están dedicadas al manejo, recuperación de materiales y traslado de residuos sólidos de un vehículo recolector a otro con mayor capacidad de carga, que los transporta hasta su sitio de disposición final o sitios de aprovechamiento tales como plantas de reciclaje, centros de procesamiento, incineradores, instalaciones de compostaje entre otras (Katherine Varón Valencia, 2015).

Para obtener un manejo integral de los residuos, se deben de aplicar medidas jerarquizadas que parten de la prevención de la generación, la separación en la fuente, el reúso, el reciclaje, el compostaje y la valorización energética de los mismos, hasta su disposición final adecuada como última opción.

Dentro de las primeras acciones a realizar para la implantación del programa nacional para la prevención y gestión integral de los residuos se encuentra la recolección de todos los residuos sólidos urbanos que son generados, la cual debe de ser realizada por todos los sistemas de limpia del país. Asimismo, la formulación e implementación de planes de manejo para los residuos de manejos especiales y peligrosos, en los que se garantice su adecuada recolección, tratamiento, aprovechamiento y disposición final (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales).

Una de las acciones a realizar en las que se apoya la gestión integral de los residuos sólidos es la elaboración de un plan de manejo que La ley general para la prevención y gestión integral de los residuos lo define como un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, peligrosos y de manejo especial bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno (Cámara de diputados del H. consejo de la unión,



2015).

Refiriéndonos a la última etapa del manejo de residuos, se observa que al recibir en los sitios de disposición final una gran cantidad de Residuos de Manejo Especial, se provoca que éstos se acumulen rápidamente junto con los Sólidos Urbanos y la vida útil de dichos sitios de disposición, terminen en un tiempo menor al proyectado. Por lo anterior es que se busca controlar y reducir significativamente la problemática mediante la elaboración, desarrollo y aplicación de los Planes de Manejo (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2012).

La Norma oficial mexicana 161-SEMARNAT-2011, establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo, el listado de los mismos, el procedimiento para inclusión o exclusión a dicho listado así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo, a través de esta ley se puede incrementar el aprovechamiento de los residuos de manejo especial.

Los criterios para determinar los residuos de manejo especial sujetos a planes de manejo son:

1. Estar en el listado de la Norma que define quien está sujeto a plan de manejo.
2. Para que un nuevo residuo de manejo especial se pueda incluir en el mencionado listado, debe demostrarse en la base del diagnóstico básico estatal que se cuenta con la infraestructura necesaria para el manejo del residuo y que por sus características y cantidad generada, se requiera facilitar su gestión o mejorar su manejo en todo el país. Que se trate de un residuo de alto volumen de generación, lo que implica que el residuo generado representa al menos el 10% del total de los residuos de manejo especial, incluidos en el diagnóstico estatal, únicamente para efectos del cálculo anterior no se considerarán los residuos de la construcción; y que sea generado por un número reducido de generadores, esto es, que el 80% del mismo, sea generado por el 20% o menos, de los generadores.
3. Que el residuo como tal o los materiales que lo componen tengan un alto valor económico para el generador o para un tercero, es decir, que genere un beneficio en su manejo integral, a través de la reducción de costos para el generador o que sea rentable para el generador o para el tercero, con base en las posibilidades técnicas y económicas del residuo para:



- a. Su aprovechamiento mediante su reutilización, reciclado o recuperación de materiales secundarios o de energía.
- b. Su valorización o co-procesamiento a través de su venta o traslado a un tercero.
- c. La recuperación de sus componentes, compuestos o sustancias.

Para formular y aplicar los Planes de Manejo de los Residuos de Manejo Especial sujetos a ellos se deberá incluir el principio de responsabilidad compartida, según sea el caso, que requiere de la participación conjunta, diferenciada y coordinada de los actores involucrados en la cadena de valor, buscar el manejo integral; evitar el establecer barreras técnicas y económicas innecesarias al comercio, así como considerar los elementos siguientes:

Los elementos generales que debe contener el Plan de Manejo son:

a) Información general:

- Nombre, denominación o razón social del solicitante
- Nombre del representante legal
- Domicilio para recibir notificaciones
- Modalidad del Plan de Manejo y su ámbito de aplicación territorial
- Residuo(s) objeto del plan
- Diagnóstico del Residuo
- Para los Residuos de Manejo Especial generados en la actividad productiva, el diagnóstico deberá contener únicamente la cantidad de residuos generados expresado en toneladas por día o kilogramos por día

Para productos de consumo que al desecharse se convierten en Residuos de Manejo Especial el diagnóstico deberá contener la cantidad generada o estimada del residuo e identificación de sus fuentes potenciales de generación; y además podrá contener:

- Principales materiales que componen el residuo
- Manejo actual del residuo
- Problemática ambiental, asociada al manejo actual del residuo
- Identificación del uso o aprovechamiento potencial del residuo en otras actividades productivas
- Formas de manejo integral propuestas para el residuo



- Metas de cobertura del plan, de recuperación o aprovechamiento del residuo, durante la aplicación del Plan de Manejo;
- Descripción del destino final del residuo sea nacional o internacional;
- Mecanismos de operación, control y monitoreo para el seguimiento del plan, así como los mecanismos de evaluación y mejora del plan de manejo
- De ser aplicable, especificar los participantes del plan y su actividad
- De ser aplicable indicar los mecanismos de difusión y comunicación a la sociedad en general.

Listado de residuos de manejo especial sujetos a presentar plan de manejo

I. Los siguientes residuos de servicios de salud, generados por un gran generador en centros médico asistenciales:

- Papel y cartón
- Ropa clínica, ropa de cama y colchones
- Plásticos
- Madera
- Vidrio

II. Los residuos agro plásticos generados por las actividades intensivas agrícolas, silvícolas y forestales.

III. Los residuos orgánicos de las actividades intensivas agrícolas, avícolas, ganaderas y pesqueras:

IV. Los residuos de las actividades de transporte federal, que incluye servicios en los puertos, aeropuertos, centrales camioneras y estaciones de autotransporte y los del transporte público, que incluye a los prestadores de servicio que cuenten con terminales, talleres o estaciones, que se incluyen en la lista siguiente y que se generen por un gran generador en una cantidad mayor a 10 toneladas al año por residuo o su equivalente:

- Envases metálicos.
- Envases y embalajes de papel y cartón.
- Envases de vidrio.



- **Envases de tereftalato de polietileno (PET).**
- **Envases de poliestireno expandido (unicel).**
- Bolsas de polietileno.
- Tarimas de madera.
- **Neumáticos de desecho.**

V. Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, a excepción de los indicados en la NOM-052-SEMARNAT-2005:

- Aquellos que se generen por un gran generador en una cantidad mayor a 100 toneladas anuales o su equivalente.

VI. Los residuos de las tiendas departamentales o centros comerciales, incluyendo tiendas de autoservicio, centrales de abasto, mercados públicos y ambulantes, que se incluyen en la lista siguiente y que se generen en una cantidad mayor a 10 toneladas al año por residuo o su equivalente:

- Envases metálicos.
- Envases y embalajes de papel y cartón.
- Envases de vidrio.
- **Envases de tereftalato de polietileno (PET).**
- **Envases de poliestireno expandido (unicel).**
- Tarimas de madera.
- Residuos orgánicos.
- Película de polietileno para embalaje (playo).

VII. Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m³.

VIII. Los productos que al transcurrir su vida útil se desechan (Naturales, 2013).

Los recientes trabajos sobre la economía circular, realizados por analistas financieros, han acumulado una base sustancial de evidencia que demuestra que el uso eficiente de los recursos y la prevención de residuos pueden ahorrar a las



empresas cientos de miles de millones de dólares cada año a través de mejoras.

Por lo tanto, el uso eficiente de los recursos y la prevención de residuos no sólo son buenos para la economía, sino también esenciales para el crecimiento y la prosperidad (ONU Medio Ambiente).

5.5 Problemática en México

En el caso de América Latina y El Caribe ha prevalecido el manejo de los residuos bajo el esquema de “recolección y disposición final” dejando rezagados el aprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos así como la disposición final sanitaria y ambientalmente adecuada. En muchos países de la región se utilizan los vertederos y/o tiraderos a cielo abierto sin las debidas especificaciones técnicas; se continúa con la práctica de recolección sin clasificación y/o separación de los desechos desde el origen; existe un enorme número de segregadores trabajando en las calles y en los vertederos, buscando sobrevivir del aprovechamiento de materiales reciclables a pesar del riesgo a que exponen su salud e integridad física, unido esto a la deficiencia en la administración tanto pública como privada del sector, son aspectos que revelan la crisis que presenta en la región el manejo de residuos sólidos (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2006).

En México, la transición de lo rural a lo urbano, modificó los patrones de consumo de una sociedad que producía mayormente residuos orgánicos, a una que produce principalmente residuos inorgánicos derivados de los patrones de consumo típicos de sociedades industriales urbanas (Rojas-Caldelas, 2014).

Las regiones Noroeste y Noreste del país es donde se genera la mayor cantidad de los residuos sólidos, esto tiene sentido ya que la mayoría de las entidades que conforman estas regiones integran la frontera norte de México, son zonas que se han caracterizado por la presencia de un sector industrial maquilador incrementándose el crecimiento poblacional y un importante desarrollo económico así como el cambio en los patrones culturales y de consumo reflejándose en el incremento de la generación de desechos (Martínez, 2015). La tasa de generación de residuos en el sur del país es inferior a la región del norte, habiendo una correspondencia entre la cantidad de desechos generados y el grado de desarrollo y el nivel de ingresos de las familias (Ambiental, 2005).

La composición de los residuos sólidos en México en el 2013 fue de 52.42% de residuos orgánicos, el 35.47% de residuos potencialmente aprovechables (papel y



cartón, plásticos, vidrio y metales) otros residuos 12.11% y textiles 1.43% (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

La figura 7 muestra el incremento en la generación de RSU en los últimos 20 años y la contribución de cada tipo de ellos. Es importante notar que aunque dicho incremento en la generación es compartido por todos los desechos, se han observado modificaciones en la proporción relativa según el tipo de residuo en la composición total. Destacamos tres tendencias: los que disminuyeron su participación, entre ellos los residuos de papel y cartón que pasaron 14,07% a 13,83%, los textiles que descendieron ligeramente de 1,49 a 1,43% y los clasificados como otros residuos cuya caída representó poco menos de siete puntos porcentuales al pasar de 18,86 a 12,11% del total. La segunda tendencia corresponde a los que incrementaron su participación en la composición, como los metales que reportaron una ampliación moderada del 2,9 a 3,44% y los plásticos que exteriorizaron un aumento espectacular pasando del 4,38 al 10,89% del total. Finalmente, los residuos que mantuvieron estable su contribución al volumen de residuos generados, tal es el caso de los vidrios y los residuos orgánicos.

Debido a la composición de los residuos generados, es posible inferir que un gran porcentaje de los mismos es apto para el reaprovechamiento, en la formación de composta o a través del reciclaje de productos. Correspondería a un mínimo porcentaje el volumen que no podría reutilizarse.

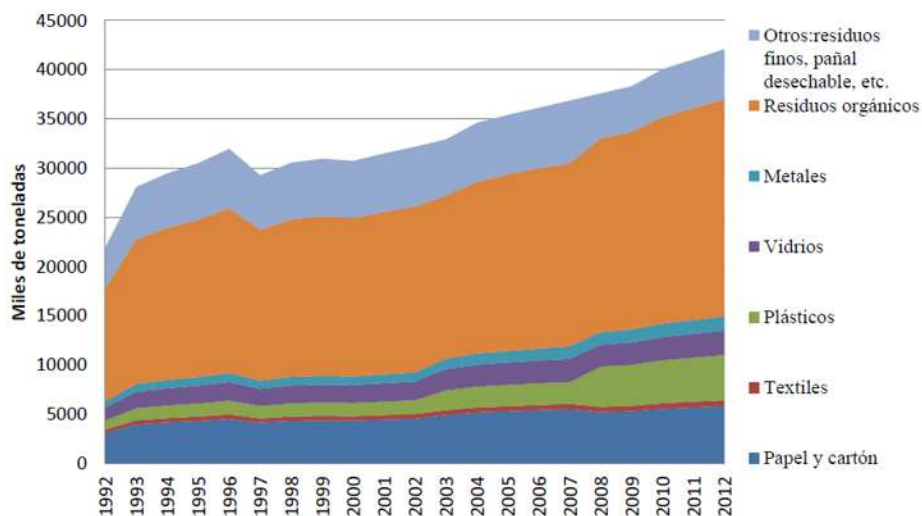


Figura 7 México, generación anual de RSU por tipo de residuos 1992-2012



El modelo de gestión y manejo integral de residuos es el conjunto de actividades relacionadas con la vida del residuo, desde la cuna hasta la tumba. Por ello, las actividades técnicas como la cuantificación y la caracterización de los residuos sólidos urbanos es una de las formulaciones vitales de su estrategia de manejo.

En este sentido, conviene destacar que se tienen debilidades en los sistemas de información, ya que la información accesible es limitada y no se encuentra sistematizada. Los datos que integran al diagnóstico básico para la gestión integral de residuos, documento por el cual se da a conocer las estadísticas más recientes en el rubro de los residuos sólidos, proviene de fuentes heterogéneas con métodos que no han sido validados ni armonizados para su obtención y procesamiento, lo que dificulta su sistematización (Medina-Salas, 2013) (Martínez, 2015).

En México se cuenta con información, pero debe manejarse con precaución ya que no existe una clasificación uniforme en el tema de los residuos sólidos, en la conformación de los inventarios de generación, en la estimación de volúmenes de manejo y disposición, es decir tanto en la obtención como en la presentación de los datos (Martínez, 2015).

5.6 Residuos en estudio

5.6.1 Poliestireno

El incremento del uso de productos desechables y la producción de objetos de plástico, elaborados con materiales poliméricos como materia prima, se envuelve dentro del término de transformación de polímeros, estos han generado una problemática en la acumulación de residuos sólidos, de acuerdo con información internacional es posible encontrar tres kilogramos de plástico por cada medio kilo de plancton en el mar. Se estima que 18 000 piezas de basura plástica se encuentran flotando en cada kilómetro cuadrado del océano (Ryan, 2013) (Liliana Ivete Ávila Córdoba, 2015).

Los plásticos se clasifican en función del comportamiento que presentan con las variaciones de la temperatura en:

Termoplásticos: son aquellos materiales que tienen la capacidad de volverse a fundir después de haber solidificado en un proceso físico reversible; su estructura molecular presenta pocos entrecruzamientos. Cuando los termoplásticos se



solidifican, pueden adquirir dos tipos diferentes de estructuras: amorfa y semicristalina; los polímeros amorfos son aquellos cuyas moléculas solidifican en disposiciones aleatorias a diferencia de los polímeros semicristalinos, donde algunas de las moléculas se alinean con las más próximas, para formar regiones que tienen un orden tridimensional. Esta transformación no supone ningún cambio en la estructura del polímero y el objeto fabricado puede ser fundido de nuevo y transformado en otro objeto distinto. Los termoplásticos forman el 90% de todos los materiales poliméricos en el mundo.

Termoestables: son Polímeros que solidifican como resultado de una reacción química que provoca que las moléculas se entrecrucen lo que impide los desplazamientos relativos de las mismas, es decir, se descomponen químicamente. Estos materiales no puede volverse a fundir una vez que han solidificado (Liliana Ivete Ávila Córdoba, 2015).

De acuerdo con la normativa mexicana (NMX-E-232-CNCP-2011 y NMX-E-332-SCFI-1999) la terminología de reciclado de plásticos y la simbología, establece y describe los símbolos de identificación que deben tener los productos fabricados de plástico, en cuanto al tipo de material se refiere, con la finalidad de facilitar su selección, separación, acopio, recolección, reciclado y/o reaprovechamiento. El símbolo se compone por tres flechas que forman un triángulo, con un número en el centro y abreviatura en la base.



