

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN ASFALTO 80/100  
MODIFICADO CON POLÍMEROS TERMOESTABLES (TE) NO REUTILIZABLES  
PRODUCTOS DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

**DEISSY CUERVO SÁNCHEZ  
MARÍA ALEJANDRA MEJÍA MANRIQUE**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C.**

**2013**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UN ASFALTO 80/100  
MODIFICADO CON POLÍMEROS TERMOESTABLES (TE) NO REUTILIZABLES  
PRODUCTOS DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS**

**Presentado por:**

**DEISSY CUERVO SÁNCHEZ - 811329  
MARÍA ALEJANDRA MEJÍA MANRIQUE- 820675**

**Proyecto de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero  
Civil, bajo la dirección de:**

**MSc. DANIELLA RODRÍGUEZ URREGO  
Directora de Proyecto de Grado  
Ingeniero Civil**

**PhD. CATALINA GÓMEZ HOYOS  
Co-Directora de proyecto de Grado  
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D.C.**

**2013**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

**Firma del Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

**Bogotá D.C, Diciembre de 2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por habernos bendecido y guiado a lo largo de nuestras carreras, por brindarnos la fortaleza, el empeño y la constancia para poder lograr todas las metas propuestas para este proyecto.

A nuestros padres y familiares por todo su apoyo, paciencia y comprensión en este largo camino, fueron los pilares fundamentales para superar cada obstáculo y momento de debilidad; gracias por creer en nosotras y darnos la oportunidad de culminar otra etapa académica de nuestras vidas.

A las docentes investigadoras Daniella Rodríguez y Catalina Gómez por habernos guiado y ayudado en este proceso investigativo para poder finalizarlo exitosamente.

A las empresas Gaia Vitare Ltda. e Incoasfaltos S.A por habernos cedido su tiempo y hacer que esta investigación pudiera realizarse.

A todas aquellas personas que nos brindaron su ayuda, no solo en el transcurso de esta investigación, sino a lo largo de toda nuestra carrera.

## GLOSARIO

**ASFALTO:** el asfalto es una mezcla sólida y compacta de hidrocarburos y de minerales que es usado como aglomerante en mezclas asfálticas empleada para la construcción de carreteras y autopistas.

**BETÚN O BITUMEN:** es una mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosa, negra, pegajosa, completamente soluble en disulfuro de carbono y compuesta principalmente por hidrocarburos aromáticos policíclicos.

**COMPUESTO DE MOLDEO EN LÁMINAS (SMC):** compuestos formados a partir de capas de material de refuerzo fibroso, comúnmente fibras de vidrio preimpregnadas con un sistema de resina.

**ELASTÓMEROS:** polímeros amorfos formados por macromoléculas que poseen un ligero entrecruzamiento espaciado notablemente, lo que les confiere la propiedad de la elasticidad.

**ESPUMA DE POLIURETANO:** polímero termostable utilizado como aislante térmico por su alta proporción de micro células cerradas, no conectadas entre sí.

**MATERIALES COMPUESTOS:** sistema o combinación de materiales constituido a partir de la unión (no química, insolubles entre sí) de dos o más componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades específicas.

**MEZCLA ASFÁLTICA:** es la combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas que se emplean en la construcción de firmes, ya sea en capas de rodadura o en capas inferiores.

**MONÓMERO:** compuesto químico de bajo peso molecular que tienen la propiedad de poder unirse a otras moléculas pequeñas para formar macromoléculas.

**PAVIMENTO:** es un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados.

**POLÍMERO:** material formado por macromoléculas constituidas por un elevado número de unidades estructurales que se repiten, denominados *monómeros*. Se pueden clasificar según su origen (Naturales y Sintéticos), por el tipo de aplicación en relación a sus propiedades mecánicas y térmicas (Termoplásticos, Termoestables y Elastómeros).

**RECICLAJE:** exponer una materia o un producto que ha sido utilizado con anterioridad ante un tratamiento que puede ser parcial o total y que tiene como objetivo obtener materia prima o incluso nuevos productos a partir del producto reciclado.

**SOSTENIBILIDAD:** hace referencia a atender las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social (es lo que se conoce como Triple Vertiente de la Sostenibilidad).

**POLÍMERO TERMOESTABLE O TERMORIGIDO:** son aquellos polímeros que por la acción del calor endurecen de forma irreversible y no se funden. Además al incrementar la temperatura se descomponen químicamente, están formados por macromoléculas reticuladas en el espacio, que en el proceso de endurecimiento, se reticulan más estrechamente.

**POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS:** son aquellos polímeros que se ablandan con el calentamiento y pasan del estado sólido a líquido viscoso (fundido), cuando se enfría desde el fundido vuelven al estado sólido en forma reversible, ya que el proceso de fusión/ solidificación es reversible. Entre los más conocidos PE, PP, PS, PVC.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>2 JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>16</b>
<b>3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>18</b>
<b>4 OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>5 ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>19</b>
5.1 ESCENARIO DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS Y LA SOSTENIBILIDAD.....	19
5.2 VISIÓN MUNDIAL DE ASFALTO– AGREGADO MODIFICADO CON POLÍMEROS	
23	
<b>6 ASFALTO.....</b>	<b>28</b>
6.1 DEFINICIÓN DEL ASFALTO .....	28
6.2 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ASFALTO .....	28
6.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO .....	28
6.3.1 <i>Asfaltenos.....</i>	<i>30</i>
6.3.2 <i>Maltenos .....</i>	<i>30</i>
6.3.3 <i>Hidrocarburos Saturados .....</i>	<i>31</i>
6.3.4 <i>Hidrocarburos Aromáticos .....</i>	<i>31</i>
6.4 CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO DE ACUERDO A SU ORIGEN .....	32
6.4.1 <i>Asfalto natural: .....</i>	<i>33</i>
6.4.2 <i>Asfaltos derivados del petróleo: .....</i>	<i>33</i>
6.4.3 <i>Cementos asfálticos sólidos .....</i>	<i>33</i>
6.4.4 <i>Asfaltos Líquidos .....</i>	<i>34</i>
6.4.5 <i>Emulsiones asfálticas.....</i>	<i>34</i>
6.5 PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS .....	35



6.6	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CEMENTO ASFÁLTICO CA 80/100. ....	36
<b>7</b>	<b>POLÍMEROS.....</b>	<b>37</b>
7.1	GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS .....	37
7.1.1	<i>Propiedades comunes de los polímeros.....</i>	<i>37</i>
7.2	CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS .....	38
7.2.1	<i>Clasificación según se estructuramolecular.....</i>	<i>40</i>
7.2.1.1	<i>Polimerización y estructura molecular.....</i>	<i>42</i>
7.2.2	<i>Clasificación de los polímeros sintéticos según su comportamiento físico .....</i>	<i>43</i>
7.2.2.1	<i>Polímeros termoplásticos.....</i>	<i>43</i>
7.2.2.2	<i>Elastómeros .....</i>	<i>45</i>
7.2.2.3	<i>Polímeros termoestables.....</i>	<i>45</i>
7.2.2.3.1	<i>Entrelazamiento y curado.....</i>	<i>46</i>
7.2.2.3.2	<i>Polímeros termoestables más comunes .....</i>	<i>47</i>
7.3	RECICLAJE DE POLÍMEROS .....	48
7.3.1	<i>Procesos de reciclado de polímeros termoestables .....</i>	<i>51</i>
7.3.1.1	<i>Proceso mecánico .....</i>	<i>51</i>
7.3.1.2	<i>Proceso térmico .....</i>	<i>51</i>
7.4	UTILIZACIÓN DE LOS POLÍMEROS TERMOESTABLES EN LA CONSTRUCCIÓN	
	52	
7.4.1	<i>Asfaltos modificados.....</i>	<i>53</i>
7.4.1.1	<i>Características del asfalto modificado .....</i>	<i>53</i>
7.4.1.2	<i>Asfalto Modificados con Polímeros.....</i>	<i>54</i>
7.4.1.3	<i>Elección del polímero compatible .....</i>	<i>55</i>
<b>8</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>56</b>
8.1	MATERIALES .....	56
8.1.1	<i>Asfalto.....</i>	<i>56</i>
8.1.2	<i>Polímero termoestable.....</i>	<i>56</i>
8.1.3	<i>Agregados.....</i>	<i>59</i>
8.2	PROCEDIMIENTO .....	59
8.3	ENSAYOS .....	61
8.3.1	<i>Penetración de los materiales asfálticos. AASHTO T 49 – 07.....</i>	<i>61</i>
8.3.2	<i>Punto de ablandamiento de materiales bituminosos. AASHTO T 53 – 09.....</i>	<i>62</i>
8.3.3	<i>Ductilidad de los materiales Bituminosos. AASHTO T 51-09 .....</i>	<i>63</i>
8.3.4	<i>Viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. AASHTO T 316 – 04 .....</i>	<i>64</i>
8.3.5	<i>Adherencia en bandeja. I.N.V.E 740-07 .....</i>	<i>66</i>

8.3.6 *Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua. AASHTO T 182 – 8467*

<b>9</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
9.1	REVISIÓN TIEMPOS DE MEZCLADO .....	69
9.2	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS .....	71
9.2.1	<i>Penetración de asfalto .....</i>	<i>71</i>
9.2.2	<i>Punto de ablandamiento .....</i>	<i>73</i>
9.2.3	<i>Índice de Penetración .....</i>	<i>74</i>
9.2.4	<i>Ductilidad .....</i>	<i>75</i>
9.2.5	<i>Viscosidad rotacional .....</i>	<i>76</i>
9.2.6	<i>Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua .....</i>	<i>79</i>
9.2.7	<i>Adherencia en bandeja .....</i>	<i>80</i>
9.3	REVISIÓN PRELIMINAR DE COSTOS.....	80
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de Reciclaje de Teléfonos Móviles en 11 Países.....	22
Figura 2. Mezcla Modificada con Polímeros por Vía Húmeda y Vía Seca.....	26
Figura 3. Ensayos Reológicos Asfalto Modificado .....	27
Figura 4. Composición del Asfalto .....	29
Figura 5. Conformación del Asfalto .....	29
Figura 6. Estructura de los Asfaltenos .....	30
Figura 7. Estructura de los Saturados .....	31
Figura 8. Estructura de los Aromáticos.....	32
Figura 9. Clasificación del Asfalto según su origen. ....	33
Figura 10. Estructura de los polímeros .....	40
Figura 11. Estructura de los Polímeros Según la Forma de las Macromoléculas.....	41
Figura 12. Polimerización por Adición.....	42
Figura 13. Clasificación de los Polímeros .....	43
Figura 14. Composición Promedio de Aparatos Electrónicos .....	49
Figura 15. Carcasas de Residuos Electrónicos Antes y Después.....	57
Figura 16. Partículas de Carcasa de Residuos Electrónicos Trituradas.....	58
Figura 17. Mezcla Asfalto Polímero.....	60
Figura 18. Metodología de Modificación del Asfalto.....	60
Figura 19. Ensayo de Penetración del Asfalto .....	62
Figura 20. Ensayo de Punto de Ablandamiento del Asfalto. ....	63
Figura 21. Ensayo de Ductilidad de los Materiales Asfálticos .....	64
Figura 22. Montaje del Equipo Brookfield DV-II .....	65
Figura 23. Muestras del Ensayo de Viscosidad. ....	66
Figura 24. Ensayo de Adherencia en Bandeja del Asfalto.....	66
Figura 25. Ensayo de Cubrimiento de los Agregados con Materiales Asfálticos.....	68
Figura 26. Asfalto Modificado con un Tiempo de Mezclado de 60 min.....	69
Figura 27. Fotos Microscópicas de Asfalto Modificado.....	70
Figura 28. Metodología Final .....	71
Figura 29. Ensayo de Penetración en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE) ..	72

Figura 30. Ensayo de Punto de Ablandamiento en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE) .....	74
Figura 31. Ductilidad en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE) .....	76
Figura 32. Viscosidad en Función de la Temperatura .....	77
Figura 33. Viscosidad en Función de la Velocidad de Rotación. ....	79

## LISTA DE TABLA

Tabla 1. Configuración Interna del Asfalto .....	28
Tabla 2. Características Típicas de un Asfalto 80/100. ....	36
Tabla 3. Polímeros de Adición de Uso Frecuente.....	39
Tabla 4. Polímeros de Condensación más Frecuente.....	40
Tabla 5. Resinas de Polímeros Termoplásticos .....	44
Tabla 6. Elastómeros más Comunes y sus Características .....	45
Tabla 7. Aplicaciones de los Polímeros Termoeestables.....	46
Tabla 8. Polímeros Termoeestables más Comunes. ....	48
Tabla 9. Ventajas de Modificación de los Distintos Tipos de Polímeros. ....	55
Tabla 10. Caracterización del Asfalto.....	56
Tabla 11. Granulometría del Material Antes de la Trituración.....	58
Tabla 12. Índice de Penetración en Función del Contenido de Polímero Termoeestable (TE).....	75

## **RESUMEN**

En el presente proyecto de grado se compararon las propiedades de un asfalto convencional 80/100 con las de un asfalto modificado con productos de residuos electrónicos, siendo estos constituidos por polímeros termoestables (TE). El estudio se fundamentó en la realización de ensayos reológicos (penetración, punto de ablandamiento, viscosidad rotacional y ductilidad) al asfalto modificado, con el fin de observar los cambios físicos y mecánicos del mismo ante la adición de TE. Los resultados mostraron que la modificación del asfalto con esta clase de polímero incrementó su resistencia a la penetración a 25 °C, aumentó su viscosidad y su rigidez a altas temperaturas; de igual manera se identificó que el porcentaje óptimo de sustitución de asfalto es de 25 p/p % , y que con adiciones por debajo de 40 p/p% se generaron cambios en el comportamiento reológico del asfalto, que entran dentro de los rangos permisibles para garantizar un buen funcionamiento de este durante su aplicación y vida útil.

## **PALABRAS CLAVES**

Polímero termoestable, residuos electrónicos, asfaltos.

## INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por el deterioro del medio ambiente y la constante búsqueda de nuevos materiales que permitan modificar las características mecánicas y reológicas del asfalto han incentivado investigaciones a nivel mundial para conocer el efecto producido por la adición de polímeros reciclados por vía húmeda o por vía seca al asfalto. Los polímeros se clasifican según su comportamiento a altas temperaturas en termoplásticos (TP) y termoestables (TE), generalmente los empleados en Colombia para la modificación del asfalto son aquellos que se deforman al ser calentados, denominados termoplásticos, como: poliestireno (PS), polipropileno (PP), polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), entre otros. Los polímeros termoestables (TE) o termorrígidos (Poliuretanos, resinas epóxicas o epoxi, resinas fenólicas, resinas de poliéster insaturado, silicona, etc.) se les conoce como materiales irreversibles al calor y se caracterizan por tener mejor resistencia al impacto, a los solventes, a la permeación de gases y a las temperaturas extremas. La gran mayoría de compuestos y aparatos electrónicos están conformados por polímeros termoestables. Actualmente, los residuos compuestos de polímeros termoestables son desechados en vertederos o incinerados, lo que conlleva a un incremento en la contaminación del medio ambiente y una pérdida de material potencialmente útil para ser reutilizado en aplicaciones ingenieriles, como en el caso de los polímeros termoplásticos, que son utilizados como modificadores de mezclas asfálticas.

Por lo tanto, este proyecto consiste en investigar el comportamiento físico y reológico del asfalto al ser modificado con un TE, producto de residuos electrónicos como carcasas de celulares, computadores, entre otros, con el fin de poder dar a conocer la reutilización de un desecho no biodegradable en el área de pavimentos.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El siglo XXI se ha caracterizado indiscutiblemente por el apresurado avance de las tecnologías de la información que mejoran cada día la calidad de vida del ser humano, lo que genera como consecuencia un incremento en el consumo de aparatos electrónicos a nivel mundial, aumento de la población y la demanda de grandes urbes e infraestructuras que permitan suplir las diversas necesidades de la sociedad como: transporte, vivienda, redes sanitarias y de abastecimiento, entre otras (Rodríguez, Martínez, Rodríguez, Hernández, & Armenteros, 2011). La revolución tecnológica se ha convertido hoy por hoy en un grave problema social y ambiental (Ott, 2008) debido a que se están incrementando los volúmenes de aparatos electrónicos obsoletos, el gran problema también radica en que no solo se están desechando aquellos que han llegado al final de su vida útil, sino que además el paso incansable del desarrollo tecnológico ha propiciado el desuso de aparatos, tales como, los celulares y computadores que apenas alcanzan a cumplir periodos de uso menores al año (Ott, 2008). Según estadísticas del Programa de la Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA) anualmente se producen 5 millones de toneladas de basura electrónica en el mundo, de las cuales, de acuerdo al mismo ente, Brasil que es el líder en América Latina, produce más de 368.000 ton, seguido por México con 300.000 y Colombia con más de 36.000 ton; proyecciones para el año 2020 auguran que el volumen de los residuos electrónicos crecerá un 500% en países emergentes como China, India, Brasil y México (Maza, 2011). Por su parte en Colombia, según cifras del Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, se calcula que al finalizar este año se desechen aproximadamente 143.000 ton de residuos electrónicos de computadores, celulares y televisores.

A partir de las preocupantes estadísticas, muchos son los países que dentro de su legislación han implementado políticas públicas en materia de residuos electrónicos, en particular en América Latina: Chile, Colombia, México y Brasil (Ripley, 2008), sin embargo, en Colombia aproximadamente el 80% de los residuos terminó en vertederos y rellenos sanitarios (Peña, 2011), generando impactos negativos en el medio ambiente a consecuencia del contenido tóxico (metales pesados) que se libera al ser desechados (Hidalgo, 2012).