Figura 8 Símbolo Internacional del Reciclaje

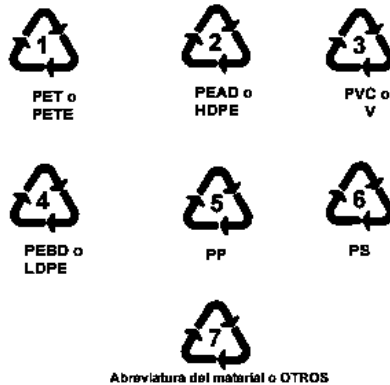


Figura 9 Forma de identificación de los plásticos.

PET: Tereftalato de polietileno, utilizado en la fabricación de envases para bebidas suaves y refrescos.

HDPE: Polietileno de alta densidad, usado en la fabricación de productos de consumo comunes, incluyendo envases para leche, agua, detergentes y blanqueadores.

PVC: Cloruro de polivinilo, utilizado en la fabricación de envases para pulidor de pisos, aceites comestibles, licores, enjuagadores bucales, así como mangueras de jardín, tarjetas de crédito y otros productos (es el plástico con mayor potencial de emisión de dioxinas y furanos cuya presencia puede obstaculizar el reciclado del PET).

LDPE: Polietileno de baja densidad, utilizado en la elaboración de envases para cosméticos en bolsas usadas en mercados y tintorerías.

PP: polietileno, con este se fabrican tapas para botellas, cuerdas, alfombras y otros productos.

PS: Poliestireno con el cual se produce hule espuma y recipientes para contener bebidas calientes.

Otros plásticos: algunos de los cuales constituyen mezclas de los anteriores. (Secret, 1999)

La polimerización del estireno produce un termoplástico transparente, incoloro, duro y rígido llamado poliestireno para uso general. Para ciertas aplicaciones, se añaden cauchos con el objeto de conferirle, extensibilidad, tenacidad y resistencia al impacto. Algunos de los usos son dispositivos para embalajes, lentes, tapones de botellas, contenedores de todas clases, juguetes etc. Se construyen también



hojas o placas de poliestireno y parte de estas son transformadas en platos, vasos o tasas, además de espumas y aislantes térmicos (Rubin, 2012).

5.6.2 Tereftalato de polietileno

Los plásticos representan el 11% de los residuos sólidos urbanos en México. El PET es uno de los materiales más utilizados por la industria embotelladora de bebidas, debido a su durabilidad, resistencia química, bajo peso y adecuada capacidad de disipación de energía ante la aplicación de fuerzas externa, entre otras, debido a esto se colocó como el tercer plástico más usado en México, seguido por Polietileno de alta densidad (HDPE), PP y PVC (Chong-Qing Wang, 2015).

El desarrollo de tecnologías para el reciclado de plásticos inicio a principios de 1970, debido al aumento en los costos del petróleo y desabasto de materias primas. El reciclaje de plásticos se puede hacer a través de tres métodos: **Reciclaje físico o mecánico, reciclaje químico o terciario y reciclaje energético o cuaternario.**

El PET se considera un termoplástico de alta calidad, químicamente pertenece a la familia de los poliésteres, cuya principal característica es la presencia de enlaces tipo éster ($-\text{CO}-\text{O}-$). El PET se constituye por grupos etileno y tereftalato (Liliana Ivete Ávila Córdoba, 2015).

Durante los últimos setenta años, la industria del plástico ha experimentado un drástico crecimiento, en la producción de polímeros sintéticos representados por polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), polietileno Tereftalato (PET), alcohol polivinílico (PVA) y cloruro de polivinilo (S.M. Al-Salem, 2009).

Un aspecto que actúa como fuerza impulsora para la industria del reciclado de PET, es que los productos presentan una tasa lenta de descomposición natural, es un plástico no degradable en condiciones normales, ya que no existe ningún organismo conocido que pueda consumir sus moléculas (Firas Awaja, 2005). Es necesario tomar en consideración que una botella de PET tarda 500 años en degradarse. En 2010 el país se colocó en el primer consumidor de agua embotellada a nivel mundial (Eduardo Botero Jaramillo, 2014).

El PET es usado en la elaboración de materiales geo sintéticos, para lo cual es fundido, filtrado y extruido hasta obtener fibras de poliéster de aspecto liso, con buena resistencia a la tensión y baja capacidad de absorción de agua, con las



que se elaboran geo textiles de tipo no tejido y geo mallas de refuerzo. Adicionalmente, el PET reciclado en forma de fibras, se usa como material de mejoramiento para concretos y asfaltos (Eduardo Botero Jaramillo, 2014).

5.6.3 Neumáticos

Debido al creciente número de vehículos a nivel mundial se ha generado una mayor disposición de neumáticos que llegan al final de su vida útil, esto ha generado una fuerte problemática debido a su gran volumen. Esto es una potencial amenaza para la salud humana, además de que los sitios donde estos se disponen generan plagas de mosquitos y son susceptibles a incendiarse produciendo una tremenda contaminación a la atmosfera.

Las características inherentes de los neumáticos se pueden ver como ventaja o desventaja desde el punto de vista como productos de consumo o posterior a la vida útil. Como producto de consumo es resistente a la humedad, retrasa el desarrollo bacteriano, resistente a la luz solar, rayos ultravioleta, algunos aceites, ácidos y otros productos químicos. Las características físicas incluyen su no biodegradabilidad, no toxicidad, peso, forma y elasticidad; sin embargo muchas de estas son un problema para el ambiente (Presti, 2013).

Desde el punto de vista material, el neumático se compone de tres Componentes materiales: compuesto elastomérico, tejido y acero (Presti, 2013). La llanta químicamente está compuesta principalmente por caucho, este es usado en la fabricación de neumáticos compuesto por un grupo de polímeros (compuestos químicos de elevado peso molecular) entre los que se cuentan el polisopreno sintético, el poli butadieno y el más común que es el estireno-butadieno, todos basados en hidrocarburos (Aguilar, 2013).

5.6.4 Uso actual de residuos de estudio

De acuerdo con lo reportado en la literatura, el post-consumo del tereftalato de polietileno, neumáticos y poliestireno expandido puede ser reciclado de diversas maneras todo dependerá de las condiciones económicas y ambientales que se tengan.

Debido a las problemáticas presentadas y buscando opciones para el aprovechamiento de estos residuos, se han hecho diversos estudios para revalorizar los residuos. Diversos autores han aportado resultados respecto al uso de residuos sólidos proponiendo los neumáticos que llegan al fin de su vida útil como combustibles para procesos de conversión térmica (Einara Blanco Machin,



2017), se han propuesto como agregado en forma de partículas al concreto de cemento portland (Haolin Su, 2015) (Xiang Shu, 2014) (Adam J. Kardos, 2015), como aditivos para mezclas asfálticas haciendo modificaciones, adicionando polímeros y caucho, obteniendo como resultado que estas modifican las propiedades de las mezclas (Pedro Lastra-González, 2017) (Dongdong Ge, 2016) (F. Pérez-Jiménez, 2006), otras adicionando a la vez vasos desechables y neumáticos permitiéndoles predecir un adecuado comportamiento de las mezclas (Ana Sofía Figueroa-Infante, 2009), también mediante un proceso de pirolisis en el neumático, proponiéndose como una alternativa del cemento asfáltico (Xiaoyu Wu, 2016) (Juan DanielMartínez, 2013), respecto a los materiales plásticos se estudió la modificación con PVC, PET, Polietileno en mezclas de asfaltos en caliente (Hugo Alexander, 2008) (Patricio Romero Flores Msc1) (Shbeeb, 2007), además se han hecho adiciones en mezclas de concreto utilizando poliestireno expandido con el objetivo de modificar sus propiedades térmicas y mecánicas (W.C. Tang H. C., 2014) (W.C. Tang Y. L., 2008) (Adilson Schackow, 2014).

5.7 Problemas típicos de un pavimento asfáltico

Hoy en día junto con el rápido aumento de volumen de tráfico y carga por eje, el pavimento de asfalto común ha sido incapaz de satisfacer los requisitos de tráfico debido a fallos graves y prematuros, como el envejecimiento, el ahuellamiento, falla por fatiga y el agrietamiento por baja temperatura (Chongzheng Zhu, 2017).

Si la carga de un neumático se transmite al pavimento, los esfuerzos que se generan en la mezcla asfáltica, esencialmente son verticales de compresión y de cortante entre las capas, mientras que en el fondo de la misma se generan esfuerzos horizontales de tensión. Por este motivo, la mezcla asfáltica debe ser internamente muy fuerte y resistente contra los esfuerzos de corte, compresión y tensión, con el objetivo de prevenir la deformación permanente así como suficiente resistencia a la tensión evitando agrietamiento y resistencia a los esfuerzos debidos al rápido decremento de la temperatura para evitar contracciones térmicas. Por lo anterior, se pueden identificar los deterioros básicos en un pavimento, los cuales son: deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por temperatura (Asphalt Institute, 2001) (Paul Garnica Anguas M. F., 2005)

5.7.1 Deformación permanente

Es la sección transversal de un pavimento que no se encuentra en su posición de diseño inicial, es representada por una acumulación de pequeñas



deformaciones no recuperables que se forman cada vez que una carga es aplicada una causa de ahuellamiento, es la deformación que resulta por la falta de resistencia al corte de la mezcla asfáltica. Este tipo de falla se presenta típicamente durante las temperaturas más altas del pavimento en verano; lo que lleva a pensar que es un problema asociado al ligante asfáltico; una manera de incrementar la resistencia al corte de la mezcla es utilizando un ligante asfáltico con mayor rigidez, que también se comporta como un sólido elástico a temperaturas altas. Después, cuando la carga sea aplicada, el ligante actuará como una banda elástica y regresará a su posición original en lugar de deformarse permanentemente.

5.7.2 Agrietamiento por fatiga

El agrietamiento por fatiga ocurre en los pavimentos asfálticos cuando las cargas del tránsito crean un sobreesfuerzo en el asfalto, generando que se formen las grietas. Un indicio temprano de este tipo de agrietamiento son las grietas longitudinales intermitentes a lo largo de la trayectoria de las ruedas..

5.7.3 Agrietamiento por baja temperatura

El agrietamiento por baja temperatura es causado por condiciones ambientales adversas más que por cargas de tránsito pesado. Se caracteriza por grietas intermitentes transversales al sentido del tránsito, pero paralelas entre ellas, sorprendentemente a una separación consistente. El ligante asfáltico juega un papel muy importante en el agrietamiento por baja temperatura; en general, asfaltos duros son más propensos, a este tipo de agrietamiento, que asfaltos blandos (Asphalt Institute, 2001).

Se puede decir entonces que el asfalto juega un papel muy importante en el desempeño mecánico de la mezcla, brindándole a esta sus propiedades viscoelásticas. Dicho desempeño depende de las propiedades relacionadas al desempeño de un pavimento las cuales están basadas en la reología.

5.8 Asfalto

La normativa SCT-N-CMT-4-05-001 (2006) define al asfalto como un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfaltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad a una mezcla asfáltica. Las características de un asfalto a distintas temperaturas, magnitud de carga y etapas de envejecimiento, determinan su desempeño como ligante en un sistema de pavimento. Actualmente es clasificado



mediante Grados de Desempeño (PG), y generalmente constituye del 4 al 10% del total de la mezcla.

En las últimas décadas, el pavimento de concreto asfáltico, debido a su bajo nivel de ruido, confort de conducción y fácil mantenimiento, ganó su rápido crecimiento en todo el mundo. Sin embargo, el aglutinante original de asfalto, como un material flexible, tiene inevitables desventajas, tales como susceptibilidad a la temperatura, ablandamiento y agrietamiento a baja temperatura y considerando el incremento en la intensidad del tránsito vehicular así como los niveles de carga en las carreteras, ha surgido la necesidad de utilizar materiales con mayores resistencias, debido a esto es que existe la necesidad del uso de ligantes modificados. Con el fin de superar estas deficiencias, el asfalto modificado fue inventado por Richard Mr. Singh Group en Austria, y se ha desarrollado rápidamente en los últimos 15 años.

Actualmente, hay algunos polímeros usados para asfaltos modificados, tales como estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno acetato de vinilo (EVA), polietileno (PE), ácido poli fosfórico (PPA), caucho de neumático de tierra (GTR). Entre estos polímeros, el SBS es el más popular, seguido por caucho de neumático recuperado (Secretaría de comunicaciones y transportes, 2006).

Estos modificadores tienen un efecto característico sobre las propiedades de aglomerantes de asfalto, en términos de mejorar resistencia a la deformación y las características reológicas a diferentes temperaturas (KeZhen Yan, 2016). Los polímeros han sido considerados como los más rentables aditivos para mejorar la durabilidad de los pavimentos de asfalto (Qiang Wanga, 2016).

En una mezcla asfáltica los parámetros relacionados con la resistencia son la rigidez del ligante, la volumetría de la mezcla y la interacción entre la unión del ligante y el agregado. Respecto a la rigidez del ligante asfáltico, el principal objetivo de adicionar polímeros u otros materiales al asfalto es aumentar su resistencia a corto y a largo plazo como ya se mencionó. Estos modificadores tienen la particularidad de alterar las propiedades mecánicas del asfalto para aumentar su resistencia e inclusive incrementar el rango de temperaturas máxima y mínima de acuerdo a la caracterización Grado PG del método Superpave (S.E.Zoorob, 2012).

Desde 1987 hasta 1993, el SHRP (Programa de Investigación Estratégica de Carreteras) desarrolló las especificaciones Superpave (Pavimentos Asfálticos de



Desempeño Superior) basadas en el desempeño de los materiales, así como los métodos de prueba para ligantes asfálticos, agregados y la metodología de diseño de mezclas asfálticas fabricadas en caliente. En el caso de los ligantes asfálticos, el método fue desarrollado de acuerdo a los efectos climáticos, daños durante la construcción, envejecimiento (durante la construcción y en servicio), velocidad de tránsito y volumen de tránsito.

5.9 Asfalto modificado

De acuerdo a la SCT N-CMT-4-05-002 (2006), los cementos asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto de un polímero, químicos u otro material, los cuales deben ser sustancias estables en el tiempo y a cambios de temperatura. La modificación de ligantes asfálticos tiene varios propósitos, como realzar el desempeño general de un ligante mediante el incremento en el rango de temperaturas máxima y mínima o elegir un mejoramiento específico en el desempeño del mismo como respuesta de una condición particular severa de servicio.

Materiales diversos son adicionados al cemento asfáltico virgen como modificadores. Los elastómeros de caucho estireno-butadieno (SBR) y el copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) son utilizados ampliamente. Los plastómeros tales como el polietileno y el etileno de acetato de vinilo también se comercializan como modificadores, la cal hidratada, el azufre elemental, la gilsonita y el polvo de neumático son algunos otros. Sin embargo, la modificación también puede implicar el procesamiento del cemento asfáltico virgen para mejorar su rendimiento; técnicas de aire soplado (es decir, la oxidación) y la destilación al vapor son buenos ejemplos de tales procesos, aunque no recomendables, ya que al generarle rigidez a un asfalto mediante la oxidación, se induce a que falle por fatiga ya que se seguirá oxidando durante su vida útil (XinQua, 2018).

5.10 Clasificación de los Cementos Asfálticos

De acuerdo a la información de la SCT N-CMT-4-05-001 (2006), alrededor de 1930 en México, el asfalto se clasificaba por medio del Grado Penetración; avanzando después en 1990 a la especificación de Grado Viscosidad (AC). Los principales parámetros técnicos que propiciaron el uso del AC fueron los problemas causados por el amplio rango de viscosidad que presentan los asfaltos Grado Penetración, además que la temperatura de 135 °C especificada en los AC se considera un promedio para las operaciones de transporte, almacenamiento y



construcción de carpetas asfálticas, a diferencia de los 60 °C especificados en la previa caracterización.

La forma de caracterizar a los asfaltos indicadas previamente presenta el inconveniente de no correlacionar totalmente el comportamiento a las condiciones de carga-tiempo a las cuales son sometidos estos productos en las carreteras de altas especificaciones para el tráfico vehicular de varios ejes de transmisión. Debido a estas carencias técnicas en el método Superpave también se incluyen nuevas especificaciones de asfalto, llamadas Grado PG, adoptadas posteriormente por la AASHTO estas especificaciones pueden ser aplicadas en asfaltos convencionales y modificados (Kennedy, 1994).

La normatividad americana cuenta con la especificación ASTM D6373, AASHTO M320 y AASHTO MP1 para la clasificación del asfalto por Grado PG, siendo la ASTM D6373 -2016 la última versión de la clasificación.

El sistema de clasificación Grado PG es la selección del ligante asfáltico indicado para el desempeño del pavimento deseado en términos de los tres modos de falla de un pavimento: deformación permanente (roderas), agrietamiento por fatiga y agrietamiento por baja temperatura. Esta caracterización mide las propiedades fundamentales (esfuerzos y deformaciones) del ligante en varias etapas y condiciones (temperaturas de servicio y envejecimiento del ligante) a lo largo de la vida útil esperada del pavimento (ASTM, 2016) (Henglong Zhang, 2018)

5.11 Propiedades reológicas del asfalto

Las propiedades relacionadas al desempeño de un pavimento están basadas en la reología del ligante asfáltico. Reología es la ciencia de estudio del flujo y la deformación de los materiales que son capaces de fluir.

El desempeño de la mezcla asfáltica se ve directamente influenciado por las propiedades de desempeño del ligante asfáltico, dicho enfoque se basa en el comportamiento fundamental de los ligantes asfálticos: viscoelasticidad susceptible al tiempo de aplicación de carga, y susceptible al envejecimiento (D.Grossegger, 2018)

El cemento asfáltico tiene propiedades viscoelásticas, ya que a temperaturas altas (aprox. > 60 °C) se comporta como un líquido viscoso, mientras que a bajas



temperaturas (aprox. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) tiene un comportamiento sólido elástico. A las temperaturas intermedias que es donde se encuentran la mayoría de los sistemas de pavimento, el cemento asfáltico presenta ambas características, la de un líquido viscoso y un sólido elástico (QinglongYou, 2018).

El asfalto es un material orgánico, por lo que reacciona con el oxígeno del ambiente provocando una oxidación (envejecimiento), modificando su estructura y composición molecular, el envejecimiento genera que el ligante se vuelva más frágil, y es mucho mayor su efecto a temperaturas altas. Este fenómeno ocurre en los pavimentos que experimentan velocidades de tránsito relativamente bajas, así como es mayor su desarrollo en climas cálidos que en climas fríos. Una parte considerable del envejecimiento por oxidación ocurre durante el mezclado en caliente del asfalto con los agregados y otras operaciones constructivas. Los asfaltos se envejecen por oxidación y volatilización durante la etapa constructiva del pavimento, y por oxidación a lo largo de su vida útil por estar expuestos al ambiente (Fan Yin, 2017) (Mohiuddin Ahmad, 2017).

Debido a que el comportamiento del asfalto es dependiente del tiempo y de la temperatura se utiliza el reómetro de corte dinámico (DSR) para evaluar los efectos de ambos parámetros. Las propiedades reológicas que se determinan son el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). El módulo complejo de corte 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). Por otro lado, el ángulo de fase es un indicador de las proporciones entre dichas componentes elástica y viscosa.

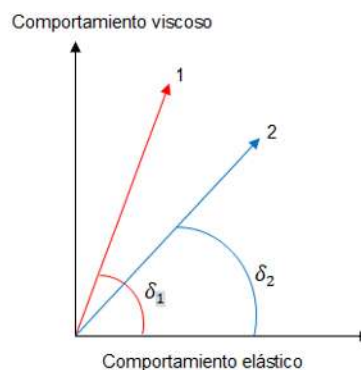


Figura 10 Comportamiento elástico y viscoso

En la figura anterior, el eje vertical indica un comportamiento puramente



viscoso, es decir, $\delta=90^\circ$; este se obtiene cuando el asfalto se encuentra a muy altas temperaturas (superiores a las de los pavimentos en servicio). Por otro lado, el eje horizontal indica un comportamiento elástico, es decir, $\delta=0^\circ$; este se obtiene cuando el asfalto se encuentra a muy bajas temperaturas (inferiores a las de los pavimentos) (Mahyar Arabani, 2017) (Zhenqiang Han, 2017) (Lili Han, 2017).

Se debe evaluar el ángulo de fase además del módulo de corte para determinar la resistencia de los asfaltos, esto debido a que dos ligantes asfálticos (A y B) pueden tener el mismo G^* , pero diferente proporción viscosa y elástica (δ), como se observa en la Figura 11, donde el asfalto B tiene un mejor comportamiento, ya que su parte elástica es mayor que la del asfalto A. Esto quiere decir, que si una misma carga es aplicada a ambos asfaltos, el asfalto A tendrá más deformación no recuperable (permanente) que el asfalto B.

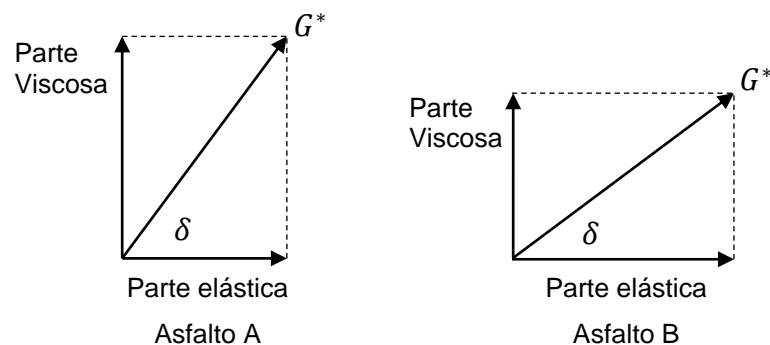


Figura 11 Importancia de δ (ángulo de fase) en la reología

El Reómetro de Corte Dinámico se usa para medir propiedades visco-elásticas del asfalto a través de tensiones y deformaciones. El reómetro aplica un patrón sinusoidal de tensiones (o deformación) de corte sobre una muestra asfáltica, midiendo su deformación (o tensión). La respuesta del asfalto presenta un patrón de la misma frecuencia pero de distinta amplitud y desfase en el tiempo obteniendo los parámetros G^* y δ como se observa en la Figura 12.

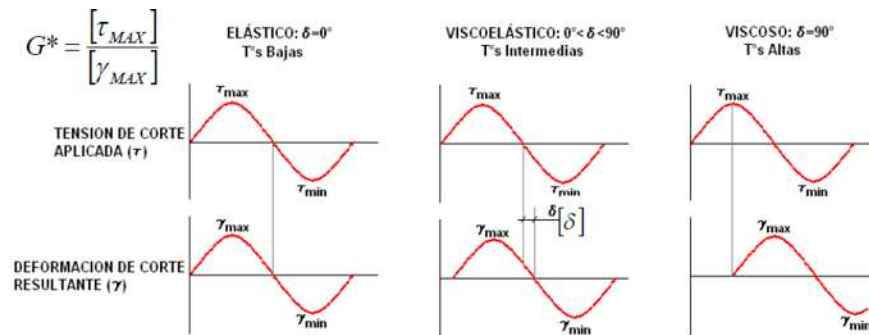


Figura 12 Respuesta esfuerzo–deformación de un material visco elástico.

El módulo de corte es la relación entre el máximo esfuerzo cortante ($\tau_{\text{máx.}}$) y la deformación máxima por corte ($\gamma_{\text{máx.}}$). Dichas variables las calcula el software del reómetro haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

$$\tau_{\text{máx.}} = 2T/\pi r^3$$

$$\gamma_{\text{máx.}} = \theta r/h$$

Donde,

T= máximo torque aplicado.

r= radio de la muestra (o plato), 12.5 ó 4mm.

θ = ángulo de deflexión (rotación).

h= altura (espesor) de la muestra, 1 ó 2mm.

El ángulo de fase es el tiempo desfase o retraso, expresado en grados, entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante y se obtiene:

$$\delta = 2\pi f \Delta t$$

Donde,

f= frecuencia, rad/s,

Δt = tiempo de desfase, s.

En el caso de los asfaltos, cuando el asfalto es sometido a un esfuerzo, la componente elástica (G') absorbe la energía y la utiliza para recuperarse; en cambio, la componente viscosa (G'') es la encargada de disipar la energía a las



capas inferiores. Por lo anterior, el estado ideal del asfalto es cuando estas componentes son iguales en magnitud (ángulo de fase = 45°), ya que la componente elástica absorbe solo la energía necesaria para recuperarse de la deformación sufrida por el esfuerzo y libera la energía que no necesita hacia las capas inferiores por medio de la componente viscosa.

5.12 Caracterización por grado PG

La clasificación está basada en los extremos de temperatura del pavimento esperada durante su vida útil indicado mediante su notación PG X-Y (Asphalt Institute, 2001).

Donde,

PG = grado de desempeño

X = temperatura máxima de diseño del pavimento.

Y = temperatura mínima de diseño del pavimento.

Es importante recalcar que las temperaturas para elegir un ligante asfáltico de acuerdo al Grado PG son temperaturas que experimentará el pavimento durante su vida útil, más no la temperatura ambiental de la región. Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius. Generalmente las temperaturas máximas se encuentran en un rango de cuarenta y seis (46) a ochenta y dos (82) grados Celsius y las mínimas de menos cuarenta y cuatro (-44) a menos diez (-10) grados Celsius, de acuerdo a la normativa ASTM D6373 (2013).

En el caso de México, la normativa SCT N-CMT-4-05-004 (2008), menciona que los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, recomienda seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los tres grados PG que se indican en la Figura 13 de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana.



Figura 13 Regiones geográficas para la utilización recomendable de cementos asfálticos grado PG.

6. Antecedentes

Como se observa, en el capítulo anterior, ha habido una concentración de esfuerzos en materia de reutilización o reciclaje de residuos sólidos y por otro lado en la mejora de los pavimentos elaborados con mezclas asfálticas, por lo que se ha tratado de optimizar los recursos con los que se cuenta, por ello es que se ha implementado la modificación de los cementos asfálticos para mejorar varias características y con ello lograr una mejora en el comportamiento de dichos pavimentos.

Los materiales que se han utilizado para estas modificaciones en forma de adiciones han sido diversos, así como también lo ha sido los porcentajes de dichas adiciones. En países como España ya se han hecho propuestas de patentes con materiales modificantes como el polietileno reciclado (Santiago Gil Redondo, 2012), se está trabajando con otros residuos como el poliestireno aunque no siempre encontrando los mejores resultados.

Los porcentajes que se reportan en la literatura han sido desde muy pocas



cantidades como 0.1, 0.2, 0.3, y 0.5% con bolsas de plástico, así como modificantes con porcentajes que van hasta el 15%. Existen trabajos de incorporación de 3, 6, 7 y 8% de PET, de un 15% de poliestireno, mezclas con dos modificantes manteniendo el poliestireno con 1% y variando la cantidad de llanta molida 12, 14, 16, 18 y 20% (Ana Sofia Figueroa Infante, 2009), así como la adición de llanta molida en fibras dentro de la granulometría del diseño de la mezcla asfáltica (Oscar JAVIER Reyes Ortiz, 2004) (Hugo A. Rondón-Quintana, 2012), también se han hecho adiciones de PVC en 0.5, 1 y 1.5% (Hugo A. Rendon Quintana, 2011), otras investigaciones se han estado haciendo respecto a materiales que ya se encuentran dentro de las normas de la secretaria de comunicaciones y transportes tal es el caso del SBS (estireno-butadieno-estireno) adicionados en un 6% (Silvia Angelone, 2016).

De los estudios o investigaciones encontradas se puede ver que los porcentajes de adición al cemento asfáltico son muy variables pero en general no van más allá del 15%, los materiales son diversos así como la manera en que se adicionan también, ya que algunos se agregan en polvos o en fibras, hasta ahora no hay un solo camino para lograr dicha modificación, ya que en algunos casos se recurre a alternativas como la utilización de solventes o procesos químicos para ablandamiento de los posibles modificantes, procesos de molienda y tamizado, elevación de la temperatura del cemento asfáltico, mezclado mecánico por tiempos cortos y prolongados, también a diferente energía de mezclado

Lo anterior se remite únicamente a la modificación de uno de los componentes de las mezclas asfálticas, el resto de los componentes de una mezcla asfáltica son materiales pétreos (de los cuales ya están bien establecidas las normas de calidad ASTM-D 75, 6928, 5821, 4791, 3625, 2419, 1252 y ASTM-C702,136,127,128,131, 88, 837. Uno de los puntos fundamentales para la obtención de una buena mezcla es un diseño adecuado de la misma, el cual debe considerar la mayor cantidad de parámetros que puedan ser factores de afectación durante la vida de una mezcla asfáltica; por eso es que se recomienda no solo hacer el estudio de la modificación del asfalto sino ir hasta la parte de la implementación de este; y para esto hay diferentes métodos de diseño, pero específicamente de los más usados en México es el método Marshall, pero no por esto el único, también se tiene el método de Superpave.

Método Marshall: Método de diseño de mezclas asfálticas desarrollado durante la segunda guerra mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentales. Los dos



aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

Método Superpave; El método contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en el laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. El diseño volumétrico de mezclas en Superpave es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en caliente y su correcto funcionamiento, contiene métodos de ensaye que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

Este método está compuesto por tres niveles:

- Primer nivel de análisis, diseño volumétrico.
- Análisis intermedio, diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento.
- Análisis completo, diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento adicionales.

Estos tres niveles contienen una serie de pruebas con las cuales se pretende predecir el comportamiento de las mezclas a diferencia del método Marshall que no considera tales efectos.

La norma de la SCT N CMT 4-05-002/06 considera especificaciones para asfaltos modificados clasificándolos mediante el método de grado de desempeño (Superpave PG), de acuerdo a dicha norma estos modificadores se clasifican como Polímero tipo I, II, III y hule molido; dichos modificadores también pueden ser tomados de los residuos sólidos como es el caso del poliestireno, el PET y el caucho molido.

7. Planteamiento del problema

En las últimas décadas con el incremento de la población, la creciente fabricación de productos para satisfacer las nuevas demandas de consumo y con ello el acrecentamiento de la acumulación de residuos sólidos en tiraderos o basureros municipales han creado una progresiva problemática que trae graves consecuencias ambientales. Es de suma importancia una producción limpia, que se define como un proceso productivo en el que se optan métodos, técnicas y



prácticas, tendientes a incrementar la eficiencia ambiental de los mismos en términos de aprovechamiento de la energía, de insumos y de prevención o reducción de la generación de residuos. Siguiendo estos principios podremos avanzar a través del desarrollo nacional de estos procesos sustentables donde se utilicen materiales de reciclaje y/o desecho, ya que nos preverá de beneficios ecológicos además de que socialmente será generador de nuevos empleos.

La utilización de residuos sólidos como tereftalato de polietileno, poliestireno expandido y neumáticos se empleará en uno de los campos más importantes para el desarrollo de cualquier nación, como lo es la construcción y más específicamente en el desarrollo de vías de comunicación que son las arterias vitales de un país porque son el medio principal de transporte de personas y bienes materiales, la superficies de rodamiento presentan defectos físicos que podrían verse disminuidos modificando las características de las mezclas asfálticas con las que están construidas. A través de esta investigación definiremos si es posible el empleo de dichos residuos en la elaboración de mezclas asfálticas para incrementar su durabilidad, disminuir costos y reducir la cantidad de residuos, utilizando los que gasten menos energía en el proceso de transformación y de los que haya mayor volumen.