La problemática se centra en qué hacer con los residuos electrónicos en un mundo que requiere preservar materiales naturales y sustituirlos por materiales reciclados que permitan construir ciudades eficientes para mitigar el impacto negativo generado por la intervención del hombre. En este punto, incide directamente la Ingeniería Civil, que tiene la necesidad de encontrar materiales que puedan ser reutilizados al final de su vida útil para modificar, por ejemplo, el asfalto, con el fin de obtener mejores características reológicas y mecánicas que permitan a los pavimentos tener mayor durabilidad. Aunque existe un déficit en las investigaciones relacionadas con el uso de residuos eléctricos como modificadores de las propiedades del asfalto, entre las pocas que se han llevado a cabo, como la realizada por Guo, Wang & Xu (2008), los resultados han sido positivos, en cuanto, la adición de tarjetas de circuitos pulverizadas ha permitido obtener un asfalto con mejor comportamiento a altas temperaturas y menor susceptibilidad térmica. Por ende, dentro de la vía del reciclaje de residuos electrónicos se debe tener en cuenta el poder incluirlos en proyectos investigativos, ya sea dentro de la Ingeniería Civil como en otras profesiones, que permitan su eficiente reutilización.

## 2 JUSTIFICACIÓN

La acumulación de residuos sólidos es un inconveniente que la sociedad actual afronta globalmente como un problema ambiental creciente. En Colombia, cada ciudadano genera aproximadamente 1 kg de basura al día constituido por residuos sólidos en un 60% y en un 30% por envases y embalajes desechables no renovables (Reyes y Figueroa, 2008). En el país y en particular en Bogotá, el reciclaje de polímeros es secundario, comparado con los demás materiales de desecho, de acuerdo con promedios históricos, aproximadamente 16.500 ton de plásticos se destinan en el relleno sanitario de Doña Juana (CEMPRE, 2013). Se generan entonces grandes proporciones de desechos tales como papel, cartón, plástico, vidrio, residuos electrónicos, poliestireno expandido, entre otros, que por sus propiedades algunos pueden ser reciclados y reutilizados en el mejoramiento del comportamiento reológico y mecánico de los asfaltos, aún así en el caso de las modificaciones de asfaltos con estos residuos solo se ha optado por el aprovechamiento de aquellos que tienen propiedades termoplásticas (PE, PP, PB, PS, PVC, PET) “conociendo que estos materiales son reutilizables”, esto debido a que los polímeros termoplásticos pueden ser fundidos, remodelados y enfriados repetidas veces, además, como lo



afirma Montejo (2002): “son compatibles con el asfalto debido a su baja polaridad, baja temperatura de transición vítrea que permite mejorar problemas de deformación del asfalto a bajas temperaturas y por su elevado peso molecular permite eliminar los riesgos de altos valores de viscosidad” (p. 624). En diferentes investigaciones y trabajos de grado dentro del periodo 2000-2012, adelantadas por distintas universidades en Bogotá como: la Universidad de los Andes, Pontificia Universidad Javeriana, la Universidad Nacional de Colombia, entre otras, se identifica que para la modificación de asfaltos se han utilizado únicamente polímeros termoplásticos, dentro de los cuales se tiene que el 10% de las investigaciones ha utilizado Polietileno (PE), el 30% Polipropileno (PP), el 10% Poliestireno (PS), el 40% Policloruro de Vinilo (PVC) y finalmente el 10% Polietileno tereftalato (PET).

De acuerdo a las investigaciones de Mayorga & Morris (2008) y Madrid & Salas (2006), los principales modificadores de las mezclas asfálticas por vía húmeda o por vía seca son: la viruta de ganchos de polipropileno utilizados para colgar ropa, el caucho de llanta (polímero termoestable), las tiras de bolsa de leche (polietileno de baja densidad), entre otros. La investigación de mayor relevancia nacional con el uso de residuos fue la adelantada por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y otras entidades educativas que consistió en el uso de desperdicios de caucho de llanta, los resultados fueron alentadores al demostrar un mejor comportamiento a la fatiga respecto a la mezcla sin modificar y por tal motivo se ha empleado a nivel mundial.

Por la carencia de investigaciones relacionadas con la utilización de residuos de polímeros termoestables (TE) diferentes a los residuos de caucho de llantas en Colombia y teniendo en cuenta las características mecánicas y químicas que tienen esta clase de polímeros, como la baquelita y las resinas epóxicas (rigidez, estabilidad dimensional, resistencia al impacto, entre otras), la idea de incluir desperdicios de polímeros termoestables (enchufes, asas de recipientes, colchones, botones, carcasas de celular, aparatos electrónicos, rellenos de tapicería, etc.) por vía húmeda para el análisis del comportamiento de la mezcla asfalto-polímero, podría hacer parte de una estrategia para optimizar los procesos constructivos de los proyectos viales en Colombia y ampliar el rango de materiales de desechos que se pueden utilizar para producir

asfaltos modificados, sin dejar a un lado el beneficio de contribuir al reciclaje de esta clase de polímeros reduciendo el nivel de contaminación en el medio ambiente.

### **3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cómo es el comportamiento reológico de un asfalto 80/100 modificado con polímeros termoestables (TE) no reutilizables productos de residuos electrónicos?

### **4 OBJETIVOS**

#### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar los cambios reológicos de un asfalto 80/100 modificado con un TE producto de residuos electrónicos.

#### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Conocer el comportamiento reológico de un asfalto 80/100 al modificarlo con un polímero termoestable.
- Identificar los beneficios y desventajas de la utilización de un asfalto modificado con polímero termoestable producto de residuos electrónicos respecto a un asfalto convencional.
- Determinar el porcentaje óptimo de sustitución de asfalto por polímero termoestable producto de residuos electrónicos.

## 5 ESTADO DEL ARTE

### 5.1 ESCENARIO DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS Y LA SOSTENIBILIDAD

Los recursos naturales son necesarios para la fabricación y construcción de elementos estructurales a nivel mundial, por esta razón, la limitación de los mismos está aumentando diariamente, lo que hace necesario priorizar los materiales que llegan al final de su vida útil. Se estima que en Europa, aproximadamente 1 millón de toneladas de materiales compuestos de matriz termoestables se fabrican cada año (Pickering, 2005), y 12 millones de toneladas de residuos de plásticos son actualmente dejados en los vertederos (Silva, Machado, Oliveira, & Costa, 2011). A partir de esta problemática, se están incrementando las técnicas de reciclaje a nivel industrial; pero como lo menciona Pickering (2006) los incentivos económicos para reciclar cada vez son menos prósperos, debido a que la disposición en vertederos de los residuos de materiales compuestos de matriz termoestables es más económica, lo que provoca directamente la contaminación del medio ambiente y la pérdida de materiales potencialmente reutilizables.

La versatilidad de los polímeros ha generado un incremento en su consumo en los últimos 50 años (Martinez, 2010), propiciando una mayor contaminación y una inminente problemática ambiental a consecuencia de su baja velocidad de degradación (aproximadamente 500 años). En Bogotá D.C. se estima que la producción diaria de residuos de polímeros corresponde a 729,53 ton (FUNDES, 2010), por lo tanto en relación a esta problemática se ha venido investigando en los últimos años cómo darle uso a los polímeros como residuo (Rondón, Moreno, Rodriguez, & Lee, 2009).

Por consiguiente para abordar esta problemática es importante conocer que los polímeros pueden ser termoplásticos o termoestables dependiendo de la estructura química de su enlace, siendo los primeros polímeros reciclables gracias a su capacidad de poder reprocesarse por medio de procesos térmicos, y los segundos, polímeros no reciclables debido a que ningún proceso ni térmico ni físico permite reprocesarlos (Pickering, 2005); sin embargo, según Silva et al. (2011), el utilizar polímeros termoestables productos de residuos en mezclas asfálticas, podría

considerarse como una tecnología sustentable y de este modo reducir el impacto ambiental que se generaría el dejarlos en vertederos o incinerarlos al aire libre. Los materiales compuestos de matriz termoestables son utilizados en diferentes productos, como ejemplo: las resinas de poliéster reforzadas con fibras de vidrio son empleadas donde no se requieren propiedades mecánicas altas, y las fibras de carbono y resinas epoxi son usadas en la industria aeroespacial, en donde se exigen propiedades específicas muy altas para usos más demandantes (Pickering, 2005), no obstante, una de las principales aplicaciones de los polímeros termoestables son los aparatos electrónicos. Varias son las propuestas en cuanto a tecnología de reciclado para materiales compuestos de matriz termoestables, basadas en dos técnicas de reprocesamiento: trituración mecánica (reducción de su tamaño) y procesos térmicos (rompimiento del desecho en materiales) (Pickering, 2005).

En las últimas décadas la cadena de suministro de aparatos electrónicos va cambiando diariamente e incrementando lo que se denomina hoy la basura electrónica “residuos de aparatos electrónicos” (Ravi, 2011). Greene (2000) identificó en sus investigaciones que la vida útil de una computadora es de tres años, por otro lado la producción de residuos electrónicos crece 2.3 veces más rápido que otros tipos de residuos como: papel, cartón, etc; generando en el mundo entre 20 y 50 millones cada año, de toneladas de residuos electrónicos (Jiuyong, Jie, & Zhenming, 2009). La basura electrónica está compuesta de varios materiales y distribuida de la siguiente forma (Hai-Yong & Julie M, 2005): Vidrio (24,8% p/p), plásticos (23% p/p), metales preciosos (0,02% p/p), hierro (20,47% p/p), plomo (6,3% p/p), aluminio (14,17% p/p), cobre (6,93% p/p), otros (4,3% p/p); siendo el vidrio y el plástico los materiales más abundantes en el reciclaje de desechos electrónicos.

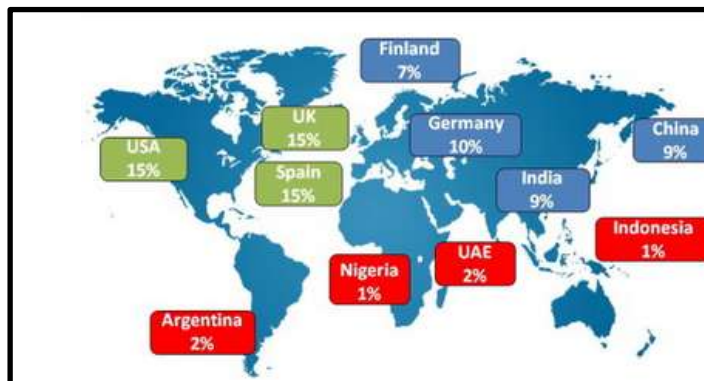
A nivel mundial los polímeros termoestables ó también llamados “*Materiales no reciclables*” están siendo desechados de dos formas: la primera por incineración, generando una contaminación primaria por emisión de monóxido de carbono (CO) y la segunda por medio de vertederos. Tanskanen (2013) identificó que dos terceras partes de los residuos electrónicos se siguen yendo a los vertederos o exportando a países en desarrollo, teniendo como consecuencia una gran pérdida de material valioso. En el 2008 más de mil millones de ordenadores personales fueron adquiridos, de los cuales hoy en día varios habrían llegado al final de su vida útil

(Bastiaan, Zoeteman, Krikke, & Venselaar, 2010). En promedio en cada hogar de EE.UU. se utilizan 34 aparatos electrónicos y electrodomésticos, resultando más de 5 Mt de residuos electrónicos al año, un promedio por ciudadano de 15 kg de residuos electrónicos al año (Bastiaan, Zoeteman, Krikke, & Venselaar, 2010). En cuanto a la Unión Europea (EU), se cree que los residuos electrónicos al año son de aproximadamente de 7 Mt (Bastiaan, Zoeteman, Krikke, & Venselaar, 2010). Widmer et al. (2005) resaltaron la importancia de los residuos electrónicos que equivalen a un 8% de los residuos urbanos, siendo un dato de crecimiento; identificando que entre el 50 al 80% de la basura electrónica que se genera en los mercados es enviada a países en desarrollo para su reutilización y reciclaje.

Conociendo la problemática con el reciclaje de residuos electrónicos, se han implantado programas de cultura ciudadana para el reciclaje de teléfonos móviles desde 1997 en diferentes países como Suecia y Reino Unido (Tanskanen, 2013). Sin embargo la compañía Nokia (Nokia Corporation, 2011) realizó un estudio solamente con teléfonos móviles indicando que menos del 10% de las personas han reciclado sus teléfonos móviles viejos; y en Estados Unidos y Europa solo el 15% de los propietarios regresaron el teléfono móvil para su reciclaje. La Figura 1 muestra las estadísticas de 11 países sobre el reciclaje de los teléfonos móviles, donde en países de América del Sur, África y Asia los porcentajes de reciclaje de residuos electrónicos son menores al 3%. Países como España y Estados Unidos, lideran sus campañas de reciclaje con un porcentaje mayor al 10% (Nokia Corporation, 2011).

En Centro América y Sur América, se empezó en México el liderazgo de campañas con reciclaje de aparatos electrónicos en el 2006, ampliando el programa a países como Perú, Brasil, Colombia, entre otros; recogiendo para el 2011 más de 375 ton de desechos electrónicos con estos tipos de programas de reciclaje (Tanskanen, 2013).

**Figura 1.** Porcentaje de Reciclaje de Teléfonos Móviles en 11 Países.



Fuente. Nokia Corporation. Consumer Study (2011)

De acuerdo a las investigaciones realizadas en la última década se observa que los grandes volúmenes de desechos de artículos electrónicos y de electrodomésticos son un problema ambiental actualmente y seguirán siéndolo en un futuro debido al incremento en el consumo de los mismos; unos de los estudios realizados para dar alguna solución a esto es la reutilización de las placas de circuitos internas de los aparatos electrónicos ó **PCB** (Printed circuit board), siendo sus componentes: vidrio, cobre, polímeros, entre otros (Jiuyong, Jie, & Zhenming, 2009). Recientes investigaciones han demostrado que existe un incremento del 8,7% en la fabricación de placas de circuito, teniendo un mayor aumento en Asia, superando el 10% de producción, de los cuales el 70% p/p de los residuos es tratado por combustión o por relleno sanitario, dando lugar a contaminación por metales pesados; estos residuos de placas están constituidos por resinas termoestables, fibras de vidrio, materiales de refuerzo y otros aditivos, a los cuales se denomina *Fracciones No metálicas* (FNM) (Jiuyong, Jie, & Zhenming, 2009). Los materiales de residuos de placas de circuito han sido objeto de investigaciones, como por ejemplo: la implementación de residuos de PCB para la producción de hormigón ligero (Panyakapo & Panyakapo, 2008). Yokoyama (1995) implementó residuos de circuitos impresos en la modificación de materiales viscoelásticos y Zheng et al. (2008) identificaron la procesabilidad, reciclabilidad y bajo costo de la utilización de FNM como refuerzo en materiales compuestos de Polipropileno (PP).

## 5.2 VISIÓN MUNDIAL DE ASFALTO– AGREGADO MODIFICADO CON POLÍMEROS

Los asfaltos no modificados son susceptibles a los cambios de temperatura (Jiuyong, Jie, Shifeng, & Zhenming, 2008), por esta razón se han realizado a nivel mundial investigaciones sobre modificadores alternativos del asfalto con distintos tipos de polímeros, entre los cuales los más usados son los termoplásticos, mejorando así la susceptibilidad a altas y bajas temperaturas de servicio (Airey, 2002).

Jiuyong et al. (2008) realizaron una investigación sobre el uso de residuos de circuitos impresos pulverizados (FNM) como modificadores de asfalto, demostrando a partir de ensayos reológicos en el asfalto con contenido de FNM la modificación de sus propiedades respecto al asfalto sin modificar. El tamaño utilizado después de la trituración fue de 0,07 a 0,30 mm, en un contenido de sustitución de 5, 10, 15, 20, 25 y 30% p/p; durante un tiempo de mezclado de 30 min a una temperatura de 160°C. De acuerdo a los resultados del asfalto modificado con 25 % p/p su viscosidad fue de 1.225 cP a 135°C, una penetración de 53,7 mm a 15°C, resultados de anillo y bola de 54°C, y una ductilidad de 43,5 cm a 15°C.

La viscosidad se determinó empleando el viscosímetro de Brookfield DV-II, a una temperatura de 135°C con una velocidad de 20 rpm durante 50 min, los resultados mostraron que la viscosidad se incrementaba con el contenido de FNM, alcanzando aumentos de un 360% con respecto a la viscosidad de la muestra convencional, obteniendo una viscosidad del asfalto sin modificar de 400 cP a 135°C a una viscosidad de 1850 cP a 135°C para un asfalto modificado con 25% de FNM. El incremento en la viscosidad entre porcentaje de adición FNM es de un 150% aproximadamente, llegando a un aumento excesivo al adicionar el 30% de FNM, pudiendo conducir a dificultades en el bombeo del asfalto.

El ensayo de penetración mostró resultados satisfactorios a una temperatura de 25°C puesto que al adicionar al asfalto un 30% p/p de FNM la penetración disminuyó en un 34% con respecto al asfalto convencional, rigidizando el asfalto. El mayor incremento de la temperatura

de punto de ablandamiento se obtuvo con un contenido de 30% p/p de FNM con el que se registró un aumento del 17% en el punto de ablandamiento respecto al del asfalto convencional.

El último ensayo realizado en la investigación por Jiuyonget al.(2008) corresponde al ensayo de ductilidad, con el cual se deduce que una mayor ductilidad implica un mejor rendimiento del asfalto a bajas temperaturas. Los resultados arrojaron una disminución en la ductilidad del asfalto modificado, identificando que para un porcentaje de adición al asfalto de FNM del 25% p/p, se reduce la ductilidad en un 57% con respecto a un asfalto convencional, indicando que la reducción es debida a la concentración de esfuerzos en las interfaces entre los elementos no metálicos de partículas y el asfalto.

Silvia et al. (2011) identificaron las posibles ventajas de introducir desechos de polietileno en mezclas asfálticas, en su investigación modificaron el asfalto con polietileno de alta densidad (PEAD) y sustituyeron parcialmente los agregados por polietileno reticulado “*Cross-linked polyethylene*” (PEX), utilizando tamaños entre 0.5–4.0 mm.

Los porcentajes de PEAD utilizados fueron del 3 y 6% p/p para diferentes tiempos de mezclado (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 horas). Los resultados mostraron que para un tiempo de mezclado de 60 min y una adición de 6% p/p de PEAD, se disminuyó la penetración en un 36% con respecto al asfalto convencional, de 59 mm/10 a 37 mm/10 respectivamente; el punto de ablandamiento se incrementó en un 27% en comparación con el del asfalto sin modificar, obteniendo para el asfalto convencional 52°C y para el asfalto modificado 66°C.

Los resultados presentados por Silvia et al.(2011) concluyeron que tanto las mezclas modificadas con polietileno de alta densidad (HDPE) como las mezclas modificadas por vía seca con PEX, son mucho más resistentes a la deformación permanente y menos susceptibles a la temperatura que las mezclas convencionales.

En los últimos años el rendimiento de las mezclas asfálticas está siendo mejorado con la incorporación de diferentes aditivos al asfalto como caucho, PP reciclado, PEBD de baja densidad, PEAD, elastómeros, entre otros; permitiendo obtener un incremento en la durabilidad,



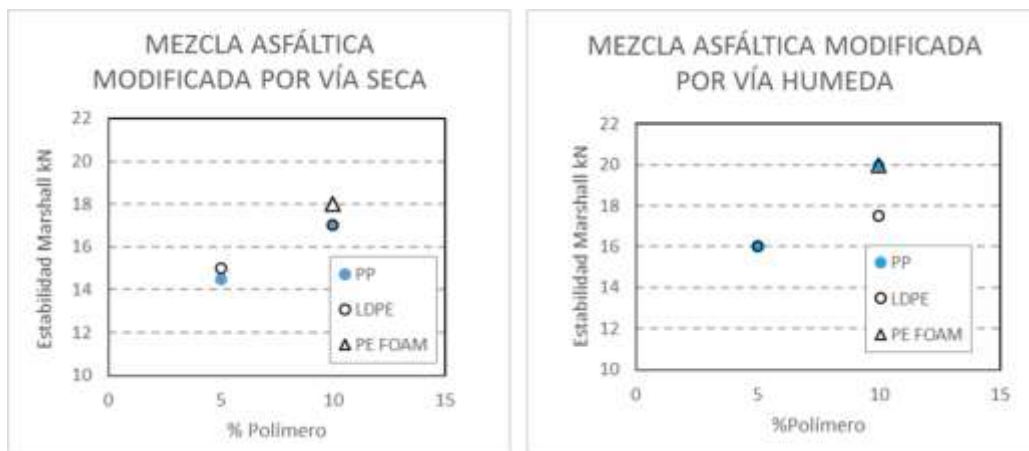
en la resistencia a la fatiga, disminución del ahuellamiento y de la susceptibilidad térmica de las mezclas asfálticas. Vasudevan et al. (2011) presentaron un estudio detallado de la utilización de diferentes residuos plásticos como: bolsas, botellas, espumas, vasos desechables, bolsas de leche, entre otros; el objetivo de la investigación lo plantearon en la modificación de las mezclas asfálticas por vía seca con los diferentes residuos plásticos. Este trabajo investigativo fue implementado en la India en diferentes ciudades como: Tamil Nadu, Kerala, Andhra Pradesh, Maharashtra, Pondicherry y Himachal Pradesh con.

Gracias a esta investigación se conoció que el recubrimiento de los agregados pétreos con los diferentes polímeros termoplásticos fundidos permite llenar los poros de la superficie, evitando la absorción del agua por parte del agregado, incrementando la resistencia a la abrasión. Se mejora la adherencia entre el agregado y el asfalto ante la presencia de los polímeros (Vasudevan, Ramalinga Chandra Sekar, Sundarakanna, & Velkennedy, 2011).

En la Figura 2, se presentan los resultados de estabilidad Marshall de las mezclas asfálticas modificadas por vía seca o húmeda con un contenido asfáltico de 4,5%. En la Figura **2a** se muestran los resultados al modificar el asfalto con porcentajes de 5 y 10% p/p de PP, PEBD y PE (espuma), donde la adición de 10 p/p % de PE (espuma) presenta mayor estabilidad en comparación con las adiciones de los demás polímeros y respecto a la adición del LDPE, la estabilidad Marshall de PE (espuma) es mayor un 12%, alcanzando los 20 kN. En la Figura **2b**, con la adición de 10% p/p PE (espuma) se tiene un mejor comportamiento respecto al LDPE y PP, además es evidente que en la modificación por vía seca los valores de estabilidad son inferiores respecto a lo obtenido en la modificación por vía húmeda, pudiendo concluir que se logra un mejor comportamiento de la mezcla, en lo que refiere con estabilidad Marshall, con la adición por vía húmeda de PE (espuma).

**Figura 2.** Mezcla Modificada con Polímeros por Vía Húmeda y Vía Seca.

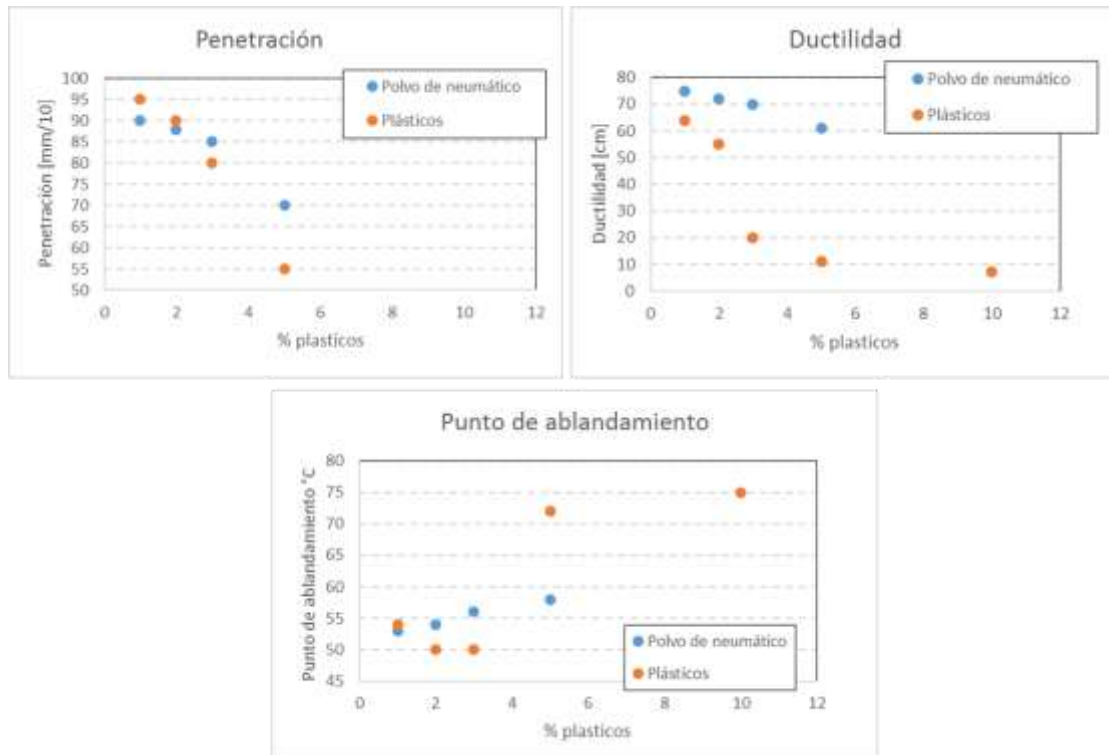
a). MA modificada por vía húmeda      b) MA modificada por vía seca



Fuente. Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakanna, B., & Velkennedy, R. (2011). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – application in construction of flexible pavements.

El asfalto se puede modificar con diferentes tipos de polímeros (Vasudevan, Ramalinga Chandra Sekar, Sundarakanna, & Velkennedy, 2011) como se presentó en la Figura 2, también se puede modificar con polvo de neumático (Reyes, Madrid, & Salas, 2007). Vasudevan et al. (2007) identificaron la mejor manera de modificar por vía húmeda una mezcla asfáltica, la primera adicionando solamente polímeros productos de residuos (PE, OPP y PS) en porcentajes de 1,2,3 y 5% p/p y la segunda adicionando polvo de neumático en porcentajes de 1,2,3 y 5% p/p, para esta última mezcla se indicó una temperatura de mezcla de asfalto y polvo de neumático entre 100-120 ° C, con una mezcladora a 300 rpm, con un tiempo de mezcla entre 2 a 3 horas. Como se observa en la Figura 3 el asfalto al ser modificado con plásticos tiende a rigidizarse y a ser menos susceptible a la temperatura, esto evidenciado en la disminución de la penetración y ductilidad, y en el aumentando del punto de ablandamiento.

**Figura 3.** Ensayos Reológicos Asfalto Modificado



Fuente: Vasudevan, R., Ramalinga, Chandra Sekar, A., Sundarakanna, B., & Velkennedy, R. (2011). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – application in construction of flexible pavements.

## 6 ASFALTO

### 6.1 DEFINICIÓN DEL ASFALTO

El asfalto es un material viscoso, pegajoso de un color que va desde el castaño oscuro al negro, utilizado como aglomerante en mezclas asfálticas, que puede tener consistencia líquida, semisólida o sólida teniendo en cuenta que su comportamiento está directamente relacionado con la temperatura, está compuesto especialmente por su composición de hidrocarburos solubles casi en su totalidad sulfuro de carbono, sin embargo puede variar dependiendo de la fuente del petróleo de donde proviene el asfalto (Montejo, 2002). Esta sustancia se utiliza para revestir carreteras, impermeabilizar estructuras, como tejas, tejados y pisos entre otros.

### 6.2 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ASFALTO

La configuración de la estructura del asfalto está determinada por las especies moleculares presentes y su composición, como se observa en la siguiente Tabla 1. (Shell, 1990, Pág.89).

**Tabla 1.** Configuración Interna del Asfalto

Carbón	82 - 88 %
Hidrógeno	8 - 11%
Sulfuros	0 - 6%
Oxígeno	0 - 1,5%
Nitrógeno	0 - 15

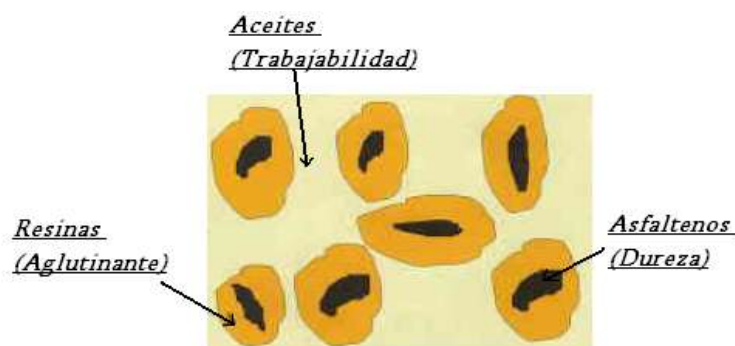
Fuente. Shell, 1990, Pág.89

### 6.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ASFALTO

El asfalto en términos generales está compuesto químicamente por asfaltenos, resinas, hidrocarburos, cada uno atribuye al asfalto una característica específica (Ver Figura 4). Como lo afirma la cartilla de cemento asfáltico (ASOPAC, 2004). Los asfaltenos proporcionan la dureza

del asfalto, las resinas son los que aglutinan los asfaltenos, brindando la capacidad de liga. Los hidrocarburos son aceites que le dan la consistencia para que sean trabajables.

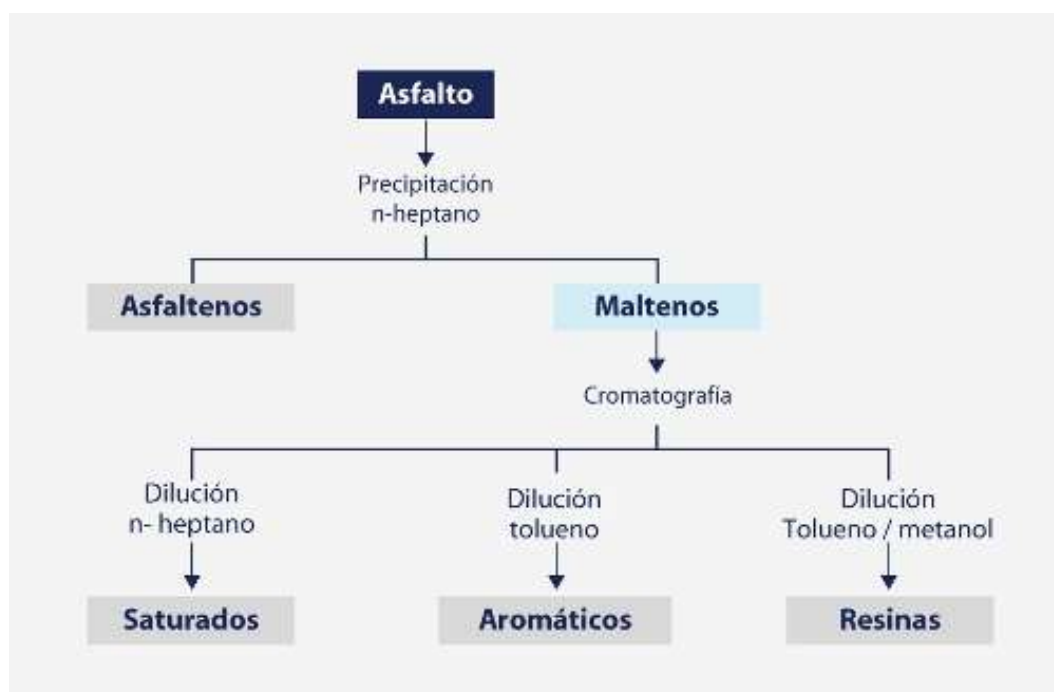
**Figura 4.** Composición del Asfalto



Fuente. (2004). El cemento asfáltico. Cartilla Pavimento Asfáltico, (1), p.10

El análisis químico del asfalto se clasifican en dos grupos: *Los Asfaltenos* y *Los Maltenos*. En la Figura 5 se muestra la conformación del asfalto.

**Figura 5.** Conformación del Asfalto



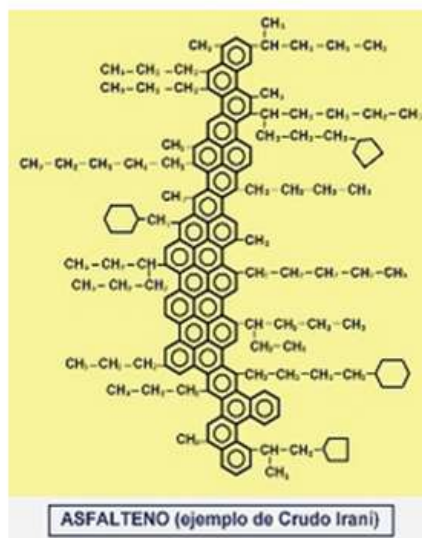
Fuente. Repsol. (2013). *Fisicoquímica del asfalto*. Madrid. Recuperado de [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)

### 6.3.1 Asfaltenos

Son estructuras complejas de compuestos aromáticos de color negro o marrón que contienen además del carbón otros elementos químicos tales como nitrógeno, azufre, oxígeno, en general, son compuestos polares, de alto peso molecular. En la Figura 6 se encuentran la estructura y las características de los asfaltenos.

**Figura 6.** Estructura de los Asfaltenos

- Insolubles en un disolvente parafínico normal (general m.n-heptano).
- Componentes más pesados: PM:1.000-100.000
- Ratio (H/C): - 1,1
- Formados por aromáticos complejos altamente polares.
- Sólidos a temperatura ambiente
- Negros color del betún



Fuente. Repsol. (2013). *Fisicoquímica del asfalto*. Madrid. Recuperado de [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)

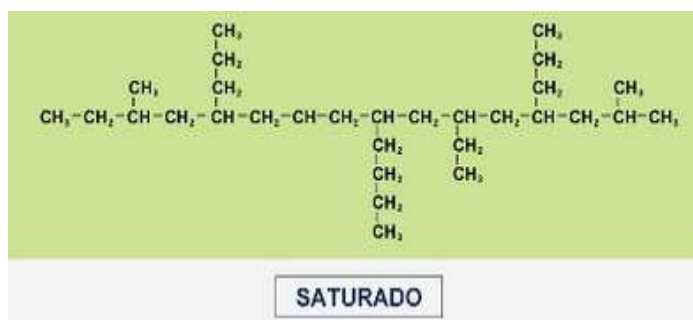
### 6.3.2 Maltenos

Son sustancias solubles y está constituido por resinas e hidrocarburos saturados y aromáticos, son compuestos muy polares de color marrón o marrón claro, sólidos o semisólidos, y al igual que los asfaltos, su estructura molecular está constituida por carbón, hidrogeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre.

### 6.3.3 Hidrocarburos Saturados

Son cadenas lineales y ramificadas, saturadas, no polares. Las características de los Hidrocarburos saturados se muestran en la Figura 7.

**Figura 7.** Estructura de los Saturados



- Aceites viscosos no polares.
- Compuestos mayoritariamente por cadenas lineales y/o ramificadas de hidrocarburos alifáticos con PM similar a los de los aromáticos.
- Muy baja reactividad.