8. Hipótesis

Con la incorporación de ciertos residuos sólidos en los materiales de construcción, más en concreto en el cemento asfáltico, se puede disminuir el daño al medio ambiente, causado por dichos residuos; y a la vez mejorar el desempeño físico-mecánico del asfalto que se implementara en las mezclas asfálticas.

9. Objetivo

Plantear un uso alternativo para reciclar, y con ello disminuir la disposición final de residuos sólidos como tereftalato de polietileno, poliestireno expandido y neumáticos mediante la incorporación de estos al cemento asfáltico utilizado en pavimentos flexibles.

Evaluar el comportamiento físico-mecánico del cemento asfáltico en las mezclas y el porcentaje óptimo de adición de dichos residuos sólidos.



10. Alcances

- ❖ Determinar el contenido óptimo de adición de residuos en el cemento asfáltico.
- ❖ Determinar el grado de desempeño de los asfaltos modificados.
- ❖ Evaluar el comportamiento físico-mecánico de los asfaltos modificados.

11. Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se consideraron los siguientes puntos:

- ❖ Revisión bibliográfica. Una vez revisado el estado del arte, se procedió a recabar información acerca de los porcentajes de adición que se han hecho en los cementos asfálticos
- ❖ Se realizó una experimentación preliminar donde se realizaron varias pruebas de mezclado y de adición de los residuos sólidos con diferentes porcentajes, y cada una de estas combinaciones fueron analizadas mediante las pruebas que a continuación se muestran.
 - a) Penetración a 25°C (M-MMP-4-05-006/00).
 - b) Método de prueba estándar para determinar la viscosidad del asfalto a altas temperaturas usando un Viscosímetro Rotacional (ASTM D 4402-15).
 - c) Método de prueba estándar para el punto de reblandecimiento del betún (ASTM D36-14).
 - d) Recuperación elástica por torsión en cementos asfálticos modificados (M-MMP-4-05-024-02).
- ❖ Diseño experimental de mezclas asfálticas, incluye la elección de los porcentajes de aditivos que se adicionaron a las mezclas asfálticas en función de lo reportado en la literatura y elección de pruebas realizadas. Con esta etapa preliminar se definió un porcentaje para el poliestireno expandido, se determinó la inviabilidad para utilizar el PET, se incorporó el polipropileno en pellets como un nuevo material con el porcentaje de 2.5 % respecto al peso del cemento asfáltico del cual ya había una referencia de trabajo en el Instituto Mexicano del Transporte y se determinó también el 6% de caucho molido y finalmente el SBS que es un material que se consideró para tener un parámetro de referencia de un material que es



comercial.

La experimentación subsecuente se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), en el Laboratorio de Infraestructura - División de Asfaltos y Mezclas Asfálticas; ubicado en el municipio de Pedro Escobedo, Querétaro.

El estudio consistió en evaluar el grado de desempeño de los ligantes adicionados con los materiales mencionados anteriormente mediante las propiedades reológicas. El Control fue denominado Ekbe, el modificado con Poliestireno expandido (EM), polipropileno (PP), Caucho molido de neumático (H6), Estireno- Butadieno- Estireno (SBS).

- ❖ La caracterización realizada en los ligantes conforme a la norma, para grado PG, fue:
 - a) Método estándar para determinar la densidad de materiales bituminosos método del picnómetro (ASTM D70-09).
 - b) Método de prueba estándar para determinación de la viscosidad del asfalto a altas temperaturas usando un Viscosímetro Rotacional (ASTM D 4402-15).
 - c) Método de prueba estándar para el punto de reblandecimiento del asfalto (aparato de anillo y bola, ASTM D36-14).
 - d) Método recuperación elástica por torsión en Cemento asfáltico modificado (M MMP 4 05 024/02).
 - e) Método de prueba para la determinación del grado PG (ASTM D6373-15).
 - f) Práctica estándar para determinar la tendencia de separación entre polímeros y asfalto modificado con polímeros (ASTM D7173-14).
 - g) Método de prueba estándar para el efecto del calor y el aire en una película móvil de asfalto (laminación). Ensayo de horno rotatorio de película delgada (ASTM D2872-12).
 - h) Método estándar para determinar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando un reómetro de corte dinámico (Condición RTFO, ASTM D7175-15).
 - i) Practica estándar para el envejecimiento acelerado de un ligante asfáltico utilizando una vasija de envejecimiento a presión (PAV) (ASTM D 2872-12).
 - j) Método estándar para determinar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando un reómetro de corte dinámico (Condición



envejecimiento en PAV, ASTM D 7175-15).

- k) Método estándar para determinar las propiedades reológicas de un ligante asfáltico utilizando un reómetro de corte dinámico (condición original, (ASTM D 7175-15).
- l) Método estándar para determinar la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el reómetro de viga a flexión (BBR, ASTM D 6648-08).

❖ Obtención y análisis de resultados

El sistema de clasificación, Grado PG, es la selección del ligante asfáltico indicado para el desempeño del pavimento deseado en términos de los tres modos de falla de un pavimento, deformación permanente (roderas), agrietamiento por fatiga y agrietamiento por baja temperatura. Esta caracterización mide las propiedades fundamentales (esfuerzos y deformaciones) del ligante en varias etapas y condiciones a lo largo de su vida útil.

El tema central de las especificaciones Superpave es la confianza sobre las pruebas del cemento asfáltico en condiciones que simulan las tres etapas críticas durante la vida del asfalto. Las pruebas realizadas en el asfalto original representan la primera etapa transportación, almacenamiento y manejo. La segunda etapa representa el asfalto durante la producción, mezcla y construcción; es simulada por las especificaciones mediante el envejecimiento del asfalto en el horno rotatorio de película delgada. La tercera etapa ocurre cuando envejece el cemento asfáltico desde que es colocado en la mezcla asfáltica, carpeta asfáltica, hasta el fin de su vida de diseño para la cual fue planeado.

12. Resultados y discusiones

Los resultados que se presentan son de los porcentajes de adición que se determinaron en función de la etapa preliminar.

12.1 Viscosidad rotacional

La viscosidad del asfalto está estrechamente relacionada con las temperaturas requeridas en las mezclas para su compactación durante la construcción de las carpetas asfálticas. La fluidez requerida del ligante facilitará su uso en el bombeo, en las operaciones de la planta y en el recubrimiento de los agregados

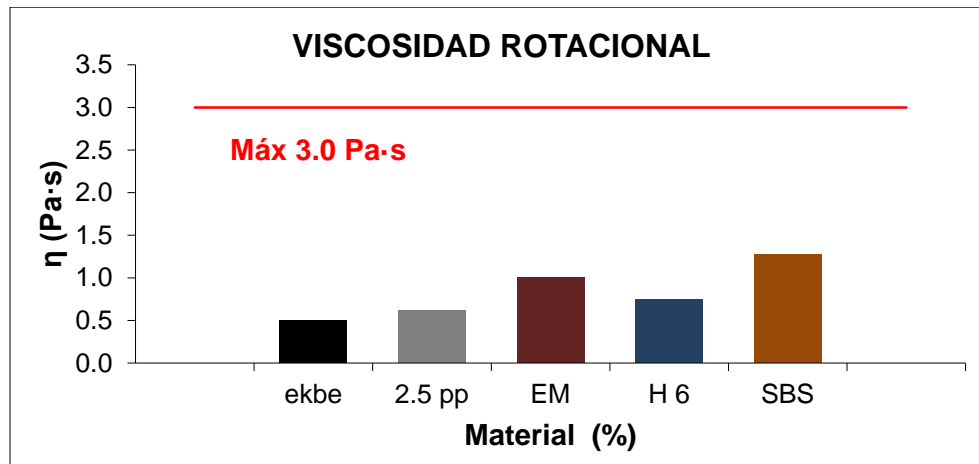


Figura 14 Viscosidad rotacional (ASTM D4402-15) en Ekbe, PP 2.5, EM, H 6 y SBS

En la figura 14 se observan los resultados de la viscosidad rotacional, η , a 135 °C, los cuales no sobrepasan el valor máximo establecido por normativa (3 Pa·s) (ASTM D4402-15) también se puede ver que todos los asfaltos modificados, presentan mayor viscosidad que el Control, pero no superior a lo indicado en la norma, esto indica que cualquiera de estos asfaltos modificados, son suficientemente fluidos para aplicaciones de ingeniería.

12.2 Densidad, método del picnómetro

La densidad de los materiales modificados y de la muestra control (Ekbe) se muestran en la figura 15, en ésta no se presentó ningún cambio significativo. Estos datos son requeridos para los cálculos volumétricos de las mezclas asfálticas.

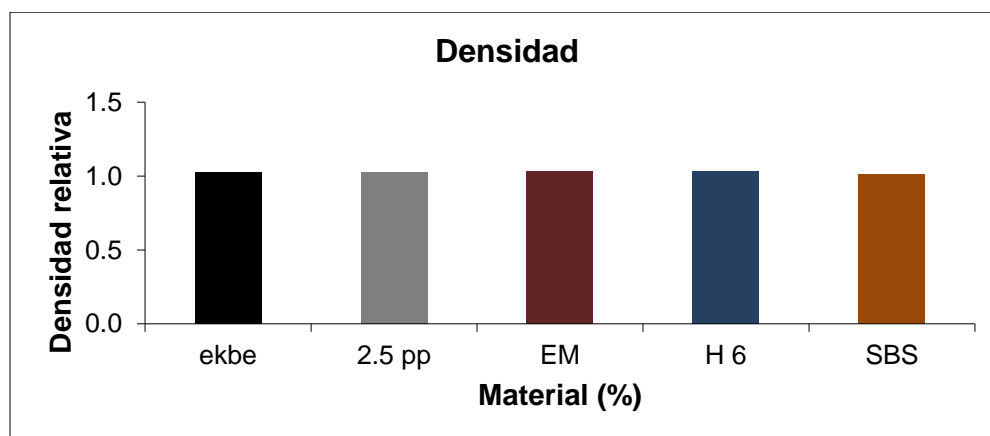


Figura 15 Densidad de materiales s por el método del picnómetro (ASTM D-07-09)



12.3 Punto de reblandecimiento.

El punto de reblandecimiento es útil en la clasificación de los asfaltos ya que es un indicativo de la tendencia del material a fluir a temperaturas elevadas que podrían presentarse durante el servicio del pavimento. Según la norma de la SCT N-CMT-4-05-002/06, se establece que un asfalto modificado debe cumplir con un punto de reblandecimiento mínimo de 55°C, por lo que los asfaltos modificados cumplen con lo indicado en la norma, puesto que se incrementa el punto temperatura al que se reblandecen (Figura 16).

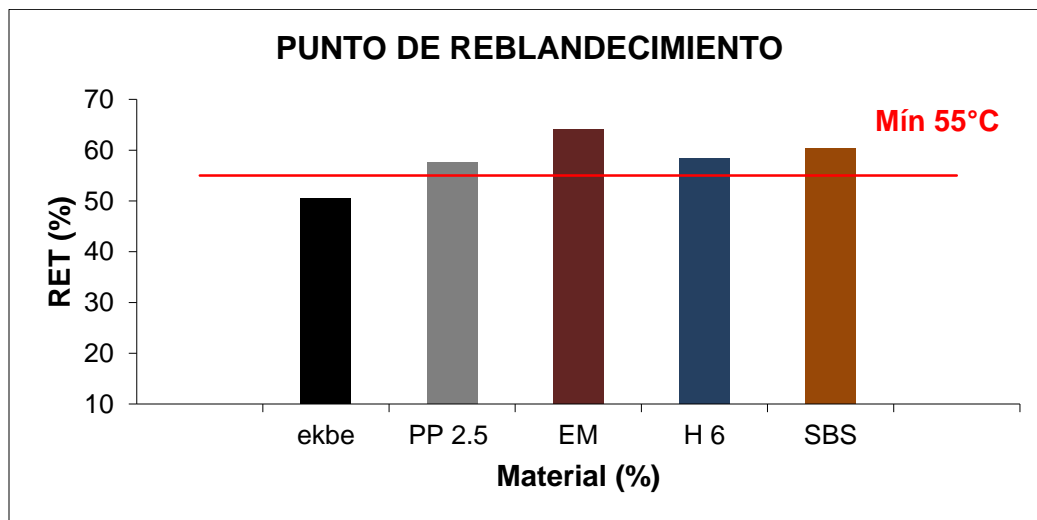


Figura 16 Punto de reblandecimiento (ASTM D36-14).

En la Figura 16 se observa el comportamiento de los asfaltos que fueron modificados con algún polímero. En la Tabla 4 se encuentran los incrementos que le confiere cada adición al asfalto respecto al control (Ekbe), se aprecia que EM es el que presentó el mayor incremento, en un 27%, esto se traduce en un aumento en el desempeño del cemento asfáltico en presencia de temperaturas elevadas, seguido del SBS el cual es un modificador comercial.



Tabla 4
Incremento del Punto de reblandecimiento

Material	Punto de reblandecimiento °C	Incremento respecto al control %
<i>Ekbe</i>	50.50	-
<i>PP2.5</i>	57.65	13
<i>EM</i>	64.15	27
<i>H6</i>	58.45	16
<i>SBS</i>	60.25	19

12.4 Recuperación elástica por torsión.

Este ensayo nos permite observar la capacidad de recuperación elástica en los asfaltos. Según la norma de la SCT N-CMT-4-05-002/06, establece que un asfalto modificado debe cumplir con una recuperación mínima de 35%. En la figura 17 se observa que los valores que arrojan EM y PP 2.5 en contraste con el Control son casi imperceptibles mientras que los valores de H6 y SBS son superiores al control, esto nos lleva a pensar que las adiciones de PP y EM no aportan elasticidad al cemento asfáltico.

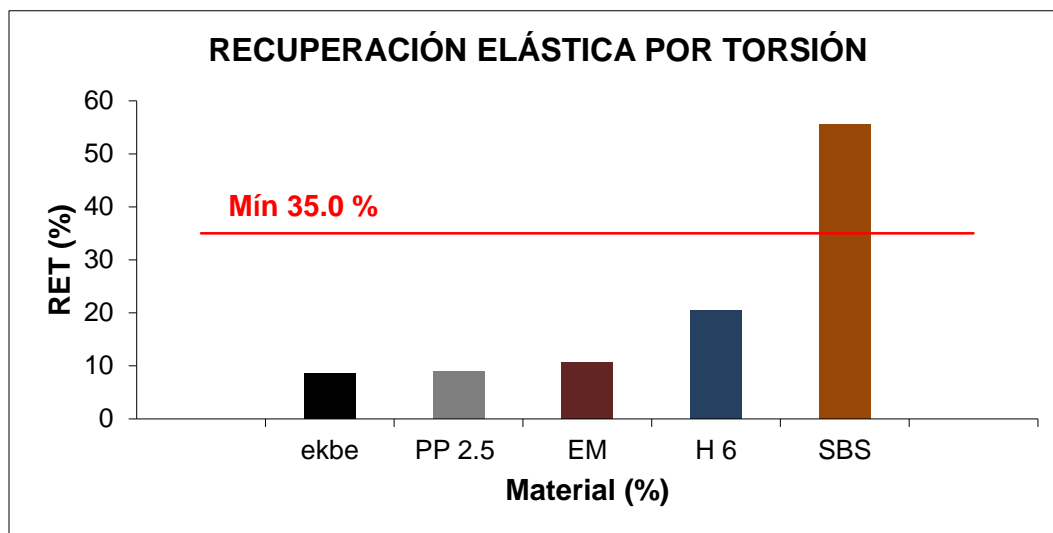


Figura 17 Recuperacion elastica por torsión (M-MMP-4-05-024-02).



12.5 Ensayo de película delgada en horno rotatorio en cementos asfálticos.

El mezclado y la agitación de la mezcla en caliente en planta y durante la puesta en obra son dos mecanismos que envejecen al asfalto, debido a las altas temperaturas y al flujo de aire involucrado en el proceso (oxidación).

Para el cambio de masa, se realizó el envejecimiento de película delgada en horno rotatorio, según la norma ASTM D2872 el cambio de masa puede ser de 1% como máximo, entonces el cambio de masa para los asfaltos modificados cumple con esta condición, en la figura 18 se observa que la inclusión de aditivo disminuye el porcentaje de pérdida de masa del asfalto en el caso de PP2.5 y EM.

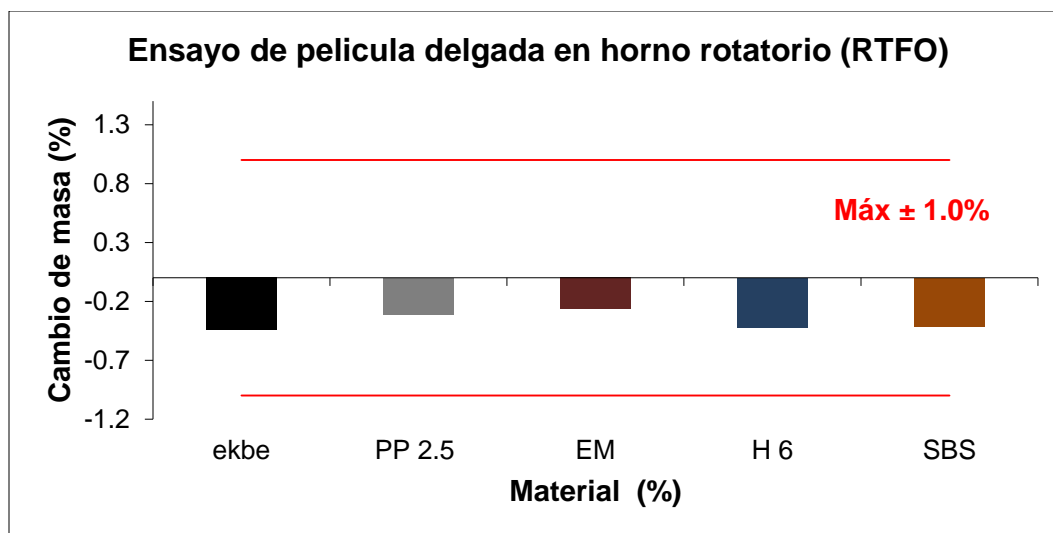


Figura 18 Cambio de masa después de RTFO (ASTM D2872-12)

En la tabla 5 se observa el porcentaje en que disminuyó la pérdida de masa en los asfaltos modificados con respecto al Control, se aprecia que EM es el que perdió menos masa, seguido de PP2.5, SBS y H6.



Tabla 5
Variación de pérdida de masa

Material	CM (%)	Variación
Control	-0.44	-
Control-EM	-0.31	-38%
Control-PP2.5	-0.27	-29%
Control-H6	-0.42	-5%
Control-SBS	-0.41	-7%

12.6 Ensaye de reómetro de corte dinámico en condición original (DSR)

El DSR se utilizó para medir el módulo de corte complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) del ligante asfáltico, el módulo de corte mide su resistencia total a la deformación, mientras que el ángulo de fase, caracteriza el tiempo de retardo entre el esfuerzo y la deformación. Se realizó el estudio haciendo un barrido de temperaturas de 46°C a 88°C. Los resultados mostrados a continuación se tomaron a partir de 64°C debido a que es la temperatura inferior con la que cumplió el Control (Ekbe) de acuerdo a lo indicado en la norma (ASTM D 7175-15)

En la figura 19, se aprecia que respecto al control todos los asfaltos modificados aumentaron el parámetro $G^*/\text{Sen } \delta$, la temperatura a la que el control cumple con el valor mínimo (1.0 KPa) fue a 64 °C, alcanzando su valor máximo en 82°C. Esto nos muestra el aumento que existe en la rigidez de todos los asfaltos modificados, es decir que presentan una mayor oposición a ser deformados y con ello disminuir la presencia de roderas en el pavimento, esto a las temperaturas críticas que de acuerdo a la norma serán los valores registrados mayores a 1.0 KPa.

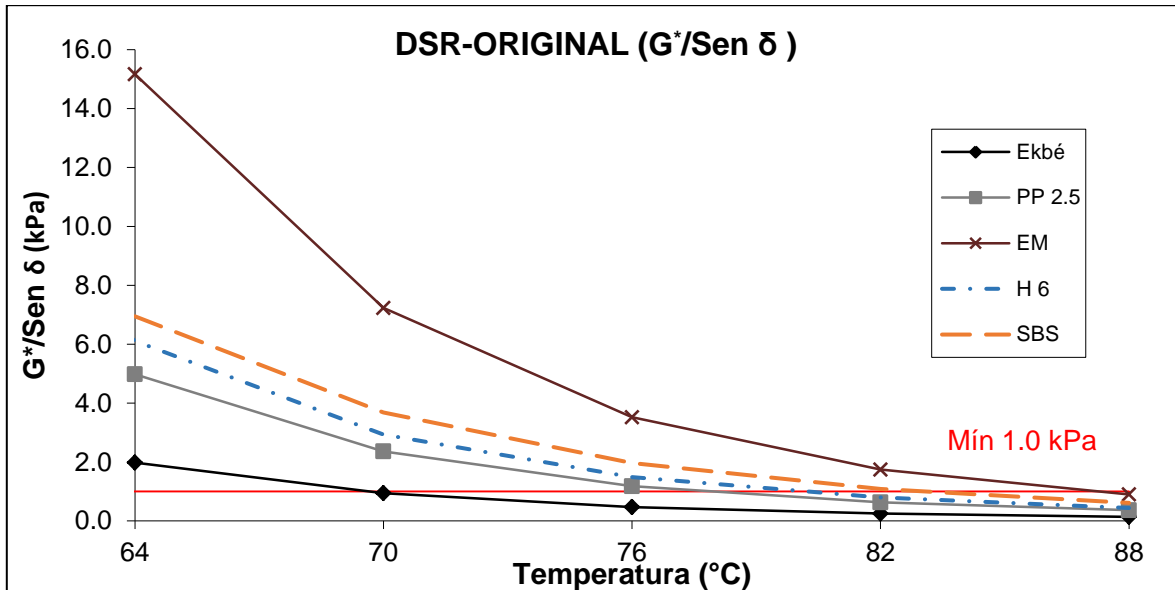


Figura 19 DSR en condición original (ASTM D 7175-15).

Tabla 6
Parámetro ($G^*/sen \delta$) de asfaltos modificados.

Parámetro	Temperatura °C	64	70	76	82	88
$G^*/sen \delta$ (kPa)	Control-Ekbe	1.98	0.94	0.47	0.25	0.14
	PP2.5	4.98	2.36	1.18	0.63	0.37
	EM	15.17	7.23	3.52	1.75	0.90
	H6	6.11	2.93	1.49	0.80	0.44
	SBS	6.95	3.68	1.97	1.09	0.62

En la tabla 6 se presentan los valores del parámetro $G^*/sen \delta$, se observa en la tabla que el ligante que presenta los valores más altos es EM, seguido de SBS y Caucho molido 6%, esto indica que la adición de poliestireno y Caucho molido de neumático mejoran el comportamiento del asfalto original ya que la temperatura crítica de este se mueve de 64°C a 76 y 82 °C. Por otro lado se aprecia que el comportamiento que tiene el Caucho molido y EM es muy parecido al SBS que es un asfalto que ya se comercializa.

Por otro lado en la figura 20 se pueden observar los cambios que presentan los ligantes en cuanto al comportamiento del ángulo de fase el cual nos habla de la medida en que se modifican las proporciones visco elásticas de los ligantes, también



se observa que el comportamiento del módulo de corte complejo en el caso de EM aumentó 7 veces, Caucho molido y SBS aproximadamente 3 veces y PP aumentó al doble, todos respecto a la muestra control, conforme aumenta la temperatura, estas diferencias son cada vez menores, debido a que con mayor temperatura el material tiende a comportarse como un fluido, el cual ya no resiste mayores esfuerzos. De aquí podemos decir que el parámetro de deformación observado en la figura 6 va acorde con el módulo complejo de la figura 20, ya que el parámetro de deformación disminuye en la misma proporción que el modulo G^* , por otro lado en esta misma figura también encontramos el comportamiento del ángulo de fase δ ($^\circ$) en el cual su valor va incrementando debido a que su recuperación elástica disminuye conforme aumenta la temperatura.

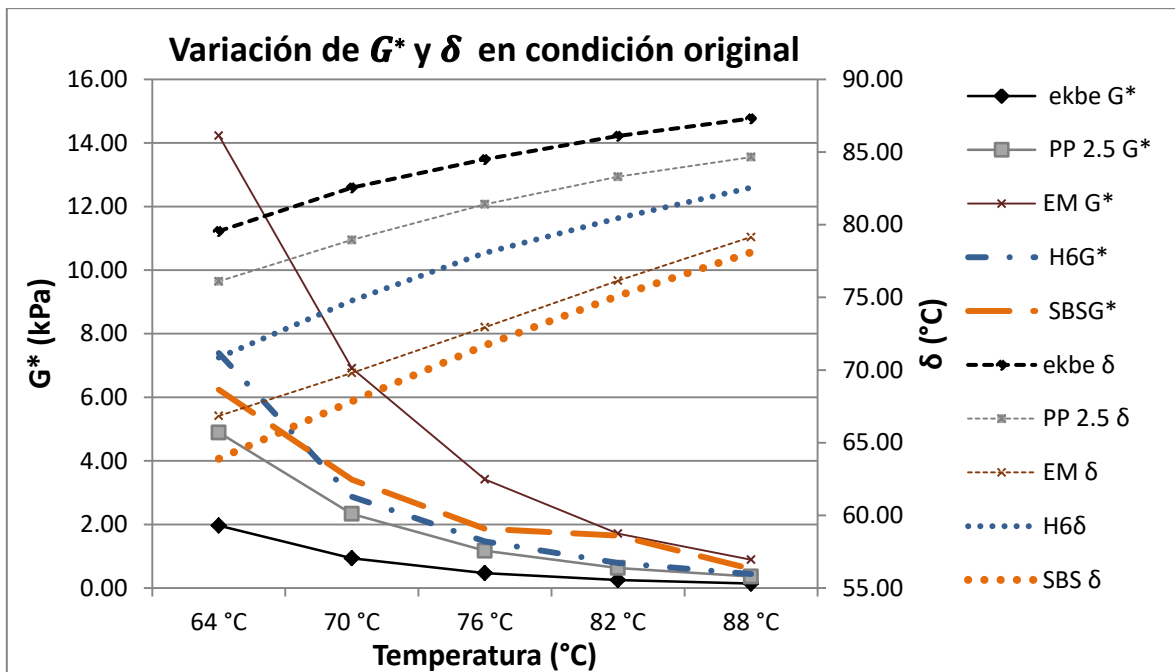


Figura 20 Variación de G^* y δ en condición original.

La tabla 7 presenta la variación que existe en el comportamiento del ángulo de fase de los ligantes modificados con respecto al control, arrojando valores que reducen dicho ángulo hasta en un 20% (SBS), otros como EM 15%, Caucho molido 11% y PP 4%. De manera general todos los cementos asfálticos modificados aportan mejoría a la relación visco elástica, siendo EM el de mejor comportamiento, pero si retomamos los resultados del ensayo de recuperación elástica en los que se dijo que no aportaban elasticidad, podríamos plantearnos entonces si dicho ensayo es

representativo o un buen indicador, si realmente puede detectar los cambios en cualquier tipo de material.

Tabla 7
Comportamiento del ángulo de fase a diferentes temperaturas.

	Temperatura	64°C	70°C	76°C	82°C	88°C
Ángulo de fase, δ (°)	Control-PP	-4%	-4%	-4%	-4%	-4%
	Control-EM	-15%	-14%	-11%	-9%	-7%
	Control-H6	-11%	-9%	-8%	-7%	-5%
	Control-SBS	-20%	-18%	-15%	-13%	-10%

12.7 Ensaye de reómetro de corte dinámico después de RTFO

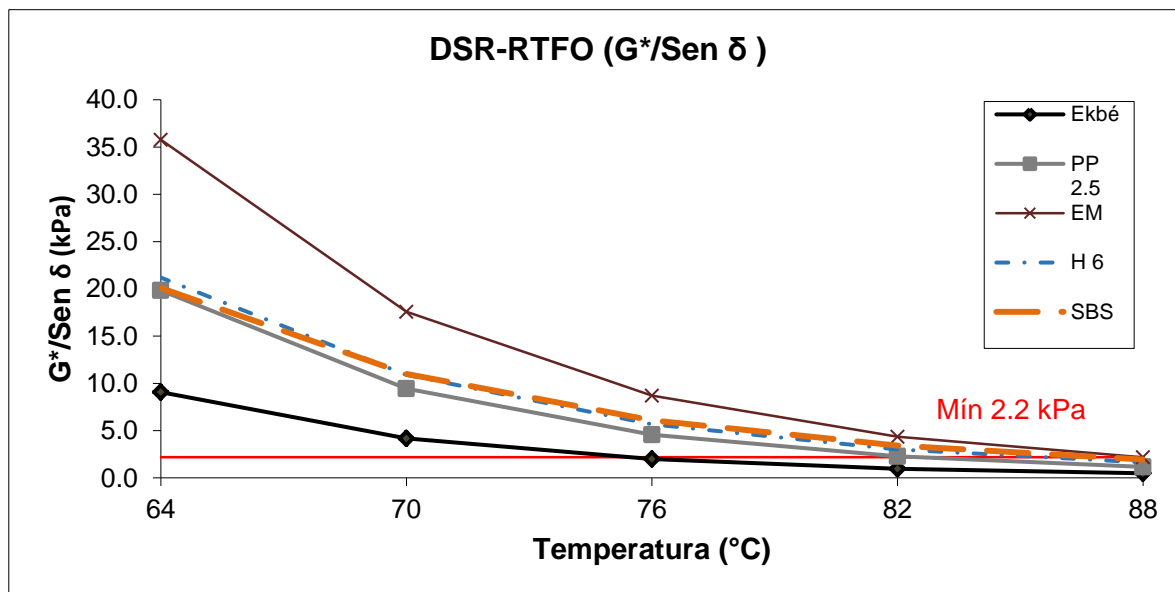


Figura 21 DSR en condición RTFO (ASTM D7175-15)



Tabla 8
Parámetro ($G^*/\text{sen } \delta$) después de envejecido el asfalto modificado en RTFO.

Parámetro	Temperatura	64	70	76	82	88
	°C					
Control-Ekbe		9.07	4.19	2	0.96	0.49
PP2.5		19.83	9.445	4.575	2.29	1.17
EM		35.77	17.575	8.705	4.35	2.175
H6		21.20	10.9	5.67	3.02	1.64
SBS		20.10	11	6.09	3.42	1.96

En la figura 22 y la tabla 8 se presentan los resultados después de RTFO para las temperaturas de cada ligante asfáltico, se observa que ahora la temperatura a la que la cantidad de asfaltos que cumplen con lo indicado en la norma (ASTM D 7175-15) es superior a la condición original, debido a que después del envejecimiento inicial (RTFO) el material adquiere mayor rigidez aumentando su resistencia al esfuerzo cortante. Ahora la temperatura en la que se cumple con el mínimo establecido para el caso control es de 70°C, y la de los cementos modificados es de 82 °C y 88 °C.