Fuente. Repsol. (2013). *Fisicoquímica del asfalto*. Madrid. Recuperado de [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)

### 6.3.4 Hidrocarburos Aromáticos

Los hidrocarburos aromáticos constituyen entre el 40 y 65 % de la composición total de los asfaltos, son las fracciones de menor peso molecular en la estructuras de los asfaltos. Los aromáticos son compuestos donde predominan las moléculas insaturadas de peso molecular entre 300 a 2000 g/mol, no polares, con especial capacidad para actuar como disolventes de otras cadenas hidrocarbonadas de alto peso molecular. En la Figura 8 se mencionan algunas de sus características más importantes:

**Figura 8.**Estructura de los Aromáticos

- Cadenas no polares, predominan los anillos insaturados.
- PM: 300 – 2.000.
- Componente mayoritario de los betunes.
- Alta capacidad para disolver otros compuestos de alto peso molecular.

Fuente. Repsol. (2013). *Fisicoquímica del asfalto*. Madrid. Recuperado de [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)

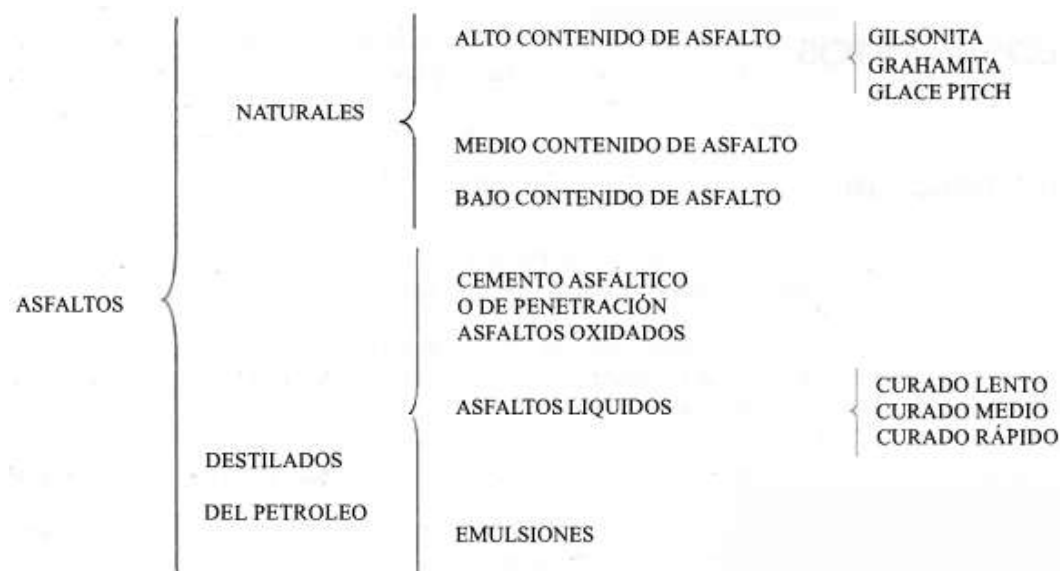
En cuanto a la estructura química del asfalto, esta se caracteriza por la agrupación en pequeñas micelas con diferentes composiciones de cada uno de los compuestos nombrados anteriormente y el tamaño y forma de estas depende de la solubilidad que tienen estos entre sí, formando básicamente dos fases en suspensión, donde los compuestos más ligeros constituyen el líquido intermicelar o medio de dispersión.

#### 6.4 CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO DE ACUERDO A SU ORIGEN

El asfalto es un material impermeable, adherente y cohesivo, teniendo en cuenta estas características el asfalto se clasifica teniendo en cuenta su procedencia como se muestra en la siguiente Figura:



**Figura 9.** Clasificación del Asfalto según su origen.



Fuente. *Concreto y otros materiales para la construcción*. Jiménez (2004). Recuperado de [http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/23/9589322824\\_Parte7.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/23/9589322824_Parte7.pdf)

#### 6.4.1 *Asfalto natural:*

Procedente de depósitos naturales de asfalto. Estos depósitos se encuentran dentro de rocas porosas llamados asfaltos de roca o rocas asfálticas.

#### 6.4.2 *Asfaltos derivados del petróleo:*

Es el más común en el comercio y se conoce como asfalto residual o de destilación directa, ya que es el residuo de la destilación del petróleo.

#### 6.4.3 *Cementos asfálticos sólidos*

Son asfaltos refinados o una combinación de un asfalto y un aceite fluidificante, comúnmente designados como AC. Estos poseen una viscosidad apropiada para los trabajos de

pavimentación, además con excelentes propiedades aglutinantes, impermeabilizantes y características de flexibilidad durabilidad y alta resistencia a la acción de ácidos, sales y alcoholes.

Los cementos asfálticos sólidos se seleccionan según las características climatológicas de la región y las condiciones de operación de la vía, es por esta razón que en Colombia se utilizan dos tipos de cementos asfálticos (AC) tipo **CA 80-100** y **CA 60-70**. Los cementos asfálticos CA 80-100, se utilizan cuando la temperatura media anual promedio de la zona es inferior a 24 °C y los cementos asfálticos CA 60-70, se utilizan cuando la temperatura media anual promedio es superior a 24 °C (INVIAS, 2007).

#### **6.4.4 *Asfaltos Líquidos***

Se conocen como asfaltos rebajados o cut backs y cuya consistencia es blanda. Esta clase de asfaltos están compuestos por una base asfáltica, correspondiente a cemento asfáltico, y un fluidificante volátil que puede ser bencina, queroseno o aceite.

#### **6.4.5 *Emulsiones asfálticas***

Es un sistema heterogéneo de dos fases normalmente inmiscibles, como el asfalto (60 – 70 %) y el agua, al que se le incorpora una pequeña cantidad de un agente activados de superficies (0.2 – 1 %), tensoactivo o emulsificante, básico o ácido, el cual mantiene en dispersión el sistema; la fase continua es el agua y la discontinua son los glóbulos de asfalto, cuyo tamaño oscila entre uno y diez micrones. Cuando la emulsión se pone en contacto con el agregado se produce un desequilibrio eléctrico que la rompe llevando a las partículas de asfalto a unirse a la superficie de agregado: el agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto.

Debido a propiedades del asfalto, las funciones a cumplir en la estructura del pavimento consisten en impermeabilizar la estructura evitando filtraciones de agua proveniente de la escorrentía o precipitación.

## **6.5 PROPIEDADES DE LOS ASFALTOS**

Las propiedades físicas más importantes del asfalto son: durabilidad, adhesión, cohesión, susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento y la susceptibilidad a la temperatura, que se deben tener en cuenta en cualquier diseño de mezcla asfáltica, para la construcción y mantenimiento de carreteras (ASOPAC, 2004).

- Durabilidad: indica las características del asfalto cuando está expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento.
- Adhesión: Capacidad del asfalto para adherirse completamente al agregado de una mezcla asfáltica, permitiendo un cubrimiento total del mismo.
- Cohesión: Capacidad del asfalto de mantener fijamente, “en su puesto”, las partículas del agregado de la mezcla asfáltica en el pavimento.
- Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento: Es causado por la combinación con el oxígeno (oxidación) o por volatilización. La oxidación y el endurecimiento más severo ocurren durante el mezclado, ya que el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas.
- Susceptibilidad a la temperatura: La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de diferente origen, aun si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia, esta propiedad es considerada como una de las más importantes a tener en cuenta en el asfalto.

## 6.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CEMENTO ASFÁLTICO CA 80/100.

El cemento asfáltico posee aspectos técnicos que puede clasificarse teniendo en cuenta sus características físico-químicas, en la Tabla 2, se observa las características normales que debe tener un cemento asfáltico AC 80/100.

**Tabla 2.** Características Típicas de un Asfalto 80/100.

Ensayo	Método	Unidad	CA 80-100	Resultados
<b>Ensayos sobre el asfalto original</b>				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	80-100	85
Índice de penetración	INV E-724	-	-1	-0,5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4404	Poises	1000 mín.	1400
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	ASTM D-113	cm	100 mín.	> 105
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D-2042	%	99 mín.	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0,2 máx.	< 0,2
Punto de inflamación COC	ASTMA D-92	°C	232 mín.	295
<b>Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT</b>				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máx.	0,2
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	%	48 mín.	65

Fuente. Shell de Colombia S.A. Carta técnica Shell Bitumen, 2007.

## 7 POLÍMEROS

### 7.1 GENERALIDADES DE LOS POLÍMEROS

La mayoría de las profesiones actuales se encuentran relacionadas de algún modo con la utilización y aplicación de polímeros, por esta razón, se ha llegado a llamar a este tiempo, “la era de los polímeros”, como lo afirma Seymour (1995).

La palabra polímero se deriva del griego *poliy meros*, que significan mucho y partes equivalentes respectivamente, con lo cual se definen los polímeros como sustancias constituidas por moléculas cuyo principal rasgo es la repetición de uno o más tipos de unidades monoméricas (Seymour, 1995, p.1). Comúnmente se utiliza el término macromolécula para definir a los polímeros, esto debido a las largas cadenas en las que los átomos se encuentran alineados uno junto del otro.

No fue sino hasta mediados del año 1920 cuando se aceptó este concepto de polímero debido a que éstos fueron dejados a un lado por los químicos de la época cuyo objetivo era encontrar compuestos cristalinos y puros con punto de fusión claro y definido, características no propias de los polímeros. Sin embargo, el químico alemán Staudinger expuso su hipótesis macromolecular sobre el hecho de que los polímeros eran moléculas grandes y para el año 1929 Wallace Carothers, descubrió que la hexametildiamina y el ácido adípico, formaban polímeros que conectados a través de agujeros y estirados formaban hilos que podían tejerse a lo que se le denominó nylon (Seymour, 1995, p.3).

#### 7.1.1 *Propiedades comunes de los polímeros*

Aunque cada polímero presenta su forma y estructura particular, existen ciertas propiedades comunes a todos y que les da su caracterización para poder diferenciarlos de otros materiales. Debido a estas propiedades únicas entre los polímeros, su uso se ha expandido a tal punto de que cada vez más se está remplazando los componentes metálicos en las aplicaciones

para automóviles, aeronaves civiles y militares, empaques, anuncios, juguetes, construcción, productos electrónicos, aparatos domésticos, entre otros.

La utilidad de los polímeros se refleja en las siguientes propiedades (Kalpakjian, 2002, p.177):

- Resistencia a la corrosión y estabilidad química.
- Baja conductividad eléctrica.
- Baja densidad.
- Reducción de ruido.
- Amplia selección de colores.
- Facilidad de manufactura.
- Costo relativamente bajo.
- Elevado coeficiente de dilatación térmica.
- Elevador resistencia específica.

Beltrán y Marcilla (2012) afirman que propiedades como densidad, conductividad térmica y conductividad eléctrica, varían dentro de rangos relativamente bajos, la densidad por ejemplo varía desde 0.9 a 2.3 g/cm<sup>3</sup> y permite que los polímeros sean fáciles de manejar, sin embargo al tener bajos valores de conductividad térmica, se hace más difícil el proceso de transformación de los plásticos, pero permite que tenga una amplia aplicación dentro de la industria de conservación y transporte de alimentos al ser utilizados como aislantes térmicos; y en la fabricación de tuberías que estén expuesta a calor o frío intensos, por ejemplo, la espuma de poliuretano es un excelente aislante térmico utilizada para estos fines. Asimismo, la baja conductividad eléctrica permite que muchos de los polímeros sean buenos aislantes eléctricos de aparatos.

## **7.2 CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS**

Los polímeros se clasifican de acuerdo a: su origen, síntesis química, estructura y comportamiento frente a la temperatura. Beltrán y Marcilla (2012) afirman: “que dependiendo del origen, los polímeros pueden ser naturales o sintéticos, los primeros pueden ser polisacáridos,

proteínas, ácidos nucleicos o caucho natural; y los sintéticos pueden ser de adición y de condensación. Los polímeros sintéticos poseen 1 o 3 diferentes tipos de monómeros a diferencia de los polímeros naturales que presentan estructuras más complejas” (p.17). Los polímeros sintéticos de adición más comunes son el polietileno, polipropileno y el policloruro los cuales parten de un monómero vinílico; los polímeros de condensación más comunes son los poliésteres, resinas fenólicas y las poliamidas (Beltrán & Marcilla, 2002). Las Tablas 3 y 4 muestran la lista de los polímeros de adición y de condensación más conocidos, con sus respectivas unidades repetitivas.

Los polímeros también pueden ser transparentes u opacos, esta propiedad óptica permite diferenciar los polímeros amorfos y cristalinos, igualmente permite describir la resistencia química de estos, puesto que los polímeros cristalinos son menos solubles que aquellos que son amorfos (Kalpakjian, 2002, p.184).

**Tabla 3.** Polímeros de Adición de Uso Frecuente

Polímero	Abreviatura	Unidad de Repetición	Aplicaciones
Polietileno	PE	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Películas para empaque, aislamiento de conductores, botellas blandas, etc.
Polipropileno	PP	$-\text{CH}_2-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-$	Tanques, fibras para alfombras, cuerdas, empaques.
Cloruro de Polivinilo	PVC	$-\text{CH}_2-\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}-$	Tuberías, válvulas, loseta de piso, aislamiento para conductores.
Poliestireno	PS	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}-$	Empaque y espumas aislantes, paneles de iluminación.
Poliacilonitrilo	PAN	$-\text{CH}_2-\underset{\text{C}=\text{N}}{\text{CH}}-$	Fibras textiles, recipientes para alimentos.
Polimetilmetacrilato	PMMA	$-\text{CH}_2-\underset{\text{COOCH}_3}{\overset{\text{CH}_3}{\text{CH}}}-$	Ventanas, parabrisas, recubrimientos, lentes de contacto rígidos.

Fuente. Askeland, Donald. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Internacional Thomson.

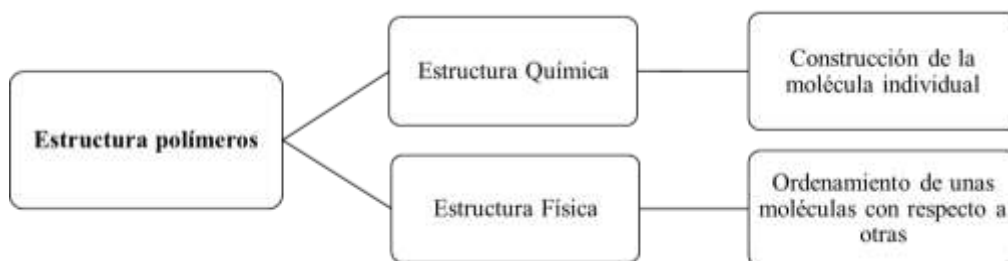
**Tabla 4.** Polímeros de Condensación más Frecuente

Polímero	Abreviatura	Unidad de Repetición	Aplicaciones
Poliéster		$\text{---R---OCO---R'---COO---}$	Fibras, películas fotográficas, cinta de grabación, contenedoras de agua caliente.
Poliámidas	PA	$\text{---NH---R---NHCO---R'---CO---}$	Cojinetes, engranes, fibras, cuerdas, componentes de automotores, componentes eléctricos.
Policarbonato	PC	$\text{---O---C(CH}_3\text{)}_2\text{---C(CH}_3\text{)}_2\text{---CO---}$	Carcasas eléctricas, componentes automotrices, botellas retornables.
Poliésterterftalato	PET	$\text{---CH}_2\text{---CH}_2\text{---OCO---C}_6\text{H}_4\text{---COO---}$	Empaques, envases, fibras.
Poliuretano	PU	$\text{---NH---COO---R---OCO---NH---R'---}$	Suelas calzados, pinturas, fibras textiles, sellantes, aislantes.
Resina de fenol-formaldehído	PF	$\text{---C}_6\text{H}_2\text{(OH)}_2\text{---CH}_2\text{---C}_6\text{H}_2\text{(OH)}_2\text{---}$	Tableros de circuitos, bolas de billar, adhesivos.

Fuente. Askeland, Donald. *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Internacional Thomson.

### 7.2.1 Clasificación según su estructura molecular

Al referirse a la estructura de un polímero se tiene que considerar en dos niveles: estructura química y estructura física, en la Figura 10 se explican respectivamente:

**Figura 10.** Estructura de los polímeros

Fuente. Beltrán, Maribel; Marcilla, Antonio. *Tecnología de polímeros "Procesado y propiedades"*. Publicaciones Universidad de Alicante. 2012

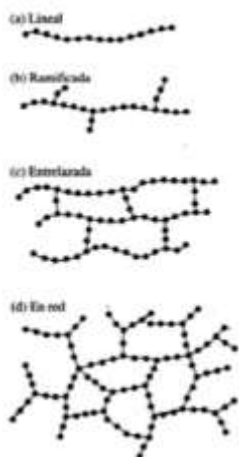


La estructura de los polímeros según Kalpakjian (2002) puede ser (Figura 11):

- Lineal: estructura secuencial, no necesariamente tienen que ser estructura en forma recta.
- Ramificada: consistente en cadenas que se enlazan con la estructura principal, esta ramificación interfiere con el movimiento de las cadenas moleculares incrementando la resistencia a la deformación y al agrietamiento
- Entrecruzada: es una estructura tridimensional propia de los polímeros termoestables, el entrecruzamiento le da al polímero dureza, resistencia, rigidez, fragilidad y mejor estabilidad dimensional.

Los polímeros lineales con o sin ramificaciones y polímeros entrecruzados corresponden a dos grupos de polímeros: termoplásticos y termoestables, respectivamente. Los polímeros termoplásticos a diferencia de los termoestables que tienen estructura entrecruza, son polímeros lineales con temperatura de fusión y temperatura de degradación mientras que los polímeros termoestables solo tienen temperatura de degradación y por lo tanto no se pueden fundir.

**Figura 11.** Estructura de los Polímeros Según la Forma de las Macromoléculas.



(a) Estructura lineal, termoplásticos tales como los acrílicos, nylon, polietileno y policloruro de vinilo.

(b) Estructura ramificada, como en el polietileno de baja densidad.

(c) Estructura entrecruzada, elastómeros y hules.

(d) Estructura reticular también puede ser entrecruzada, termoestables como las resinas epoxi y los fenólicas.

Fuente. Kalpakjian, Serope; SCHMID, Steven R. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.

México, 2002

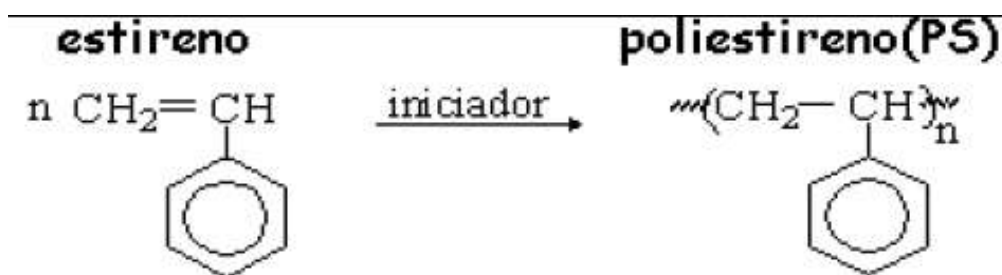
### 7.2.1.1 Polimerización y estructura molecular

Se le llama polimerización al proceso en el cual se unen o se enlazan unidades repetitivas de monómeros para formar moléculas especialmente largas y grandes.

Los polímeros sintéticos se pueden fabricar por medio de dos tipos de reacciones: adición y condensación (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2008). Estos dos tipos de reacciones son exotérmicas y se inician por la acción de un catalizador.

- Reacción de condensación o por etapas: Según la ECI (2008) el procedimiento clásico para la fabricación de resinas fenólicas, consiste en la reacción que sucede entre monómeros que porten dos o más grupos funcionales, formando moléculas de bajo peso molecular como agua y alcoholes. En la formación del polímero la condensación se da entre dos moléculas obligatoriamente polifuncionales para producir una molécula polifuncional mayor, con la eliminación de una molécula de menor tamaño.
- Polimerización de adición o de reacción en cadena: es un proceso en el cual reaccionan monómeros bifuncionales que se van uniendo uno a uno en especie de cadena para formar una macromolécula lineal, se distinguen tres etapas básicas: iniciación, propagación y terminación (Callister, 1996, p. 510). En la Figura 12 se puede apreciar la polimerización por adición.

**Figura 12.** Polimerización por Adición



Fuente. *Identificación de plásticos*. Laboratorio de producción. Escuela Colombiana de Ingeniería.

## 7.2.2 Clasificación de los polímeros sintéticos según su comportamiento físico

Además de la clasificación según el origen de los polímeros ya mencionada anteriormente, los polímeros sintéticos comúnmente se clasifican según el comportamiento mecánico y su respuesta frente a la temperatura en tres grupos: termoplásticos, termoestables y elastómeros (Figura 13).

Según Callister (1996), los polímeros termoplásticos son aquellos que al calentarse se ablandan y se endurecen al enfriarse, este proceso es reversible y puede repetirse un sin número de veces. Los polímeros termoestables por el contrario, se endurecen al calentarse, no se ablandan a altas temperaturas pero pueden llegar a degradarse. Los elastómeros se caracterizan porque pueden ser estirados y poder recuperar su forma natural, suele ser que muchos de los polímeros termoplásticos son elastómeros.

**Figura 13.** Clasificación de los Polímeros



Fuente. Subgranon, Thanachart. (2013). *Introduction to polymer modified Asphalt Emulsion*. Recuperado de <http://nersp.nerdc.ufl.edu/~tia/Polymer%20Modified%20Asphalt%20Emulsion.pdf>

### 7.2.2.1 Polímeros termoplásticos

Los polímeros termoplásticos son polímeros con estructuras moleculares lineales o ramificadas, es decir, las uniones entre sus moléculas adyacentes son más débiles que los enlaces covalentes entre los monómeros, por esta razón, cuando este tipo de polímeros está expuesto a temperaturas elevadas o al calentamiento continuo resulta demasiado fácil poder moldearlos y

hasta llegar a fundirlos (Beltrán & Marcilla, 2012, p. 61). Molecularmente lo que ocurre al calentar el polímero, según Callister (1996), es la debilitación de los enlaces secundarios y la estimulación del movimiento entre las cadenas adyacentes, por lo tanto el comportamiento que tendrá el polímero termoplástico dependerá de su estructura molecular y de su composición. De igual forma, cuando se enfría el polímero sus propiedades de dureza y resistencia vuelven a su estado original, a lo que se le denomina proceso reversible.

En la Tabla 5 se aprecian las clases de polímeros termoplásticos más comunes.

**Tabla 5.** Resinas de Polímeros Termoplásticos

Nombre	Generalidades	Aplicaciones
<b>Polietileno Tereftalato (PET)</b>	Es un polímero cristalino de condensación producido mediante un proceso de polimerización en fase fundida continua.	Botellas plásticas para bebidas, envases muy transparentes, delgados, verdes o cristal, recipientes de aderezo, etc.
<b>Polietileno de alta densidad (PE-HD)</b>	Este polímero tiene mejores propiedades mecánicas que el PE-BD, ya que posee mayor densidad debido a su estructura lineal. Presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión. No resiste a fuertes agentes oxidantes como ácido nítrico, ácido sulfúrico.	Envases para: detergentes, aceites automotores, Bolsas para supermercados; Envases para pintura, helados. Tuberías para gas, telefonía, agua potable.
<b>Cloruro de Polivinilo (PVC)</b>	El PVC tiene alta resistencia química, resistencia a la humedad, y buenas propiedades eléctricas. Las aplicaciones rígidas, se concentran en tuberías, alfombras, ventanas, botellas y el empaque rígido de líquidos.	Empaque de comida, botellas de champú, envases transparentes, semidulgados. Se usa en aislamiento de cables, capas, bolsas de sangre, tubería médica y muchas más aplicaciones.
<b>Polietileno de baja densidad (LDPE)</b>	Es usado en la manufactura de películas flexibles, tales como bolsas plásticas y publicitarias, también es usado en la manufactura de tapas flexibles, y además en alambres y cables por sus buenas propiedades de aislamiento eléctrico.	Bolsas para pan, para alimentos congelados y para dulces, entre otros tipos de bolsas y tapas, también se usa para tubería y otros.
<b>Polipropileno (PP)</b>	Utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes.	Juguetes, recipientes huecos Producción de fibras, perfiles, láminas y tubos.
<b>Poliestireno (PS)</b>	Es un plástico muy versátil que puede ser rígido o formado. Es muy poco resistente al vapor de agua, oxígeno y tiene relativamente bajo punto de fusión	Protección en: empaquetamientos, contenedores, tapas, botellas, bandejas y vasos.

Fuente. *Identificación de plásticos*. Facultad de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería. p 15

### 7.2.2.2 Elastómeros

Los elastómeros son polímeros con la propiedad de alcanzar deformaciones elásticas relativamente altas, debido a su estructura molecular flexible, desordenada y entrelazada; al ser deformados su estructura se vuelve de aspecto cristalino y sus moléculas se alinean y para cuando se retira el esfuerzo retornan a su desorden natural (ECI, 2008, p.12).

El elastómero más común es el caucho, en la Tabla 6 se pueden encontrar los polímeros que son elastómeros y sus características:

**Tabla 6.** Elastómeros más Comunes y sus Características

Nombre	Características	Aplicaciones
<b>Poliestireno-butadeno-estireno. (SBS)</b>	Es un caucho duro. Su cadena principal está constituida por tres segmentos. El primero es una larga cadena de poliestireno, el del medio es una cadena de polibutadieno, y el último es otra larga sección de poliestireno.	Se usa para hacer objetos tales como suelas para zapatos, cubiertas de neumáticos, y otros donde la durabilidad sea un factor importante.
<b>Poliisobuteno</b>	Es el único caucho que puede mantener el aire por largos períodos debido a que es impermeable a los gases.	Se utiliza para hacer artefactos como cámaras para neumáticos y balones de baloncesto.
<b>Polibutadieno</b>	Fue uno de los primeros tipos de elastómeros sintéticos, o caucho, en ser inventados. Es adecuado para las aplicaciones que requieren exposición a bajas temperaturas.	Las correas, mangueras, juntas y otras piezas de automóvil se hacen de polibutadieno, porque éste tiene mejor resistencia a las bajas temperaturas que otros elastómeros
<b>Isopreno ó Metilbutadieno</b>	Es un compuesto orgánico que a temperatura ambiente es un líquido incoloro muy volátil debido a su bajo punto de ebullición, es altamente inflamable y de fácil ignición.	Fabricación de caucho natural

Fuente. *Identificación de plásticos*. Facultad de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería. p 13.

### 7.2.2.3 Polímeros termoestables

La definición habitual de los polímeros termoestables es “material polimérico que puede ser moldeado con la aplicación de calor y presión, pero como resultado de una reacción química, no pueden ser remodelados en futuras aplicaciones de calor y presión” (Goodman, 1998, p.2), es

decir, esta clase de polímeros sufren un cambio irreversible bajo la acción de altas temperaturas debido a su estructura molecular entrecruzada, que además de impedir cambios futuros en los polímeros también le conceden propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia química que permiten su amplio uso en la industria.

El prefijo “termo” implica que el proceso de entrelazamiento sucede gracias a la acción de la energía calorífica, así mismo, el sufijo “estable” referencia el hecho de una reacción irreversible que ocurre en una macro escala. Usualmente este tipo de polímeros pueden ser costosos, sin embargo son utilizados en amplios campos como: la industria aeroespacial, aplicaciones domésticas, automoción, construcción (hormigones con polímeros, sistemas de reparación, pinturas, espumas aislantes, etc.) (Goodman, 1998, p.5). En la Tabla 7 se pueden apreciar las categorías de aplicación de los polímeros termoestables.

**Tabla 7.** Aplicaciones de los Polímeros Termoestables.

<b>Categorías de aplicación de los termoestables</b>	
<b>Propósito General</b>	Fenoles, aminas y poliésteres
<b>Ingeniería</b>	Epoxi y poliuretano
<b>Especialidades</b>	Silicona, alilos.

Fuente. Goodman, Sidney. *Handbook of thermoset plastics*. 2<sup>nd</sup> Edition. New Jersey. P 5

#### **7.2.2.3.1 Entrelazamiento y curado**

El proceso de curado es el que permite que los polímeros termoestables adquieran las propiedades mecánicas y químicas requeridas. La polimerización ocurre a temperatura ambiente pero es aconsejable que el curado se dé a altas temperaturas para garantizar que se alcance la

conversión completa de la reacción y por lo tanto que el polímero adquiriera sus propiedades finales (Miravete, 2002, p. 18).

Un polímero lineal es una cadena continua de monómeros de carbono; el entrecruzamiento se forma gracias a la reacción química entre las cadenas del polímero, dando lugar a una red tridimensional unida por enlaces covalentes, que es la característica molecular principal de los termoestables (Goodman, 1998, p.6).

Beltrán y Marcilla (2012) afirman que el curado ocurre en varias etapas:

- Formación y el crecimiento lineal de las cadenas que se ramifican de forma rápida para seguidamente entrecruzarse. Con el avance de la reacción el peso molecular aumenta rápidamente y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito.
- La transformación consistente en el paso de un estado líquido viscoso hasta un estado de gel elástico, que caracteriza la aparición del retículo y suele ser denominado punto de gel.
- La gelificación ocurre en una etapa determinada del proceso de reacción y define el punto entre el cual el polímero deja fluir y ya no puede ser procesado.
- Formación del retículo infinito, aumento de la densidad de entrecruzamiento y de la temperatura de transmisión vítrea y de las propiedades físicas últimas.

#### **7.2.2.3.2 Polímeros termoestables más comunes**

Los polímeros termoestables poseen mejores características físicas y propiedades mecánicas, térmicas y químicas respecto de los polímeros termoplásticos (Kalpakjian, 2002, p. 190); un polímero termoestable típico es el fenólico, que se forma por la reacción entre el formaldehído y el fenol. Entre los productos que se fabrican con polímeros termoestables están las manijas y perillas de las ollas y sartenes, ciertos componentes de los interruptores de luz,

componentes electrónicos, refrigeradores, etc. En la Tabla 8 se muestran los polímeros termoestables y sus respectivas características.

**Tabla 8.** Polímeros Termoestables más Comunes.

Nombre	Formación	Aplicación y características
<b>Resinas fenólicas</b>	Comúnmente se les conoce como bakelitas, se forman mediante una reacción de condensación entre el fenol y el formaldehído.	Aislante eléctrico. Resistencia al calor, la humedad, al impacto.
<b>Resinas de poliéster</b>	Se obtienen por una reacción de condensación entre un poliácido y un polialcohol.	Buena resistencia a la humedad.
<b>Resinas Ureicas</b>	Se obtienen por una reacción de condensación entre la urea y el formaldehído	Se utilizan como adhesivos.
<b>Poliuretano</b>	Se obtienen por la reacción entre polioles e isocianatos.	Aislante térmico y eléctrico, aislante sonoro.
<b>Resinas de Melamina</b>	Se obtienen por una reacción de condensación entre la fenilamina y el formol.	Escaza fluidez, alta resistencia mecánica, aislamiento eléctrico y rigidez eléctrica.
<b>Resinas epóxicas</b>	Se forman por la reacción del difenilopropano y la epiclorhidrina.	Se utiliza como adhesivo, recubrimiento de maquinas eléctricas, etc.

Fuente. Información disponible en: *Identificación de plásticos*. Facultad de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería. p 12.

### 7.3 RECICLAJE DE POLÍMEROS

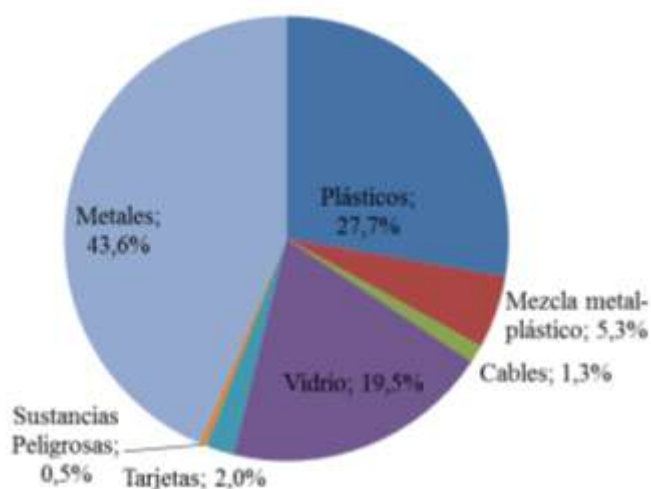
La creciente utilización de productos plásticos se ha vuelto un problema ambiental global debido a que los residuos de estos productos no son dispuestos de manera correcta y generan una contaminación latente del medio ambiente (Desechos Plásticos: un asunto cotidiano y global. El Espectador, 2013). Los desechos de vidrio, caucho, espumas de poliestireno y poliuretano, botellas plásticas no se descomponen naturalmente generando una contaminación en el suelo, el



agua, el aire, etc. Se calcula que puede tardar entre 500 y 1000 años para que un plástico se degrade (CEMPRE, 2013).

En la Figura 14 se puede tener una perspectiva del papel que juegan los residuos plásticos dentro de los desechos de residuos electrónicos, aproximadamente el 36% de un aparato electrónico corresponde a un compuesto de plástico termoestable, distribuidos entre tarjetas electrónicas, cables, plásticos y la respectiva mezcla plástico-metal:

**Figura 14.** Composición Promedio de Aparatos Electrónicos



Fuente. OTTO, Daniel; EMPA. *Gestión de los residuos electrónicos en Colombia*. Marzo 2008. Tecnologías de la información y comunicación

Cuatro son los elementos fundamentales para que se genere la preocupación ambiental y el deseo de reciclar estos productos (MALDONADO, 2012, p.16): la degradación lenta, la producción creciente de diferentes productos plásticos, su principal materia prima es el petróleo (no renovable) y algunos químicos utilizados para producir los plásticos son tóxicos, estas preocupaciones se fundamentan en hechos alarmantes, según estadísticas de la Asociación Industrial de poliuretano de China, a nivel mundial la producción de espuma de poliuretano fue de 1 millón de toneladas en el año 2000 pero para el año 2011 alcanzó los 7.5 millones de

toneladas (Yang, Dong, Liu, Liu, & Li, 2012). En Colombia la comercialización de celulares y computadores se ha aumentado, lo cual se puede evidenciar en los residuos generados. La cantidad de residuos de computadores, monitores y celulares que se acumularon hasta el 2008 fue de 40.000 a 50.000 millones de toneladas (EMPA, 2008), una tendencia que sigue aumentando con el desarrollo de la tecnología y la reducción de la vida de útil de estos elementos electrónicos.

Qué hacer con todos estos residuos potencialmente peligrosos para el medio ambiente y para el desarrollo de la vida del ser humano, es un tema de actualidad. Muchos países han empezado a tener en cuenta dentro de su legislación políticas y leyes que promuevan la correcta disposición y el reciclaje de todos estos productos, como es el caso de los países europeos, por ejemplo, Holanda, Suiza, Dinamarca y Suecia, que han prohibido el vertimiento de estos desechos de polímeros en terrenos abiertos. En Colombia se han implementado una serie de programas para reciclar todos estos residuos, tales como, el acuerdo entre la Gobernación de Cundinamarca y Hewlett-Packard (HP) que consiste en que el fabricante se encarga de recoger los computadores y los demás componentes que ya no se usan en esta entidad para asegurar una correcta disposición y someterlos a un proceso especial de reciclaje (Reciclando basura electrónica, 2012), igualmente el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible ha puesto en marcha un programa de recolección de los residuos electrónicos para darles un adecuado aprovechamiento, denominado EcoCómputo.