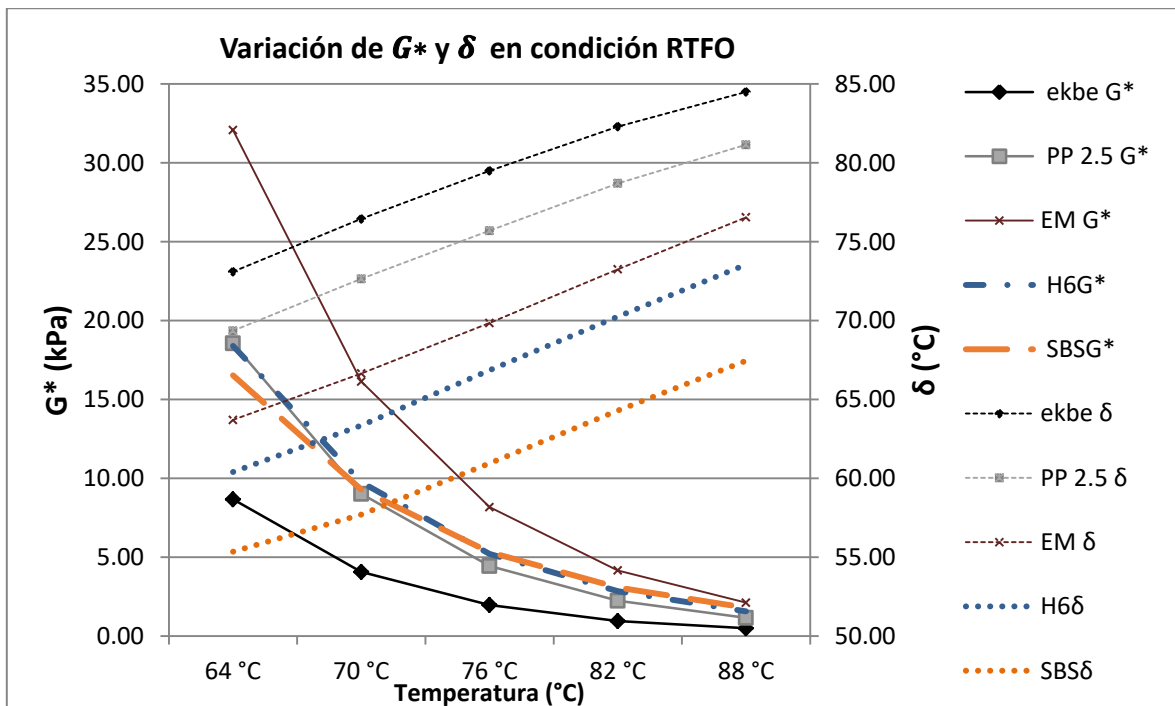


Figura 22 Variacion de G^* y δ en condición de envejecimiento (RTFO)



Tabla 9
Variación en número de veces que cambia la rigidez después de envejecido el asfalto.

Temperatura °C	64	70	76	82	88
N° de veces que aumenta G^* después de envejecido el asfalto					
Control-Ekbe	4	4	4	4	4
PP2.5	4	4	4	4	3
EM	2	2	2	2	2
H6	2	3	4	4	4
SBS	3	3	3	2	2

La tabla 9 y la figura 22 muestran que el módulo complejo de corte de los asfaltos después del envejecimiento aumentan con respecto a los presentados en la condición original, lo que indica que el envejecimiento tiene una influencia significativa en la visco elasticidad, para el control y PP la diferencia que existe entre los valores de antes y después de RTFO es mayor que para el resto de los asfaltos modificados, esto habla de una reducción de la susceptibilidad al envejecimiento en el caso de los asfaltos adicionados con poliestireno, Caucho molido y SBS.

En general, para todos los asfaltos convencionales y para la mayoría de los asfaltos modificados, la oxidación resultante durante la producción de la mezcla en caliente (HMA) se traduce en un incremento del módulo complejo G^* y en un decremento del ángulo de fase δ . Esto se traduce en una mayor resistencia a la deformación y en mayor elasticidad, lo que significa una mayor resistencia a la formación de roderas. Las propiedades iniciales del asfalto en el pavimento son más críticas desde el punto de vista de la deformación permanente, que las del asfalto envejecido, es por esto que el método de diseño Superpave especifica un límite mínimo para el valor de $|G^*|$ / en el asfalto original y en el asfalto envejecido en horno (RTFO).

12.8 Ensaye de reómetro de corte dinámico después de después de PAV

El procedimiento del ensaye del recipiente de envejecimiento a presión (PAV), especificado en ASTM D2872 -12, tiene como objetivo imitar la situación del ligante asfáltico después de 10 años de vida útil en el campo.

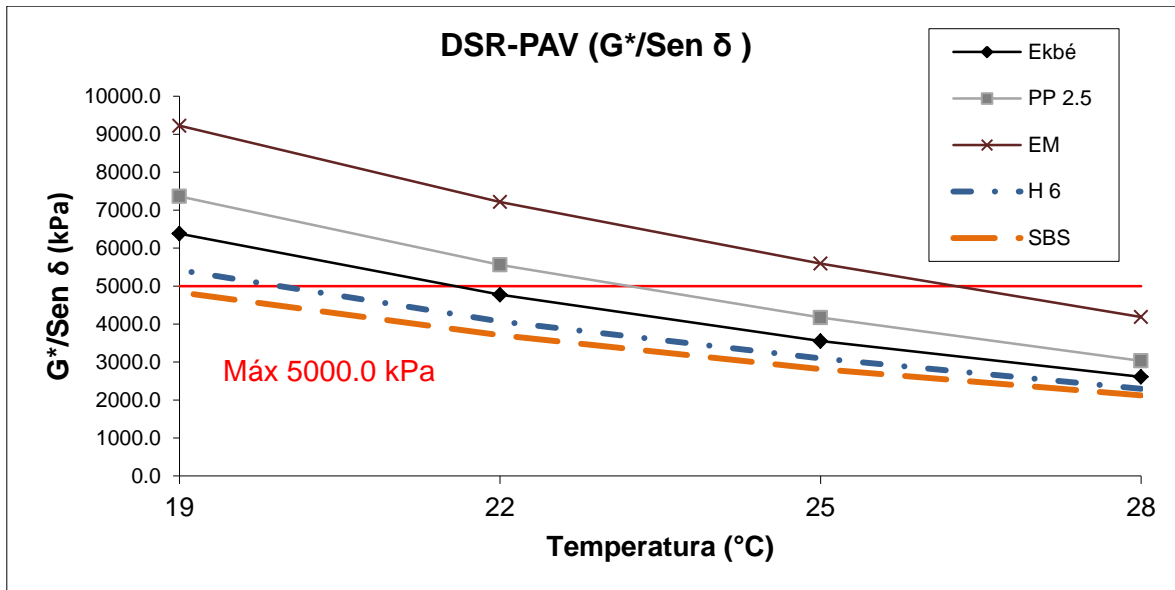


Figura 23 DSR despues de la condiñon PAV.

En la figura 23 se presentan los resultados de los ensayos de DSR-PAV a cuatro temperaturas diferentes con el cemento asfáltico envejecido en condición a largo plazo. En dichos resultados se puede observar que la variación en el parámetro $G^*(\sin\delta)$ aumenta conforme la temperatura disminuye, se observan las temperaturas críticas a las que los ligantes cumplen con el parámetro establecido por la norma, esto se traduce en que soportan mayores niveles de esfuerzo debido a que a temperaturas bajas el asfalto se vuelve más rígido. Este comportamiento fue general para todos los asfaltos estudiados. Es importante resaltar que el comportamiento que presenta el Caucho molido es muy parecido con el de SBS que es un modificador que ya se comercializa, esto nos indica que el Caucho molido le ayuda al asfalto mejorando su comportamiento respecto al ensayo de envejecimiento a largo plazo ya que no lo rigidiza tanto como sucede con el EM y en menor proporción también el PP, este comportamiento se verá reflejado en la durabilidad que la mezcla tendrá una vez puesta en servicio.

La figura 24 contiene el ángulo de fase de los ligantes, en dicha figura se puede apreciar que el comportamiento de los cementos asfálticos los cuales tienen una tendencia similar, aunque el comportamiento del Caucho molido se nota un tanto diferente, esto debido a que la modificación no es del todo homogénea. Los ángulos siempre están ubicados juntos el EM, Caucho molido y SBS debido a que son más elásticos que el control y PP, sin embargo SBS y Caucho molido son más elásticos



que rígidos porque en rigidez siempre sobresale EM.

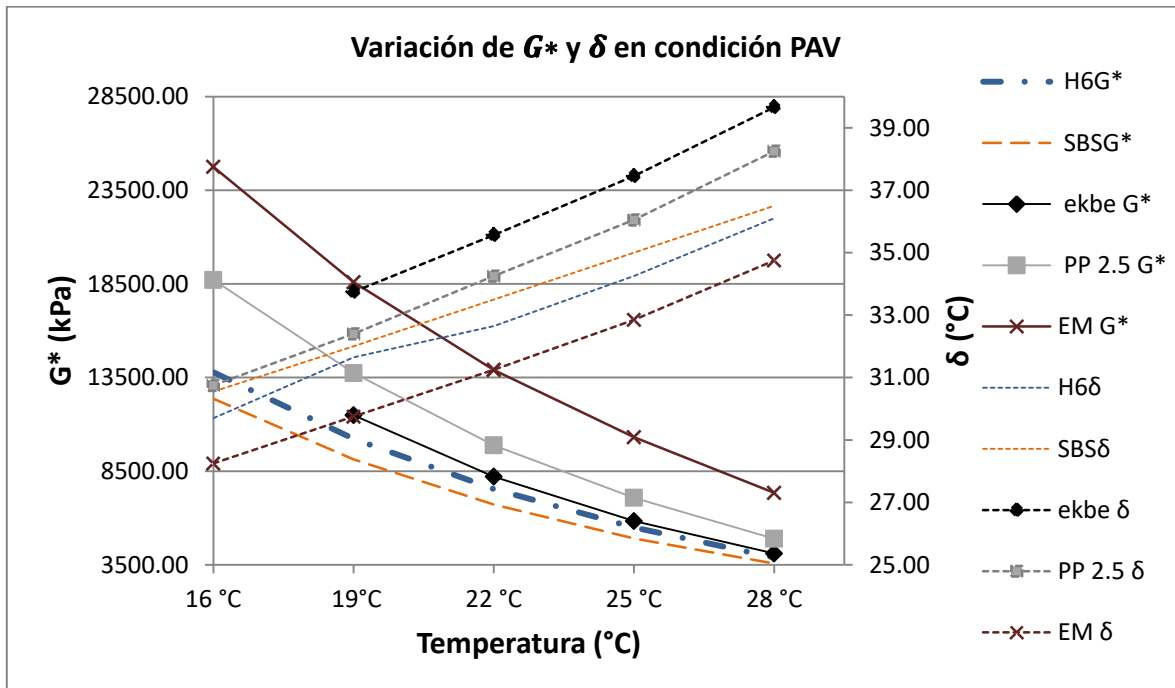


Figura 24 DSR condición PAV

12.9 Determinación de la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el reómetro de viga a flexión (BBR).

La prueba BBR evalúa el agrietamiento a baja temperatura del ligante, módulo de rigidez (S) y velocidad de fluencia (m). Durante el ensayo BBR, se aplica una carga de fluencia a una pequeña viga de asfalto que imita la tensión que se acumula en la estructura del pavimento cuando la temperatura está bajando.

Las figuras 25 y 26 muestran los resultados a tres temperaturas donde se puede observar a variación de la rigidez (S) y de la pendiente (m), también se identifica la temperatura crítica a la que el ligante presenta el desempeño requerido por la normativa (ASTM D 6648-08). Para la mezcla control (Ekbe) cumple a -6 °C al igual que SBS y H6%, para el caso de EM y PP presentaron el valor requerido a 0°C



(Figura 26).

El comportamiento general fue que a medida que la temperatura disminuye el módulo de rigidez (S) aumenta gradualmente, mientras que la velocidad de fluencia m disminuye. Esto se asocia a lo que ya se ha dicho de los materiales EM y PP, que aportan rigidez al asfalto. EM podría clasificarse como un plastómero ya que este aporta rigidez y un porcentaje de elasticidad, esto de acuerdo a lo que se ha observado durante todo el análisis reológico.

En la figura 25 se presentó un comportamiento por parte de PP atípico, esto es una dispersión del ensayo asociado al material heterogéneo.

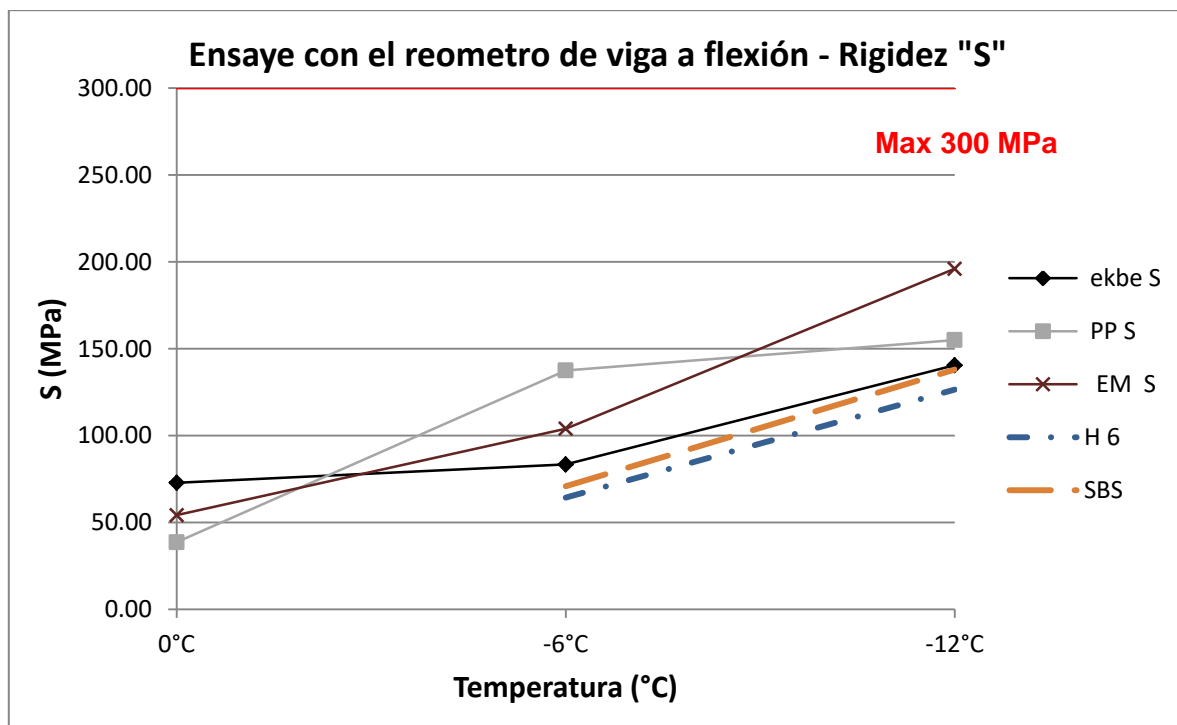


Figura 25 Ensayo de la determinación de la rigidez (S) por medio del ensayo de reometro de viga a flexión (BBR).