Frecuentemente se piensa que los únicos productos plásticos que se pueden reciclar son aquellos constituidos con polímeros termoplásticos, la realidad es otra, los polímeros termoestables también pueden ser reciclados, estos tipos de desechos poliméricos son aprovechados para hacer el mismo tipo de producto que los generan, así lo hace la empresa ERCOM (Consortio de compañías Alemanas de recolección y reciclado de materiales compuestos), quienes mediante un proceso de trituración, desecado, mecanizado, cribado y tamizado reciclan y convierten el material compuesto de materiales termoestables en fibras de vidrio de refuerzo y relleno de compuesto de moldeo en láminas (SMC) como material sustituyente de fibras de refuerzo vírgenes.

Carlos Serrano (2001), consultor editorial de tecnología del plástico, en su análisis sobre el reciclaje de los polímeros termoestables resalta que el proceso de reciclaje de éstos no es más difícil. Al utilizar materiales termoestables reciclados se han obtenido resultados óptimos en la disminución del desgaste de los moldes y equipos en donde han sido aplicados. Otra ventaja es su bajo costo mientras un plástico de ingeniería cuesta más de US\$ 4 kg, el precio de un termoestable reciclado apenas llega a esta suma además del mejoramiento en los requerimientos de resistencia química y al calor, y estabilidad dimensional (Serrano, 2001).

### ***7.3.1 Procesos de reciclado de polímeros termoestables***

Varias técnicas de reciclaje han sido propuestas y desarrolladas para materiales compuestos de matriz termoestables, existen fundamentalmente dos categorías de proceso: aquellas que se basan en la disminución del tamaño del residuo por medio de técnicas mecánicas; y aquellas que utilizan procesos térmicos para descomponer el residuo en material y energía (Pickering, 2005).

#### ***7.3.1.1 Proceso mecánico***

Consiste en la reducción del tamaño de los residuos por medio de un proceso primario de aplastamiento, lo cual involucra el uso de cortadoras de velocidad lenta o un molino de aplastamiento para reducir el residuo a un tamaño de 50 a 100 mm, esto facilita la remoción de metales, luego se utiliza un molino de martillo o un molino de velocidad rápida para reducir el tamaño entre 10 mm a 50  $\mu$ m, para posteriormente clasificar por tamaños el material y emplearlo como llenante del material compuesto original.

#### ***7.3.1.2 Proceso térmico***

Según Pickering(2005), esta es una de las formas de reciclaje de polímeros termoestables más adecuada para el desarrollo de un proceso a gran escala, este proceso de reciclaje puede realizarse de las siguientes maneras:

- Por combustión de energía y utilización de materiales: se basa en el valor calórico que tienen los polímeros que al ser quemados pueden ser una fuente de energía.
- Proceso térmico de lechos fluidizados: el lecho fluidizado consiste en una cama de arena de tamaños aproximado de 0.85 mm en donde la arena es fluidizada con una corriente de aire caliente (450-550°C). En los lechos fluidizados el polímero se volatiliza y libera las fibras que son suspendidas en una corriente de gas para luego pasar a una cámara de combustión secundaria para oxidarlas completamente. Este proceso permite la recuperación de la energía y la recuperación de las fibras sin contaminación en la superficie (Pickering, 2005).
- Pirólisis: como lo afirma Pickering (2005), es el proceso en el que se calienta un material en ausencia de oxígeno. Este proceso consiste en el rompimiento de las moléculas a partir de la acción del calor en ausencia del oxígeno para recuperar parte del gasto energético y del material que se va a reciclar.

#### **7.4 UTILIZACIÓN DE LOS POLÍMEROS TERMOESTABLES EN LA CONSTRUCCIÓN**

Por sus propiedades mecánicas y químicas, los polímeros termoestables se están utilizando ampliamente en la industria de la construcción, el principal polímero termoestable utilizado es la resina de poliéster, debido a su alta resistencia al desgaste y a los agentes rígidos. La resina epoxi es utilizada por su dureza y por su capacidad de operación a temperaturas elevadas, estas resinas son utilizadas para el sellamiento de fisuras y para adherir concreto a sustratos de concreto ya colocado en operación, además son especialmente resistentes a los ataques de álcali. Este tipo de resinas también se ha implementado en la ingeniería de pavimentos como un ligante de asfalto por su excelente resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, etc (Montejo, 2002).

### **7.4.1 Asfaltos modificados**

El aumento de la demanda del tránsito y los cambios climáticos, hacen que se requiera para la elaboración de mezclas asfálticas, un ligante con mejores propiedades reológicas y mecánicas(Montejo, 2002). Existen diferentes clases de modificadores que actualmente han sido materia de estudio para emplearlos en mezclas asfálticas. Entre los modificadores se tienen los polímeros termoplásticos, con los cuales el diseñador puede intervenir en las características del asfalto.

Al modificar el asfalto por vía húmeda, las variaciones que pueden causar en las propiedades dependen de los siguientes factores: condiciones de mezclado, características del polímero, características del asfalto, temperatura y finalmente la compatibilidad entre el polímero y el asfalto. Becker (2001) afirma que: “Estos factores pueden variar según las propiedades que se deseen mejorar en el asfalto y la durabilidad, ya sea para reducir ciclos de vida o disminuir costos por mantenimiento” (p.90).

#### **7.4.1.1 Características del asfalto modificado**

En su investigación, Lozano Ruiz (2005) afirma que el comportamiento reológico de los enlaces polímero (TP)-asfalto son de gran interés debido a su efecto sobre las propiedades del asfalto incluso cuando solo se agrega el polímero en pequeñas cantidades. La modificación busca el aprovechamiento del asfalto por medio del mejoramiento de sus características mecánicas.

Según Montejo(2002)con la modificación del asfalto se busca:

- Aumentar la durabilidad del pavimento.
- Aumentar la estabilidad y solidez de las mezclas.
- Aumenta la resistencia a fatiga de las mezclas.
- Reducir la rigidez del asfalto expuesto a bajas temperaturas, previniendo la fisuración térmica.

- Mejorar la cohesión, brindando mejor retención de los agregados.
- Mejorar la adhesión con los agregados pétreos
- Aumentar los espesores de recubrimiento del agregado en las mezclas abiertas.
- Aumentar la viscosidad a bajas velocidades.
- Disminuir la susceptibilidad térmica de la mezcla.
- Reducir la exudación del asfalto.

#### ***7.4.1.2 Asfalto Modificados con Polímeros***

La incorporación de polímeros al asfalto conlleva a cambiar las propiedades del asfalto original y su estructura, la razón de cambio de esta dependerá, según Montejo(2002) de los siguientes factores:

- Composición y estructura molecular del polímero incorporado.
- Composición química y estructura coloidal
- Proporción relativa de asfalto polímero
- Proceso de incorporación

Cuando se mezcla un polímero con el asfalto sin tener en cuenta los factores anteriormente mencionados puede suceder lo siguiente (Montejo, 2002, p 623):

- Se puede producir una mezcla heterogénea en donde los componentes de la mezcla se segregan debido a la incompatibilidad del asfalto y el polímero.
- Se puede obtener una mezcla totalmente homogénea, esto debido a una perfecta compatibilidad pero sin llegar a mejorar o modificar las propiedades del asfalto en comparación con el asfalto original.
- Se puede tener una mezcla micro-heterogénea, este caso es el deseado en las modificaciones con polímeros porque ocurre una modificación de las propiedades originales del asfalto y existe una compatibilidad adecuada.

### 7.4.1.3 Elección del polímero compatible

Para realizar la modificación del asfalto se necesita conocer las propiedades que deben tener los polímeros para obtener una modificación deseada, de acuerdo con Montejo(2002), algunas de estas propiedades deben ser:

- Cadena general suficientemente larga
- Peso molecular elevado
- Baja polaridad
- Baja temperatura de transición vítrea

En la Tabla 9 se muestra las propiedades obtenidas con cada tipo de polímero utilizado en la modificación del asfalto, los polímeros termoendurecibles o termoestables (TE) mejoran las propiedades de adhesión a los agregados y aportan resistencia a la deformación permanente, aunque el costo es considerablemente alto respecto a un elastómero o al caucho de llanta:

**Tabla 9.** Ventajas de Modificación de los Distintos Tipos de Polímeros.

Polímero	Resistencia			Adhesión a los agregados	Resistencia al envejecimiento	Incremento de costo
	A la deformación permanente	Al agitación				
Termoendurecibles	+++	++	++	+	+	Muy alto
Elastómeros	++	++	++	+	0+	Medio Alto
Plastómeros	1	+	0	0	0	Medio medio
Caucho de llanta usada	0/1	+/11	1	0	0	Medio
+++ muy efectivo ++ mejora sustancial + mejora significativa 0 poca o ninguna mejora						

Fuente. MONTEJO FONSECA, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras Toma I*. Bogotá, D.C.: Ediciones y Publicaciones. p 625.

## 8 MATERIALES Y MÉTODOS

### 8.1 MATERIALES

#### 8.1.1 *Asfalto*

El asfalto empleado en la investigación fue proporcionado por la empresa INCOASFALTO S.A localizada en la zona rural del municipio de Mosquera y corresponde a un asfalto 80/100(Ver Ficha Técnica ANEXO A).La Tabla 10 muestra las especificaciones del asfalto utilizado en esta investigación.

**Tabla 10.** Caracterización del Asfalto

Ensayo	UND	Resultado	Norma
<b>Penetración (25°C, 100 g, 5s)</b>	mm/10	94	AASHTO T 49 – 07
<b>Punto de Ablandamiento con aparato de anillo y bola</b>	°C	46	AASHTO T 53 – 09
<b>Índice de Penetración</b>	-	-0,67	INV E-724 07
<b>Viscosidad absoluta (60°C)</b>	P	1510	AASHTO T 316 – 04
<b>Ductilidad (25°C, 100g, 5s)</b>	cm	>150	AASHTO T 51-09
<b>Solubilidad en tricloroetileno</b>	%	99,8	AASHTO T 44 – 03
<b>Punto de Ignición mediante la copa abierta de Cleveland</b>	°C	290	AASHTO T 48 – 04

Fuente. Archivo personal autoras

#### 8.1.2 *Polímero termoestable*

El polímero termoestable utilizado en la modificación del asfalto fue el residuo de componentes electrónicos, específicamente, carcasas de celulares, teclados, monitores de computadores y carcasas de televisores.



El material fue proporcionado por la empresa de reciclaje de residuos electrónicos GAIA VITARE Ltda. A este material se le realizó un primer tamizado para facilitar la remoción de polvo y componentes que pudieran afectar los ensayos; posteriormente fue triturado en un molino de cuchillas en la empresa “Recuperación Técnica de Plásticos RETEPLAS” y tamizado por segunda vez para tener conocimiento de los tamaños de partículas obtenidos debido a la trituración. En la Figura 15 se aprecian fotografías del material antes, durante y después de su trituración. El tamizado permitió identificar que el tamaño máximo nominal del material antes de su trituración era 1/2”.

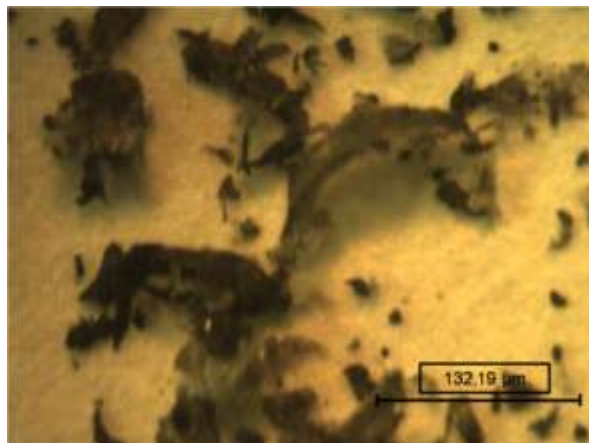
**Figura 15.** Carcasas de Residuos Electrónicos Antes y Después.

(a) Carcasas de residuos electrónicos antes de la trituración; (b) Proceso de trituración; c) Carcasas de residuos electrónicos después de la trituración



Fuente. Archivo personal autoras

El asfalto fue modificado con partículas de tamaños pasantes tamiz N° 10 (2 mm) basados en la investigación realizada por GUO y col (2009). En la Figura 16 se muestran las partículas de carcasas vistas a través del estereoscopio (Advanced optical Microscope WF10x/23) donde es posible observar la distribución de los tamaños utilizados para la modificación.

**Figura 16.** Partículas de Carcasa de Residuos Electrónicos Trituradas.

Fuente. Archivo personal autoras.

**Tabla 11.** Granulometría del Material Antes de la Trituración.

**Peso total de la muestra de Carcasas de residuos electrónicos: 2 000 g**

Tamiz	Abertura [mm]	Peso [g]	Peso [%]	Ret. Acumulado [%]	Pasa [%]
03-abr	19	0		0	100
1/2	12,7	178	8,9	8,9	91
3/8	9,5	172	8,6	17,5	83
1/4	6,35	180	9	26,5	74
#4	4,75	44	2,2	28,7	71
#8	2,36	160	8	36,7	63
#10	2	416	20,8	57,5	43
#20	0,85	238	11,9	69,4	31
#30	0,6	208	10,4	79,8	20
#40	0,43	188	9,4	89,2	11
#60	0,25	144	7,2	96,4	4
#100	0,15	24	1,2	97,6	2
#200	0,08	24	1,2	98,8	1
Fondo		24	1,2	100	0
<b>Total</b>		2000			

Fuente. Archivo personal Autoras

En la Tabla 11 se muestra la granulometría del material proporcionado por Gaia Vitare LTDA después de su trituración, las partículas finas obtenidas a partir del tamiz #10 representan el 63% del material tamizado, sin embargo solamente el 1,2% del peso total es retenido en el tamiz #200.

### **8.1.3 Agregados**

Los agregados fueron proporcionados por la empresa INCOASFALTO S.A localizada en la zona rural del Municipio de Mosquera.

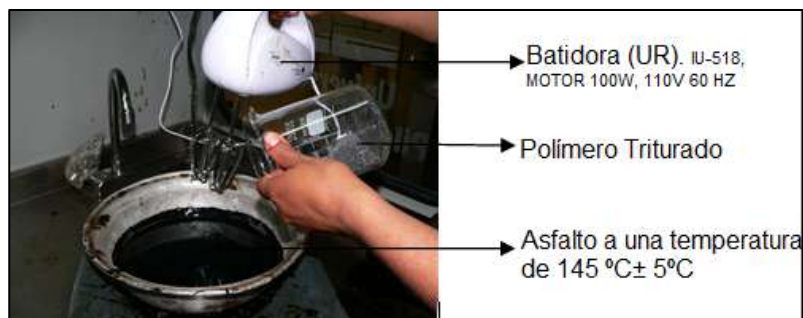
El tamaño de la material proporcionado estaba dentro del orden de 3/8" (9.5 mm) correspondiente a los requerimientos para la realización de los ensayos de cubrimiento del agregado con materiales asfálticos en presencia de agua (stripping) y adherencia en bandeja.

## **8.2 PROCEDIMIENTO**

La modificación del asfalto se realizó siguiendo la metodología expuesta en la Figura 18, la temperatura de mezclado (polímero + asfalto) fue de  $145\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , el tiempo de mezclado varió entre 30 min y 60 min, con el fin de identificar el tiempo de mezclado óptimo de acuerdo a los ensayos preliminares de stripping y penetración, en el capítulo 8.4.1 se profundizan los detalles de la elección del tiempo de mezclado. Se efectuó la mezcla Asfalto-Polímero con una batidora marca UNIVERSAL ROYAL, IU-518, MOTOR 100W, 110V 60 HZ, tal como se muestra en la Figura 17. Las variables de mezclado se establecieron teniendo en cuenta la investigación realizada por Jiuyong et al (2008).

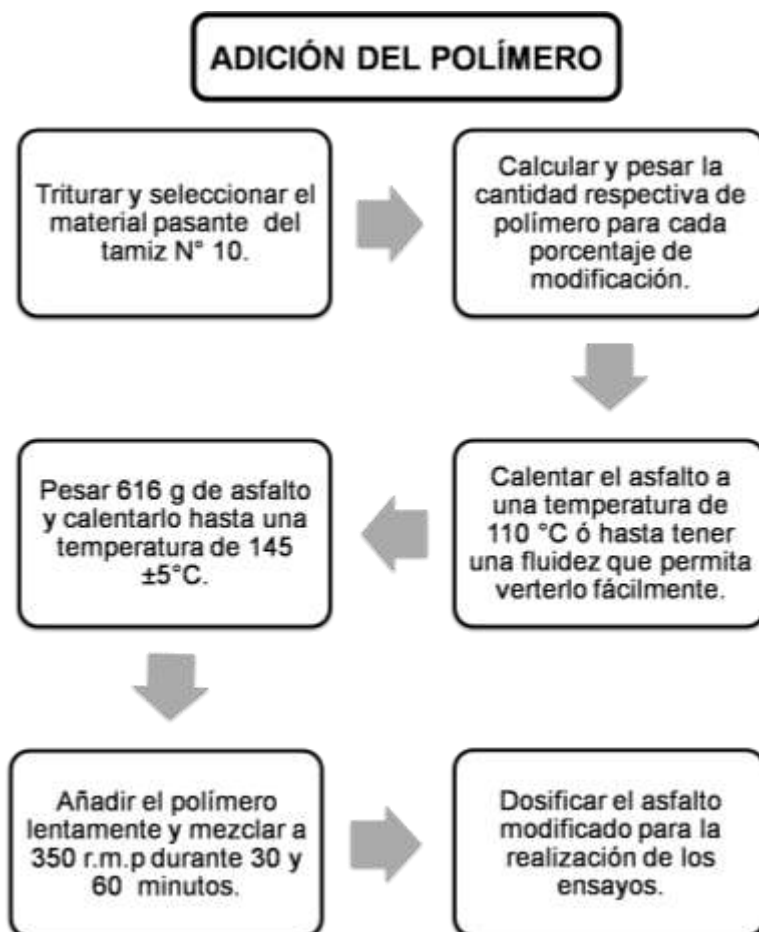
Para poder comparar las propiedades del asfalto en función del contenido de polímero agregado, los porcentajes de polímeros utilizados fueron: 5 p/p %, 10 p/p %, 15 p/p %, 20 p/p %, 25 p/p % y 40 p/p %.

**Figura 17.** Mezcla Asfalto Polímero



Fuente. Archivo personal autoras

**Figura 18.** Metodología de Modificación del Asfalto



Fuente. Archivo personal Autoras

### 8.3 ENSAYOS

Para la realización de los ensayos en cada porcentaje, se utilizó la siguiente dosificación:

- Penetración de los materiales asfálticos: 500 g
- Punto de ablandamiento de los materiales bituminosos: 10 g
- Ductilidad de los materiales asfálticos: 100 g
- Viscosidad rotacional empleando un Viscosímetro Brookfield: 20 g
- Adherencia en bandeja: 100 g
- Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (stripping):  $5 \pm 1$  g

Todos los ensayos descritos anteriormente se le realizaron al asfalto convencional y sus resultados se emplearon para cada uno de los análisis.

#### **8.3.1 Penetración de los materiales asfálticos. AASHTO T 49 – 07**

El ensayo de penetración del asfalto se realizó según la norma AASHTO T 49 – 07. Se fabricaron seis muestras para cada uno de los porcentajes de modificación teniendo un total de 42 muestras. (Ver resultados en ANEXO B).

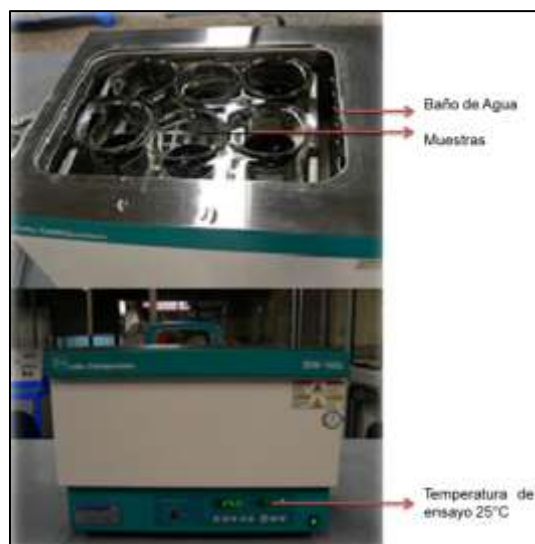
Para la realización de este ensayo se calentaron 500 g de asfalto hasta una temperatura de 110 °C con el fin de verterlos fácilmente en moldes cilíndricos de dimensiones y especificaciones definidas en la norma. El proceso de llenado de los recipientes se realizó estando estos a la misma temperatura del asfalto por capas (de 2 a 3 capas), entre las cuales se agitó el recipiente hacia abajo para facilitar el asentamiento del asfalto y evitar la formación de burbujas en la muestra.

Antes de iniciar la prueba de penetración los moldes se cubrieron durante 1 hora para evitar su contaminación y se sumergieron por otra hora en el baño de agua (Modelo BW-106 de Labs Complements) a 25°C.

Se tomaron tres lecturas de penetración garantizando que cada una de las muestras estuviera cubierta completamente por el agua del baño con una aproximación de 0.1 mm por encima de la superficie del asfalto.

El equipo utilizado para la ejecución del ensayo fue un penetrómetro automático Modelo 81-B0101/D2 con una masa móvil de  $100 \pm 1$  g, calibrado de tal manera que el tiempo de ensayo fuera de 5 s. En la Figura 19 se observan las muestras en el periodo de inmersión a 25°C durante 1 h.

**Figura 19.** Ensayo de Penetración del Asfalto



Fuente. Archivo personal autoras

### **8.3.2 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos. AASHTO T 53 – 09**

El ensayo de punto de ablandamiento del asfalto se realizó según la norma AASHTO T 53 –09. Se fabricaron dos muestras para cada uno de los porcentajes de modificación teniendo un total de 14 muestras. (Ver resultados en ANEXO C).

Para la realización de este ensayo, tanto el asfalto sin adición de polímero como el asfalto modificado se llevaron hasta una temperatura de  $110^{\circ}\text{C}$ , de tal forma que permitiera su fácil vertimiento en los anillos de bronce, que previamente se habían calentado a la misma temperatura del asfalto. Durante el transcurso del enfriamiento de los especímenes (30 minutos) en la plancha lubricada con glicerina como agente aislante para evitar la adherencia del asfalto, se preparó el baño de agua con una temperatura de iniciación de  $5\pm 1^{\circ}\text{C}$ , para lo cual fue necesaria la utilización de hielo. Las muestras se enrasaron y se ubicaron dentro del baño de agua después del periodo de enfriamiento durante 15 min para luego realizar el montaje completo y proceder a la ejecución del ensayo<sup>1</sup>. En la Figura 20 se muestra el procedimiento del ensayo de punto de ablandamiento.

**Figura 20.** Ensayo de Punto de Ablandamiento del Asfalto.

a) Muestras de asfalto; b) Temperatura de iniciación; c) ejecución del ensayo.



Fuente. Archivo personal autoras

### 8.3.3 Ductilidad de los materiales Bituminosos. AASHTO T 51-09

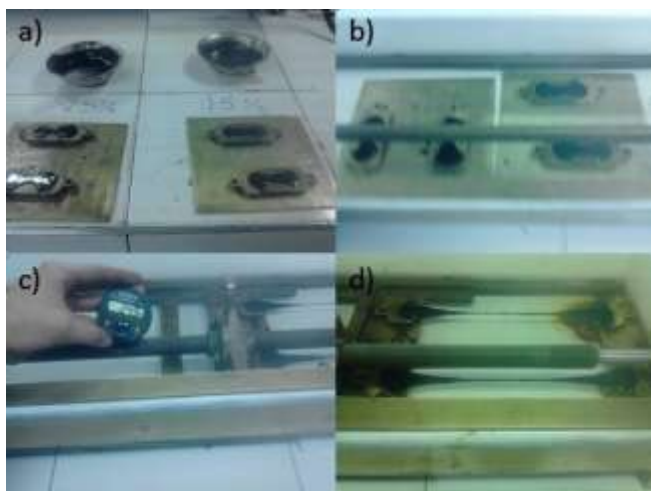
El ensayo de ductilidad del asfalto se realizó según la norma AASHTO T 51. Las muestras fabricadas, se realizaron de acuerdo a los resultados de penetración y punto de ablandamiento, con el fin de escoger los porcentajes de ensayo, los cuales fueron: 15 y 25 p/p %, para un total de 4 muestras.

---

<sup>1</sup>Para el calentamiento del conjunto se utilizó un mechero de gas, con el cual se graduó el aumento de temperatura constante de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Para la realización de este ensayo se calentaron 100 g de asfalto hasta una temperatura de  $90 \pm 10$  °C de tal manera que el asfalto fluyera con el fin de verterlos fácilmente en moldes engrasados tal como lo especifica la norma. Una vez calentado el asfalto y engrasado los moldes se procedió hacer el llenado (Figura 21a) con un flujo fino y avanzando de extremo a extremo, posteriormente se dejaron enfriar a temperatura ambiente durante 30 min para dejarlos durante el mismo tiempo en el baño de agua a  $25 \pm 0,5$ °C. Una vez concluido este tiempo se procedió a realizar el ensayo llevando las muestras al ductilómetro introduciendo las clavijas en el sistema y avanzando con una velocidad de tracción de  $\pm 50$  mm por minuto, se esperó hasta que el asfalto formó un hilo pequeño y se rompiera (Figura 21d), finalmente se midió la distancia en que la muestra se rompió que corresponde a la ductilidad del asfalto. (Ver resultados ANEXO D)

**Figura 21.** Ensayo de Ductilidad de los Materiales Asfálticos



Fuente. Archivo personal autoras

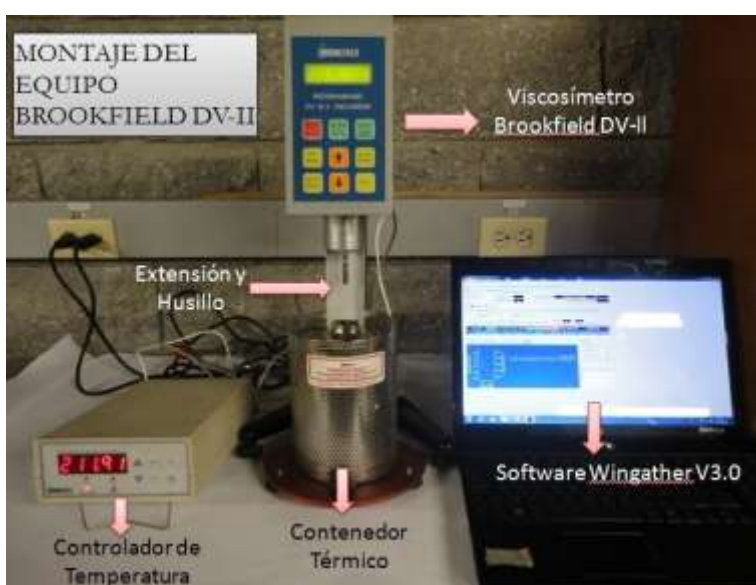
#### **8.3.4 Viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. AASHTO T 316 – 04**

El ensayo para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional BROOKFIELD DV- II, se realizó según la norma AASHTO T 316 – 04. Para conocer la incidencia de la adición del polímero en la viscosidad a distintas temperaturas se fabricó 1 muestra por cada uno de los porcentajes de modificación para un total de 7 muestras y se elaboraron 2 muestras más de 15 y 25 p/p % para evaluar el efecto de la velocidad de rotación en la viscosidad del asfalto modificado. (Ver resultados ANEXO E)



Antes de realizar el ensayo de viscosidad rotacional se programó el controlador de temperatura y el software Wingather V3.0 para definir: velocidad, temperatura, spindle, número de datos requeridos y el tiempo de estabilización en el que la muestra debe estar en reposo. Posteriormente se niveló el contenedor térmico y la cabeza rotacional del equipo Brookfield DV– II como se observa la Figura 22. Finalizado el montaje se guardó la programación en el viscosímetro para iniciar el ensayo.

**Figura 22.** Montaje del Equipo Brookfield DV-II



Fuente. Archivopersonal autoras

Para este ensayo se utilizaron 13 gr de asfalto por muestra, inicialmente se procedió a calentar el asfalto a una temperatura de 80 °C, de tal manera que permitiera el fácil vertimiento en los tubos de ensayo mostrados en la Figura 23. Posteriormente se precalentó el contenedor térmico y el spindle, con el fin de que tuvieran la temperatura inicial del ensayo, en este caso 100°C, consecutivamente se insertó el tubo de ensayo en el contenedor térmico y se realizó el montaje de la aguja y el spindle seleccionado. Terminado el montaje se bajó suavemente la aguja hasta que hizo tope la guía del ensayo sobre la base del contenedor, de tal manera que penetrara en la muestra de asfalto y cubriera la parte superior del spindle. Finalmente se inició la programación, oprimiendo al mismo tiempo el botón Run del controlador de temperatura y al

viscosímetro Brookfield. Al finalizar el ensayo se guardaron los datos arrojados por el programa Wingather V3.0.

**Figura 23.** Muestras del Ensayo de Viscosidad.



Fuente. Archivopersonal autoras

### **8.3.5 Adherencia en bandeja. I.N.V.E 740-07**

La adherencia en bandeja se realizó según la norma I.N.V E 740-07. Para este ensayo se fabricó una muestra por cada uno de los porcentajes de modificación para un total de 7 muestras, y se utilizaron 100 (gr) de asfalto y 50 partículas de agregado grueso. Antes de empezar el ensayo se lavaron las cincuenta partículas y se secaron en el horno durante 24 horas a una temperatura de  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . El asfalto se calentó a una temperatura entre  $90^{\circ}\text{C}$  a  $110^{\circ}\text{C}$ , de tal forma que tuviera la fluidez necesaria para verter una película de 2 mm de espesor en una bandeja de acero limpia y seca. Posteriormente el asfalto se dejó enfriar hasta una temperatura comprendida entre  $50^{\circ}\text{C}$  y  $60^{\circ}\text{C}$  para colocar cada partícula de agregado. El conjunto bandeja-asfalto-agregado, se dejó a temperatura ambiente durante 30 min, para luego dejarlo en el horno a  $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  durante 24 h como se observa en la Figura 24. Al culminar este tiempo, se cubrieron los agregados totalmente con agua destilada y se dejó la bandeja a temperatura ambiente durante cuatro días; para luego retirar cada una de las partículas con ayuda de un alicate y evaluar visualmente el porcentaje de adherencia del asfalto en cada agregado.

**Figura 24.** Ensayo de Adherencia en Bandeja del Asfalto



Fuente. Archivo personal autoras

### ***8.3.6 Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua. AASHTO T 182 – 84***

El ensayo de Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua se realizó según la norma AASHTO T 182 – 84. Para este ensayo se elaboró una muestra por cada uno de los porcentajes de modificación para un total de 7 muestras.

Inicialmente los agregados fueron lavados para remover partículas adheridas en la superficie que pudieran generar efectos negativos en el ensayo de cubrimiento y se secaron a una temperatura de 135°C en el horno hasta obtener peso constante. A partir de este momento, se dejaron durante 1h a una temperatura de 140°C. Transcurrida 1h, se mezcló el asfalto a la misma temperatura con los 100 g de agregados hasta que quedaron cubiertos totalmente; la mezcla se dejó enfriar aproximadamente 40 min y se colocó en 400 ml de agua destilada durante 15 h. Finalmente se realizó la inspección visual, detallando si las caras de los agregados seguían cubiertas de asfalto, expresando el resultado como mayor o menor del 95% de cubrimiento. En la Figura 25 se observa la muestra en agua destilada para evaluar el porcentaje de área cubierta.

**Figura 25.** Ensayo de Cubrimiento de los Agregados con Materiales Asfálticos.



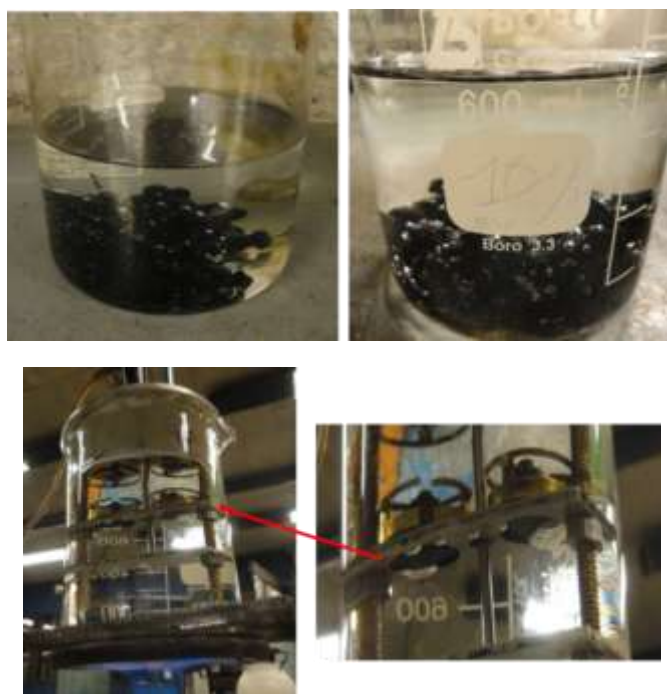
Fuente. Archivo personal autoras

## 9 RESULTADOS

### 9.1 REVISIÓN TIEMPOS DE MEZCLADO

A medida que se realizaron los ensayos para cada porcentaje de modificación en un tiempo de mezcla de 60 minutos, se observó la aparición de numerosas burbujas en la mezcla, como se puede apreciar en la Figura 26, en la cual se tiene un espécimen en agua destilada para el ensayo de cubrimiento de agregados o stripping con burbujas en la superficie y una muestra del ensayo de punto de ablandamiento con burbujas en cada anillo de bronce a medida que aumentaba la temperatura.

**Figura 26.** Asfalto Modificado con un Tiempo de Mezclado de 60 min.

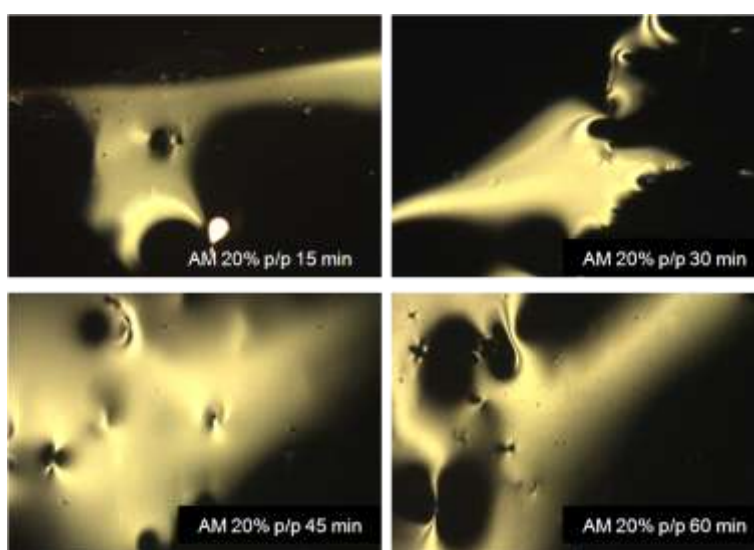


Fuente. Archivo personal autoras

Debido a la aparición de estas burbujas, se hizo necesario el replanteo del tiempo de mezclado. Para la determinación del tiempo óptimo de mezcla se realizaron 3 muestras con el 20

% de adición de polímero a distintos periodos, 15, 30, 45 y 60 minutos, que fueron observadas a través del estereoscopio después de transcurridas 24 horas, para evaluar visualmente la relación entre la cantidad de burbujas y el tiempo de mezclado. En la Figura 27 se pueden observar las imágenes obtenidas a través del estereoscopio (Advanced optical Microscope WF10x/23) de cada uno de los porcentajes, en donde es posible afirmar que a los 15 y 30 minutos de mezclado se presentaron la menor cantidad de burbujas.