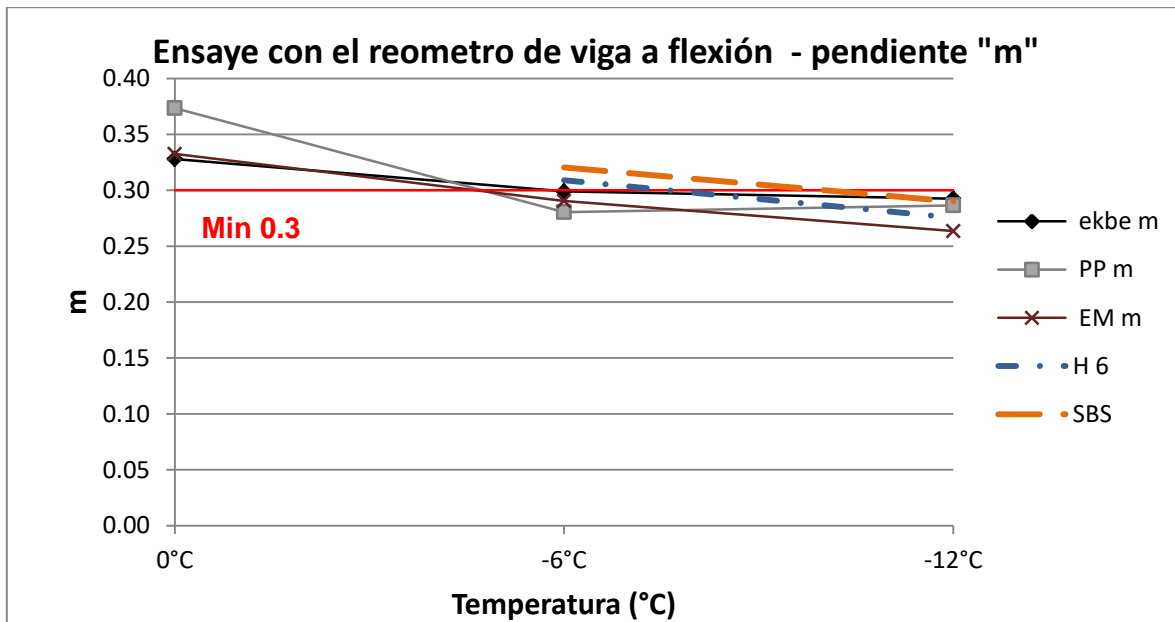


Figura 26 Ensayo para determinar la rigidez a flexión de un ligante asfáltico utilizando el reómetro de viga a flexión (BBR)

A la pendiente entre la rigidez (esfuerzo) y el tiempo, se le denomina m , entre mayor sea esta el asfalto es más flexible (elastoplástico) a una m menor el asfalto presentará una cristalización lo que conlleva a una falla frágil. Para el caso del Control, SBS y H6% se observa que a una temperatura de -6°C puede trabajar sin fallar por agrietamiento a bajas temperaturas y para los modificados la temperatura a la que pueden trabajar sin problema es a los 0°C . Esto puede traducirse en que, en términos generales, de las adiciones aquí presentadas unas le confieren rigidez al ligante y otras, elasticidad.

12.10 Prueba de Reología en el ligante adicionado con ETONIS 930,850 y con 6% de Caucho molido Retenido en la malla #.100.

La tabla 10, presenta los resultados del comportamiento reológico en condición original donde se puede observar que la adición de ETONIS 850 con 6% de Caucho molido modifica las propiedades reológicas del ligante disminuyendo el ángulo de fase e incrementando el módulo complejo y la tabla 11, presenta los valores del cemento asfáltico adicionado con Caucho molido 6% y ETONIS 930 de los cuales se puede decir que no le generó ningún cambio al asfalto.



La finalidad de realizar la adición del producto ETONIS es que en el mejor de los casos, no generará ningún cambio en el comportamiento reológico al asfalto, aunque por otro lado se esperaba que el aditivo ayudara a estabilizar al Caucho molido en la matriz de asfalto. En los resultados del ensaye siguiente (separación del polímero) se muestran también los resultados con ETONIS 930 y 850.

Tabla 10
Ensayo reológico en condición original ETONIS 850 + H6%

Ensayo reológico de corte dinámico (condición original)					
ASTM D7175-15					
Resultados		Temperatura (°C)			
		70	76	82	88
H6% ETONIS 850 1%	Módulo complejo, G* (kPa)	4.22	2.18	1.16	0.65
	Ángulo de fase, δ (°)	73.18	76.7	79.6	81.8
	Parámetro G*/ (kPa)	4.4	2.25	1.18	0.65
H6% ETONIS 850 2%	Módulo complejo, G* (kPa)	3.41	1.76	0.95	0.54
	Ángulo de fase, δ (°)	74.8	78	80.5	82.2
	Parámetro G*/ (kPa)	3.53	1.8	0.96	0.541
H6% ETONIS 850 3%	Módulo complejo, G* (kPa)	3.33	1.68	0.89	-
	Ángulo de fase, δ (°)	76.7	79.8	82.2	-
	Parámetro G*/ (kPa)	3.42	1.71	0.9	-

Tabla 11
Ensayo reológico en condición original ETONIS 930 + H6%

Ensayo reológico de corte dinámico (condición original)					
ASTM D7175-15					
Resultados		Temperatura (°C)			
		70	76	82	88
H6% ETONIS 930 1%	Módulo complejo, G* (kPa)	3.64	1.852	0.97	-
	Ángulo de fase, δ (°)	74.68	78.2	80.9	-
	Parámetro G*/ (kPa)	3.78	1.89	0.99	-
H6% ETONIS 930 2%	Módulo complejo, G* (kPa)	3.29	1.7	0.91	-
	Ángulo de fase, δ (°)	75.2	78.5	81.2	-
	Parámetro G*/ (kPa)	3.4	1.74	0.92	-
H6% ETONIS 930 3%	Módulo complejo, G* (kPa)	3.48	1.81	0.97	-
	Ángulo de fase, δ (°)	74.9	78.2	80.8	-
	Parámetro G*/ (kPa)	3.61	1.85	0.98	-



12.11 Separación del polímero mediante punto de reblandecimiento en ligantes modificados.

Otro aspecto muy importante a evaluar es la prueba de separación del polímero, mediante el ensayo de punto de reblandecimiento, el cual nos sirve para verificar que el ligante modificado con los aditivos sea estable al almacenamiento, esto lo vamos a verificar cuando la diferencia entre las temperaturas de reblandecimiento de las fracciones superior e inferior sea menor o igual que 2 °C en dicho ensayo.

Tabla 12
Ensayo de separación del polímero EM

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO EM		
Resultados	Repetición #1	Repetición #2
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	60.2	60.6
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	60.4	60.4
Diferencia de Temperaturas (°C)	0.2	0.2

Tabla 13
Ensayo de separación del polímero PP

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO PP		
Resultados	Repetición #1	Repetición #2
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	55.2	55
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	55.2	55
Diferencia de Temperaturas (°C)	0	0

Tabla 14
Ensayo de separación del polímero H6%

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO H6%		
Resultados	Repetición #1	Repetición #2
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	64	64
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	56.4	56.4
Diferencia de Temperaturas (°C)	7.6	7.6



Tabla 15
Ensayo de separación del polímero SBS

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO SBS		
Resultados	Repetición #1	Repetición #2
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	60.6	60.6
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	59.8	59.8
Diferencia de Temperaturas (°C)	0.8	0.8

Tabla 16
Ensayo de separación del polímero ETONIS 850 + H6%

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO H. RET#100 6% ETONIS 850			
Resultados	1%	2%	3%
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	63	64	63.8
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	56.2	56.4	56.4
Diferencia de Temperaturas (°C)	6.8	7.6	7.4

Tabla 17
Ensayo de separación del polímero ETONIS 930 + H6%

SEPARACIÓN DEL POLÍMERO-PUNTO DE REBLANDECIMIENTO H. RET#100 6% ETONIS 930			
Resultados	1%	2%	3%
Temperatura esfera 1 Inferior (°C)	63.4	64	64.2
Temperatura esfera 2 Superior (°C)	56.8	56	56.4
Diferencia de Temperaturas (°C)	6.6	8	7.8

La tabla 12 contiene los valores de punto de reblandecimiento para EM, de acuerdo a estos se dice que el material no presentó separación, ya que la diferencia de temperaturas de una esfera a otra no excede los dos grados permitidos por la norma, sin embargo es difícil cuantificar mediante este ensaye la separación ya que en los valores no se reporta separación, pero si analizamos la muestra restante en el contenedor con el que se realizó el ensaye se puede encontrar sedimentado el material de adición, además de que el valor de punto de reblandecimiento realizado en original (sin ningún procedimiento previo) es superior (64 °C) al mostrado en la tabla 12 (60°C). En la tabla 13 se presentan los resultados para PP que presenta



valores inferiores (55°C) que los originales (57.5°C), de manera general nos habla de una posible separación.

De igual manera la tabla 15 muestra valores de punto de reblandecimiento, esta vez de SBS (material que ya se comercializa) y vemos que el comportamiento de este es distinto del resto ya que la diferencia de temperatura es de 0.80°C , esto indica que es un material estable, que no se separa.

Las tablas 14, 16 y 17 presentan los resultados de punto de reblandecimiento adicionados con Caucho molido 6% y un aditivo para mejorar la estabilidad del Caucho molido. La diferencia que presenta el ligante de la tabla 14 es de 7.6°C esto es que el ligante si se separó del Caucho molido, por lo que se adicionó ETONIS 850 y 930 en diferentes porcentajes (1, 2 y 3% en peso del asfalto), resultados que se muestran en las tablas 16 y 17, sin embargo a pesar de esta adición se observa que el material se sigue separando de la misma manera, por lo que se observa que no le confiere ninguna mejora al ligante.

En seguida se muestra la clasificación a la que se llegó después de cada uno de los ensayos, la cual nos dictamina las temperaturas críticas altas y bajas a las que cada uno de estos ligantes estudiados puede trabajar. La tabla 8 contiene los parámetros permisibles, máximos y mínimos para clasificar, dentro de las temperaturas, a los ligante

Tabla 18

Clasificación PG de los cementos asfálticos

Grado de Desempeño	PG 64						PG 70						PG 76					PG 82				
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	< 64						< 70						< 76					< 82				
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C ^A	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
Asfalto Original																						
Punto de Inflamación, min °C	230																					
Viscosidad, D 4402: ^B , máx. 3 Pa·s, Temperatura de Prueba, °C	135																					
Corte dinámico, D 7175: ^C G ² /sinδ, min. 1.0 kPa. Geometría: 25mm, Separación: 1 mm. Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64						70						76					82				
Después de Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO - ASTM D 2872)																						
Pérdida de masa por calentamiento, %, máximo	1.00																					
Corte dinámico, D 7175: G ² /sinδ, min. 2.2 kPa. Geometría: 25mm, Separación: 1 mm. Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64						70						76					82				
Después de Envejecimiento en Vasija de Presión, Temperatura y Aire (PAV - ASTM D 6521)																						
Temperatura de envejecimiento de PAV; °C ^D	100						100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Corte dinámico, D 7175: G ² /sinδ, máx. 5000 kPa. Geometría: 8mm, Separación: 2 mm. Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Rigidez a flexión, D 6648: ^E S, máx. 300 MPa; m, min. 0.300. Temperatura de prueba @ 60 s; °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tensión Directa, P 252: ^E Deformación de falla, min. 1.0%. Temperatura de prueba a 1.0mm/min., °C	0	-6	12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24



^ALas temperaturas del pavimento son estimadas de la temperatura del aire utilizando un algoritmo contenido en el programa LTPP Bind; también pudieran ser especificadas por el proyectista.

^BEl método de referencia debe ser el de la norma D 4402 utilizando una geometría del #21 a 20RPM, sin embargo, métodos alternativos pueden ser utilizados para pruebas rutinarias y de aseguramiento de calidad. Si el ligante es muy rígido para utilizar la geometría #21, la #27 puede ser utilizada. El tamaño de la geometría y la razón de corte deberán ser reportados. Este requisito no es obligatorio, será a discreción de la agencia de especificación si el proveedor garantiza que el ligante asfáltico puede ser bombeado y mezclado adecuadamente a temperaturas que cumplan todos los estándares de seguridad aplicables.

^CPara el control de calidad de la producción de cementos asfálticos sin modificar, la medición de la viscosidad del cemento asfáltico original puede ser sustituida por las mediciones de corte dinámico $G^*/\sin\delta$ a temperaturas donde el asfalto se comporte como un fluido Newtoniano. Cualquier normativa para medir la viscosidad puede ser utilizada, incluyendo el viscosímetro rotacional o capilar (Métodos de Prueba D 2170 o D 2171).

^DLa temperatura de envejecimiento del PAV está basada en condiciones climáticas simuladas y es una de las tres temperaturas 90°C, 100°C o 110°C. Generalmente, la temperatura de envejecimiento del PAV es 100°C para PG58-xx y superiores. Sin embargo, para climas desérticos, se puede especificar una temperatura de 110°C para PG70-xx y superiores.

^ESi la rigidez se encuentra por debajo de 300 Mpa, la prueba de tensión directa no es requerida. Si la rigidez se encuentra entre 300 y 600 MPa, el requerimiento de deformación de falla de tensión directa puede ser utilizado en lugar del requerimiento de rigidez. El valor de la pendiente, m , requerido deberá ser satisfactorio en ambos casos. Si los valores de la rigidez y la pendiente son imposibles de obtener debido a que el ligante es muy blando a la temperatura de prueba, se considerará que el ligante cumple con dicha temperatura de prueba si cumple con los requerimientos de dicha temperatura menos 6°C.

Fuente: ASTM D6373 (2013)



Tabla 19
Clasificación por grado PG Control

RESULTADOS		Muestra:	CONTROL			
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	8.625 %	N/A	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	51.725 °C	N/A	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.031	N/A	
Grado PG - ASTM D6373-15						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.443 Pa·s	≤ 3 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	64 °C	G*/	2.025 kPa	≥ 1 kPa	
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.442%	≤ 1.0%	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	G*/	2.565 kPa	≥ 2.2 kPa	
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	25 °C	G*()	3551.5 kPa	≤ 5,000 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S m	75.500 MPa 0.306	≤ 300 MPa ≥ 0.300	
De acuerdo a la norma (ASTM D6373-16) el ligante asfáltico se clasifica como un:						
PG 64		-	16			



Tabla 20
Clasificación por el gardo PG EM

RESULTADOS		Muestra:	EM			
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	10.750 %	N/A	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	64.150 °C	N/A	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.035	N/A	
Grado PG - ASTM D6373-15						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	1.007 Pa·s	≤ 3 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*	1.745 kPa	≥ 1 kPa	
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.258%	≤ 1.0%	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*	4.350 kPa	≥ 2.2 kPa	
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	28 °C	G*(<i>t</i>)	4186.9 kPa	≤ 5,000 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S m	54.200 MPa 0.333	≤ 300 MPa ≥ 0.300	
De acuerdo a la norma (ASTM D6373-16) el ligante asfáltico se clasifica como un:						
PG 82		-	10			



Tabla 21
Clasificación por el grado PG PP

RESULTADOS		Muestra:	PP			
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	9.000 %	N/A	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	57.650 °C	N/A	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.027	N/A	
Grado PG - ASTM D6373-15						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.622 Pa·s	≤ 3 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	G*/	1.180 kPa	≥ 1 kPa	
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.312%	≤ 1.0%	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*/	2.285 kPa	≥ 2.2 kPa	
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	25 °C	G*()	4171.5 kPa	≤ 5,000 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	0 °C	S m	38.650 MPa 0.374	≤ 300 MPa ≥ 0.300	

De acuerdo a la norma (ASTM D6373-16) el ligante asfáltico se clasifica como un:

PG 76 - 10



Tabla 22
Clasificación por el grado PG Caucho molido 6%

RESULTADOS		Muestra:		CAUCHO MOLIDO-RET100-6%		
Propiedades Físicas						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	20.500 %	N/A	
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	58.450 °C	N/A	
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.031	N/A	
Grado PG - ASTM D6373-15						
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación	
Condición original						
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	0.748 Pa·s	≤ 3 Pa·s	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	76 °C	G*	1.485 kPa	≥ 1 kPa	
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12						
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.419%	≤ 1.0%	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*	3.015 kPa	≥ 2.2 kPa	
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13						
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A		
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	22 °C	G*(<i>i</i>)	4069.5 kPa	≤ 5,000 kPa	
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S m	64.350 MPa 0.309	≤ 300 MPa ≥ 0.300	
De acuerdo a la norma (ASTM D6373-16) el ligante asfáltico se clasifica como un:						
PG 76		-		16		



Tabla 23
Clasificación por el grado PG SBS

RESULTADOS		Muestra:		SBS	
Propiedades Físicas					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Recuperación elástica por torsión	M-MMP-4-05-024-02	25 °C	Re	55.50 %	N/A
Punto de reblandecimiento	ASTM D36-14	N/A	Pr	60.25 °C	N/A
Densidad relativa	ASTM D70-09	25 °C	G _b	1.01	N/A
Grado PG - ASTM D6373-15					
Ensayo	Norma	Temperatura de prueba	Parámetro	Resultado	Especificación
Condición original					
Viscosidad	ASTM D4402-15	135 °C	η	1.272 Pa·s	≤ 3 Pa·s
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*	1.085 kPa	≥ 1 kPa
Después de envejecimiento en Horno Rotatorio de Película Delgada (RTFO), ASTM D2878-12					
Cambio de masa	ASTM D2872-12	163 °C	CM	-0.414%	≤ 1.0%
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	82 °C	G*	3.415 kPa	≥ 2.2 kPa
Después de envejecimiento en Vasija de Presión y Temperatura (PAV), ASTM D6521-13					
Envejecimiento PAV	ASTM D6521-13	100 °C		N/A	
Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	ASTM D7175-15	19 °C	G*()	4838.6 kPa	≤ 5,000 kPa
Reómetro de Viga a Flexión (BBR)	ASTM D6648-08	-6 °C	S m	70.900 MPa 0.321	≤ 300 MPa ≥ 0.300
De acuerdo a la norma (ASTM D6373-16) el ligante asfáltico se clasifica como un:					
PG 82		-	16		



Finalmente se resumen los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Tabla 24
Clasificación por el grado PG(ASTM D6373-16)

Muestra	T. Alta °C	T. Baja °C	PG
Control	64	-16	64-16
PP	76	-10	76-10
EM	82	-10	82-10
Caucho molido	76	-16	76-16
SBS	82	-16	82-16

Lo que nos indica la caracterización de la tabla 24, es que las adiciones de EM y SBS son los que más incrementan la temperatura crítica de trabajo del ligante, y los que tienen un mejor comportamiento a temperaturas bajas son el Caucho molido y SBS. Sin embargo, EM y PP, reducen la capacidad de soportar bajas temperaturas por lo que aplicados a pavimentos serán más propensos al agrietamiento térmico.

13. Conclusiones

El cemento asfáltico es más utilizado en comparación con el cemento portland debido a que es económico, la contaminación por ruido es menor y es un material reutilizable y reciclable. El pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la intemperie. El presupuesto necesario para el mantenimiento, así como los problemas ambientales que de él se derivan, justifican la búsqueda de nuevas técnicas que permitan reducir costes y sean respetuosas con el medio ambiente sin disminuir sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Con los resultados analizados anteriormente se concluye que es viable el uso de los residuos estudiados como material de construcción, específicamente como modificadores del asfalto. No obstante es importante resaltar que el comportamiento a largo plazo y la estabilidad para el almacenamiento no fueron adecuados de acuerdo a la normativa utilizada por lo cual se recomienda seguir trabajando en el estudio de diferentes vías de incorporación que logren mejores resultados a largo plazo que la incorporación mecánica.



Las adiciones incrementan la rigidez del asfalto y por consiguiente incrementan la resistencia a la deformación. Por otro lado la separación que presentan las adiciones nos lleva a considerar en continuar con el análisis de dichas adiciones realizando más investigación; sin embargo con esta investigación se dejan las bases para continuar con nuevas líneas de investigación, por ejemplo realizar un estudio químico, que aporte conocimientos tanto del ligante como de cada una de las características de las adiciones recicladas.

Bibliografía

- Adam J. Kardos, S. A. (2015). Resistencia, durabilidad y propiedades ambientales del hormigón utilizando partículas de neumáticos reciclados para aplicaciones en pavimentos. *Adam J. Kardos a, Stephan A. Durham*, 832–845.
- Adilson Schackow, C. E. (2014). Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent. *Construction and Building Materials*, 190–197.
- Aguilar, A. C. (05 de 2013). Mejoramiento de Mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado. *Mejoramiento de Mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado*. Xalapa, Veracruz, México.
- Ambiental, O. P. (2005). *Informe de la evaluación regional de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe*. Washington.
- Ana Sofía Figueroa Infante, E. B. (Enero-Junio de 2009). Caracterización físicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ing. Univ. Bogota (Colombia)*, 13(1), 45-70.
- Ana Sofía Figueroa-Infante, E. B.-S.-L. (2009). Physicochemical and Micromorphological Evaluation of Asphalt Modified with Recycled Materials.



Ing. Univ. Bogotá (Colombia, 45-70).

Anabel Rojas Carmona, R. R. (22 de 04 de 2015). Experiencia de participación comunitaria para el manejo adecuado de residuos sólidos urbanos en México. *Global Health Promotion*, 22, 96-106.

Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, C. I. (2006). *Directrices para la gestión integrada y sostenible de residuos sólidos urbanos en América Latina y El Caribe*. Sao Paulo.

Asphalt Institute. (2001). Superpave Series No. 2 (SP-2).

ASTM. (2016). Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. *ASTM D 6373-16*.

Bhada-Tata, D. H. (2012). *What a Waste A Global of Solid Waste Management*. Banco Mundial, Washington.

Camara de diputados del H. consejo de la unión. (22 de Mayo de 2015). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos. *Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos*. Ciudad de México, Ciudad de México, Mexico: Diario oficial de la federación.

Chong-Qing Wang, H. W.-N. (2015). Separation of polyethylene terephthalate from municipal waste plastics by froth flotation for recycling industry. *Waste Management*, 42-47.

Chongzheng Zhu, H. Z. (2017). Aging rheological characteristics of SBR modified asphalt with multidimensional. *Construction and Building Materials*, 388-393.

D.Grossegger, B.-M. S. (2018). Influence of rheological and physical bitumen properties on heat-induced self-healing of asphalt mastic beams. *Construction and Building Materials*, 298-308.



- David C. Wilson, L. R. (02 de 2015). Global Waste Management Outlook. (D. C. Wilson, Ed.)
- Dongdong Ge, K. Y. (2016). Modification mechanism of asphalt binder with waste tire rubber and recycled polyethylene. *Construction and Building Materials*, 66-76.
- Eduardo Botero Jaramillo, L. M. (2014). Botero et al 2013. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, 207-219.
- Einara Blanco Machin, D. T. (2017). Energetic valorization of waste tires. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 306-315.
- Eroski Consumer*. (s.f.). Recuperado el 29 de 12 de 2017, de Eroski Consumer: http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2016/01/13/223208.php
- F. Pérez-Jiménez, R. M. (2006). Cohesion in crumb rubber modified bitumen. *Materiales de Construcción*, 43-54.
- Fan Yin, A. E.-M. (2017). Characterization of non-uniform field aging in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 607-615.
- Firas Awaja, D. P. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 1453-1477.
- Guido Acurio, A. R. (1997). *DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DEL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE*. Washington, D.C.
- Haolin Su, J. Y.-C. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 28-296.



- Henglong Zhang, Z. C. (2018). Evaluation of aging behaviors of asphalt binders through different rheological indices. *Fuel*, 78-88.
- Hugo A. Rendon Quintana, F. A. (Diciembre de 2011). Evaluacion de las propiedades mecanicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de PVC. *Tecno Lógica*, 27, 11-31.
- Hugo A. Rondón-Quintana, Y. M.-M.-L. (Julio-Diciembre de 2012). Influencia de la temperatura de compactación sobre la resistencia bajo carga monotónica de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho reciclado de llantas. *Tecno Lógicas*, 29, 13-31.
- Hugo Alexander, R. Q. (2008). BEHAVIOR OF A DENSE MIXTURE OF ASPHALT IN WARM MODIFIED WITH WASTE OF POLYCHLORIDE OF VINYL. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*.
- industrial, I. M. (2000). *Enciclopedia del plastico, tomo 3, caitulo 29*. Mexico, Ciudad de Mexico.
- institute, A. (2014). *SLideShare*. Recuperado el 25 de 02 de 2018, de SlideShare: <https://es.slideshare.net/QasimMasood1/ms-2-7th-edition>
- Instituto Nacional de Ecologia y Cambio Climatico, C. N. (2012). *Diagnóstico Básico para la gestión integral de los residuos*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. (s.f.). Recuperado el 11 de 12 de 2016, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385>
- Juan DanielMartínez, N. R. (2013). Waste tyrepyrolysis–Areview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179–213.
- Katherine Varón Valencia, J. P. (Enero-Febrero de 2015). Modelo Matematico para



la ubicación de estaciones de transferencia de residuos sólidos urbanos.
Revista EIA Escuela de Ingeniería de Antioquia, 12(23), 61-70.

Kennedy, T. W. (1994). Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of the SHRP Asphalt Research Program. *Washington, DC, EUA: Strategic Highway Research Program*.

KeZhen Yan, W. H. (4 de 08 de 2016). Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous ploy alpha. *Construction and Building Materials*, 25-265.

Lili Han, M. Z. (2017). Effect of nano silica and pretreated rubber on the properties of terminal blend crumb rubber modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 277-291.

Liliana Ivete Ávila Córdoba, G. M.-B. (2015). PET de Desecho y su Uso en Concreto. *Materiales Sustentables y Reciclados en la*, 95-122.

Luis F. Marmlejo, P. T. (11 de Diciembre de 2009). Flujo de residuos; Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y Competitividad*, 11(2), 79-80.

Mahyar Arabani, S. A. (2017). Assessment of mechanical properties of rice husk ash modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 350-358.

Martínez, N. M. (Marzo de 2015). Solid waste management in Mexico: between the intention and the reality. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*(17), 29-56.

Maza, F. G. (Diciembre de 2012). Análisis del ciclo de vida de materiales de construcción convencionales y alternativos. San Luis Potosi, San Luis Potosi, Mexico.

Medina-Salas, E. C.-G. (2013). Generación y Composición de Resduos Sólidos



- domésticos en localidades urbanas pequeñas en el estado de Veracruz, México. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 81-90.
- mixturesA, R. T. (s.f.). *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixturesA*.
- Mohiuddin Ahmad, H. M. (2017). Effects of pore structure on oxidative aging and related mechanical properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 636-641.
- Naturales, S. d. (1 de Febrero de 2013). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. *Establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuales están sujetos a Plan de Manejo, el listado de los mismos, el procedimiento para la formulación de los planes de manejo*. Mexico.
- ONU Medio Ambiente. (s.f.). Recuperado el 6 de 02 de 2017, de ONU Medio Ambiente:
<http://www.unep.org/newscentre/Default.aspx?DocumentID=26844&ArticleID=35410&l=en>
- Oscar JAVier Reyes Ortiz, J. F. (Diciembre de 2004). Incidencia del ahuellamiento y propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica po la adición de desperdicio de llanta usada. *Ingeniería y Competitividad*, 6(2), 46-55.
- Patricio Romero Flores Msc1, H. B. (s.f.). DISEÑO DE UN PAVIMENTOS FLEXIBLE ADICIONANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL CONSTITUTIVO JUNTO CON LIGANTE AC-20.
- Paul Garnica Anguas, H. D. (2004). *Comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con SBR*. Publicación técnica, Secretaria de comunicaciones y transportes, Instituto mexicano del transporte, Sanfandila, Queretaro.



- Paul Garnica Anguas, M. F. (2005). *Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas*.
- Pedro Lastra-González, I. I.-V.-P.-F. (2017). Analysis of the skid resistance and adherence between layers of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste. *Construction and Building Materials*, 163–170.
- Presti, D. L. (2013). Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 863-881.
- Qiang Wang, S. L. (2016). Weather aging resistance of different rubber modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 443-448.
- Qinglong You, J. M. (July de 2018). An experimentally-based viscoelastic behavior of asphalt mastic at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 177, 358-365.
- Robert T. Watson, T. W. (2005). *Millennium Ecosystem Assessment Board* (Vol. 1). (N. A. Robert Scholes, Ed.)
- Rojas-Caldelas, C. L.-A. (11 de Febrero de 2014). Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Mexicali, México: Retos para el logro de una planeación sustentable. *Información Tecnológica*, 25(3).
- Rubin, I. I. (2012). *Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones*. Mexico: Limusa, 1999.
- Ryan, P. G. (12 de 2013). Litter survey detects the South Atlantic 'garbage patch'. *Marine Pollution Bulletin*.
- S.E.Zoorob, J.-G. A. (2012). Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test. *Construction and Building Materials*, 734-745.
- S.M. Al-Salem, P. L. (2009). The valorization of plastic solid waste (PSW) by



primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals.
Progress in Energy and Combustion Science, 103-129.

Santiago Gil Redondo, A. C. (2012). Betunes modificados con polietileno reciclado, procedente del "contenedor amarillo", estables al almacenamiento. *ASEFMA*, 1-13.

SCT N-CMT-4-04/08 2008 . (s.f.). Obtenido de de Normativa para la Infraestructura del Transporte: Materiales Pétreos para Mezclas Asfáltica: <http://normas.imt.mx/>

SCT. (s.f.). *Normativa para la infraestructura del transporte*. Recuperado el 30 de 12 de 2016, de Normativa para la infraestructura del transporte: <http://normas.imt.mx/busqueda-desplegable.html#004>

Secret. (1999). Reciclado de plasticos-simbología para la identificación del material constitutivo de artículos de plástico-nomenclatura. *NMX-E-232-SCFI-1999*.

Secretaria de comunicaciones y transportes. (2006). Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas. *Características de los materiales*.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012. *Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2009-2012*. México.

Secretaria de Urbanismo y medio ambiente. (30 de 01 de 2008). Programa estatal para la prevención y gestión integral de los residuos en Michoacán de Ocampo. Michoacán, México.

Shbeeb, M. T. (2007). The Use of Polyethylene in hot Asphalt Mixtures. *American*



Journal of Applied Sciences, 390-396.

Silvia Angelone, M. C. (2016). Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Materials and Structures*, 49, 1655-1665.

Unidas, N. (2010). Ejecución del Programa 21 y del Plan para su ulterior ejecución, y aplicación de los resultados de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible.

W.C. Tang, H. C. (2014). Creep and creep recovery properties of polystyrene aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 338-343.

W.C. Tang, Y. L. (2008). Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement & Concrete Composites*, 403-409.

Xiang Shu, B. H. (2014). Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*, 217-224.

Xiaoyu Wu, S. W. (2016). Lightly pyrolyzed tire rubber used as potential asphalt alternative. *Construction and Building Materials*, 623-628.

XinQua, Q. M. (2018). Study on the effect of aging on physical properties of asphalt binder from a microscale perspective. *Construction and Building Materials*, 718-729.

Zhenqiang Han, A. S. (2017). Study on the optimum rice husk ash content added in asphalt binder and. *Construction and Building Materials*, 776-789.

Zoorob, S. C.-G. (2012). Zoorob, S., Castro-Gomes, J., PerelInvestigating the multiple stress creep recovery bitumen characterization test. *Construction and building Materials*(3), 734-745.



Zoorob, S., Castro-Gomes, J., Pereira, L., & O'Connel, J. (2012). Investigating the multiple stress creep recovery bitumen characterization test. *Construction and Building Materials*, 30, 734-745.