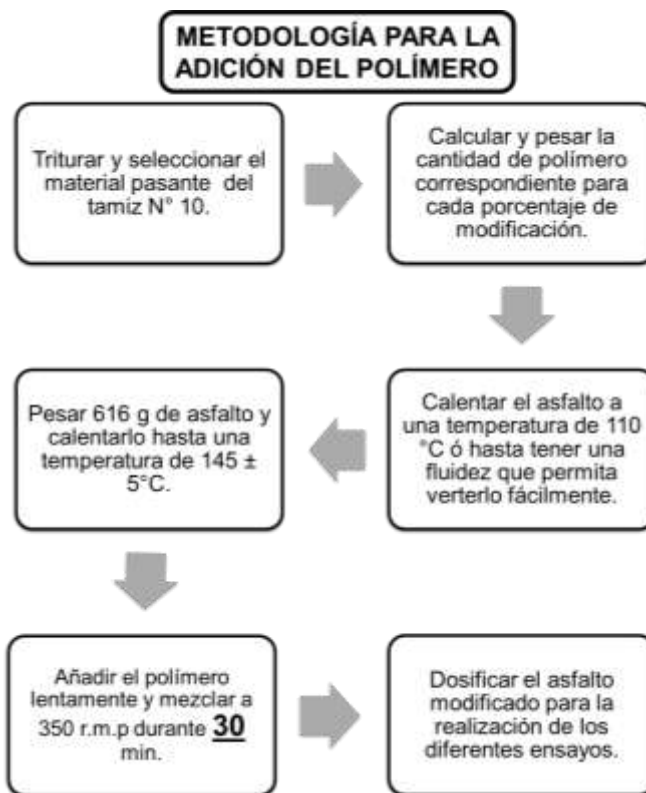
**Figura 27.** Fotos Microscópicas de Asfalto Modificado



Fuente. Archivo personal autoras

En la inspección visual se confirmó que el tiempo óptimo de mezclado era 30 minutos, esto debido a que presentaba una cantidad mínima de burbujas y además porque a 15 minutos, aunque no presentaba cantidad significativa de burbujas, el polímero no se ha mezclado perfectamente con el asfalto y de acuerdo a la investigación de Jiuyong et al. (2008), el tiempo mínimo de mezclado debe ser 30 min. La metodología seguida con un tiempo de 30 min se presenta en la Figura 28.

**Figura 28.** Metodología Final



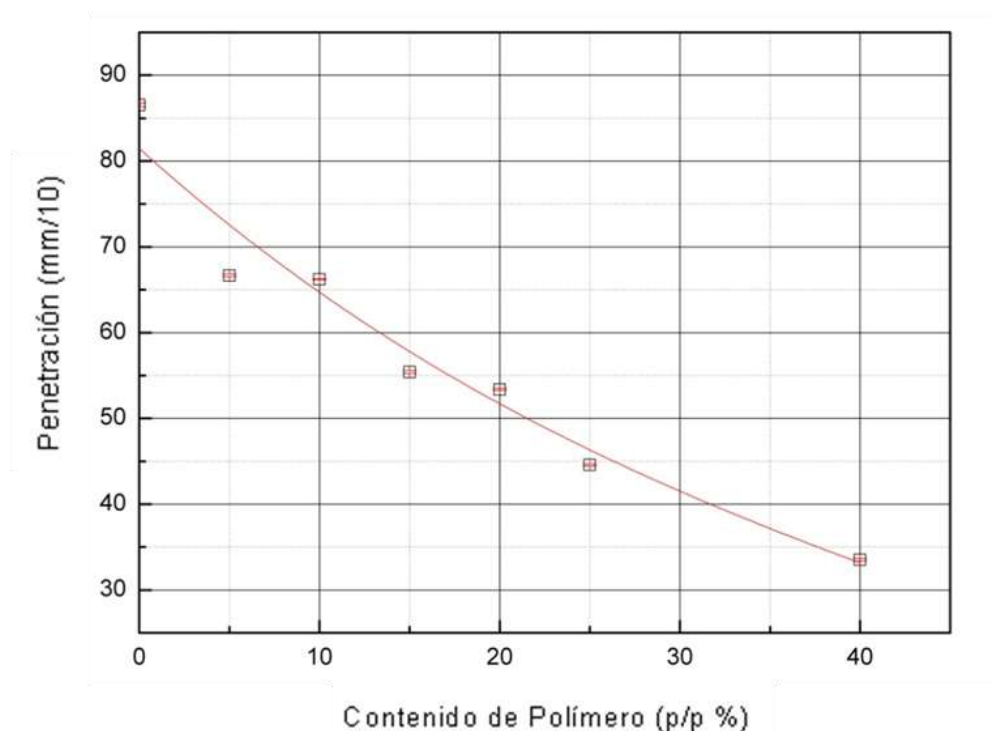
Fuente. Archivopersonal autoras

## 9.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

### 9.2.1 Penetración de asfalto

En la Figura 29 se muestran los resultados del ensayo de penetración para cada uno de los porcentajes de modificación del asfalto a una temperatura de 25°C, donde se evidencia el endurecimiento del asfalto debido al incremento del contenido de polímero. Se ajustaron los resultados a un polinomio de orden 3.

**Figura 28.** Ensayo de Penetración en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE)



Fuente. Archivo personal autoras

La penetración expresada en unidades de 1/10mm, disminuye progresivamente con el incremento de TE, reduciendo la penetración hasta un 61% al modificarla con 40 p/p %. Identificando mayor resistencia a la penetración, aumentando su consistencia y elevando su rigidez.

Durante la ejecución del ensayo y a medida que se avanzaba con cada porcentaje, la manipulación del asfalto se tornó complicada y se notó que la adición del polímero generaba un incremento en la consistencia del asfalto, a tal punto que con el 40 p/p % de polímero, este alcanzó una penetración de 33.5 mm/10, llegando a una condición de rigidez que podría ser perjudicial en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica como fisuración térmica en climas particularmente fríos, en el momento de bombeo y en el mezclado en obra. Pero con una adición del 10 al 25 p/p % de polímero se puede observar una rigidización que mejoraría las



condiciones del pavimento en climas cálidos; logrando disminuir la exudación, la deformación permanente, el ahuellamiento, etc (Montejo, 2002).

### **9.2.2 Punto de ablandamiento**

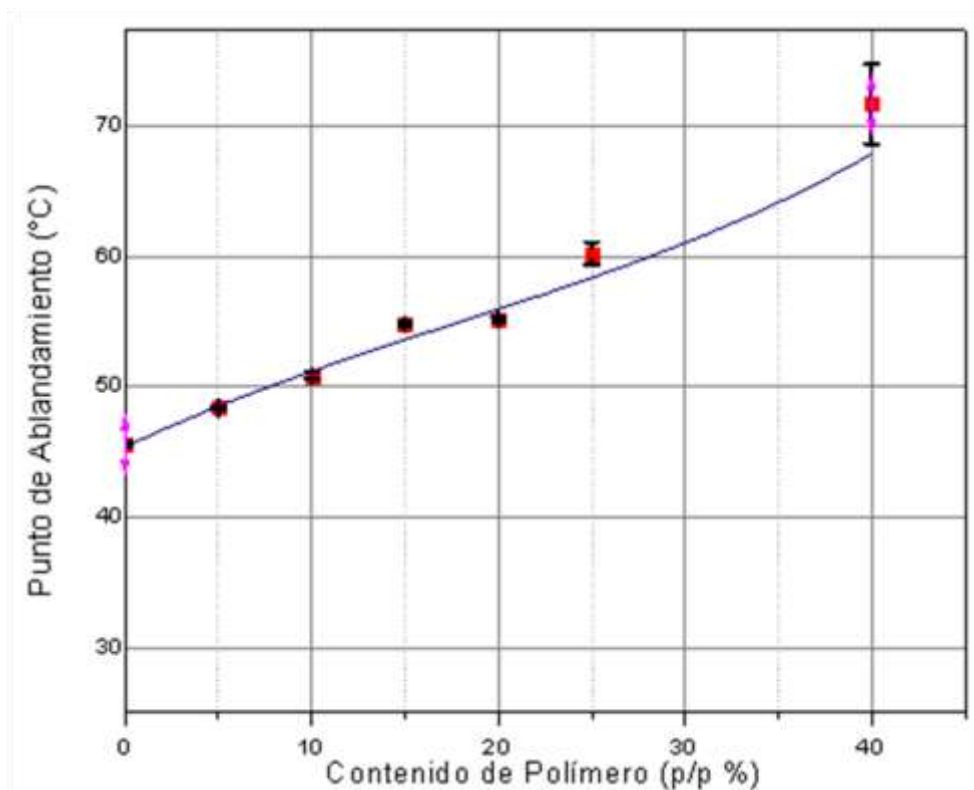
Al rigidizarse el asfalto debido a la adición del polímero termoestable (TE), su punto de ablandamiento experimentará igualmente un aumento significativo. Por medio de la experimentación se corroboró que con el aumento del contenido de polímero, la temperatura de ablandamiento del asfalto asciende considerablemente.

Como se aprecia en la Figura 30, para el contenido de 40 p/p % de polímero se tiene un margen de error de  $\pm 3,04$  °C, un error grande considerando el rango de error en los otros ensayos (0.05-0.4 °C), en este porcentaje en particular cada una de las bolas de acero cayeron a una temperatura diferente y por fuera del intervalo de diferencia que enfatiza la norma ( $\pm 1$  °C), debido a que la mezcla no era del tipo micro-heterogénea por la distribución de los tamaños del polímero que no garantizaba que las dos muestras fueran totalmente idénticas. La adición de un 25 p/p % de TE, presentó resultados óptimos, aumentando en un 32% la temperatura con respecto a la temperatura de ablandamiento del asfalto convencional de 46°C, sin embargo el aumento no fue progresivo entre los porcentajes del 15% y 20%, donde se obtuvo respectivamente 54.8°C y 55.2°C.

Los resultados presentados en la gráfica de Punto de Ablandamiento en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE) se ajustan a un polinomio de orden 3.

La adición del polímero disminuye la susceptibilidad térmica del asfalto, siendo así tendría aplicaciones en regiones del país donde la temperatura promedio anual es mayor a 25°C y se presentan fallas por ahuellamiento.

**Figura 29.** Ensayo de Punto de Ablandamiento en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE)



Fuente. Archivo personal autoras

### 9.2.3 Índice de Penetración

Los resultados obtenidos en los ensayos previos confirmaron que la adición del polímero generó un aumento considerable en la consistencia del asfalto y una disminución en la susceptibilidad térmica del mismo.

El índice de penetración al ser un parámetro que permite clasificar los cementos asfálticos según su susceptibilidad térmica, ratificó que al incrementar el porcentaje de polímero en el asfalto, éste es capaz de soportar mayores temperaturas, respecto a un asfalto convencional 80/100, sin deformarse.

Como se aprecia en la Tabla 12, al modificar el asfalto con contenidos mayores de 30 p/p % de polímero el asfalto estaría en la categoría de poca susceptibilidad a la temperatura (INV E 724-07).

El asfalto modificado con los porcentajes entre 5 y 25 p/p % de TE, tuvo una variación normal del índice de penetración para asfaltos empleados en Colombia. El índice de penetración se hace menos negativo a medida que el porcentaje de TE aumenta, indicando una menor susceptibilidad térmica y por ende una mayor adición de TE generaría un endurecimiento del asfalto.

**Tabla 12.** Índice de Penetración en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE)

Contenido de Polímero ( p/p %)	Índice de penetración (IP)
0%	-1,0
5%	-0,93
10%	-0,30
15%	0,18
20%	0,18
25%	0,79
40%	2,12

Fuente. Archivo personal autoras

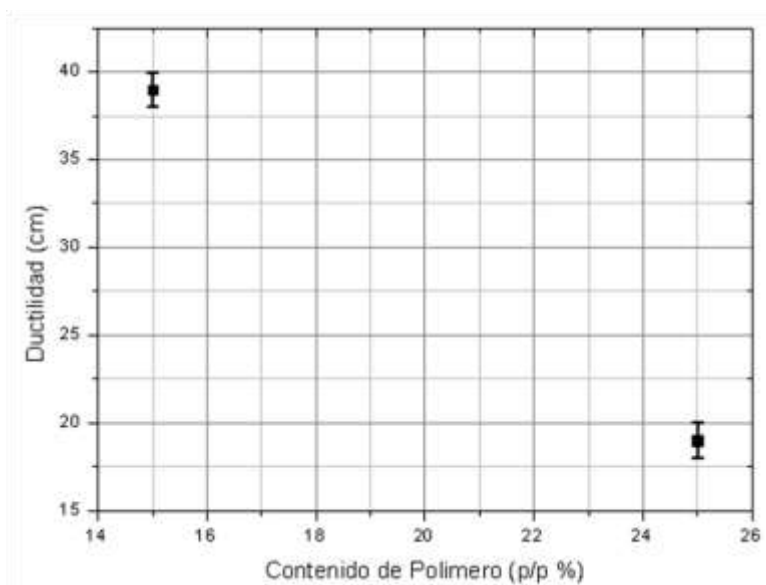
#### 9.2.4 Ductilidad

La ductilidad es una propiedad de los asfaltos para mantenerse coherentes bajo las grandes deformaciones inducidas por el tránsito, un alto valor de ductilidad en el asfalto genera un aumento en su susceptibilidad a temperaturas altas y por ende podría presentarse ahuellamiento en el pavimento (Montejo, 2002).

La ductilidad se evaluó con el 15 y 25 p/p % de contenido de polímero teniendo en cuenta que con estos porcentajes se obtuvo un asfalto de comportamiento óptimo en los ensayos de punto de ablandamiento y de penetración, asimismo su índice de penetración se mantuvo entre el rango de -1 y 1.

En la Figura 31 se comprueba que la adición del polímero produjo un decremento en la ductilidad del asfalto; con el 25% de adición la ductilidad obtenida fue de 19 cm experimentando una disminución del 51% en comparación con un contenido de polímero termoestable (TE) de 15%.

**Figura 30.** Ductilidad en Función del Contenido de Polímero Termoestable (TE)



Fuente. Archivo personal autoras

### 9.2.5 Viscosidad rotacional

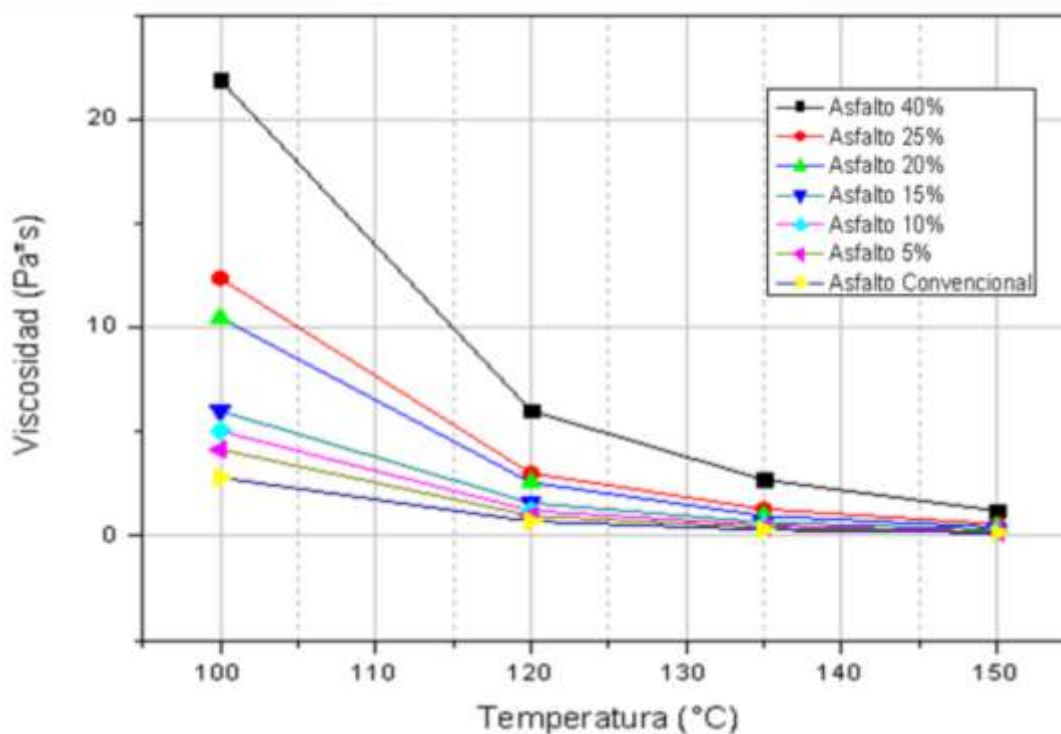
Como lo afirma Montejo(2002), el ensayo de viscosidad tiene como objetivo la determinación del estado de fluidez del asfalto en el rango de temperaturas que se usan durante su aplicación. Para la realización de este ensayo se evaluó el comportamiento de la viscosidad en función de: la temperatura (Figura 32) y de la velocidad de rotación (Figura 33 a y b) para los

porcentajes de 15 y 25 p/p % debido a que en estos porcentajes el asfalto modificado tuvieron un comportamiento óptimo en los ensayos previos.

En la Figura 32 se observa que la adición del polímero incrementó la viscosidad del asfalto a temperaturas entre los 100°C-120°C, aunque a partir de los 135°C el incremento en la viscosidad fue menos significativo en comparación al asfalto convencional, exceptuando el asfalto modificado con 40 p/p% de TE, con el que se hizo necesario el cambio de spindle para realizar las mediciones, la viscosidad a 100°C en este caso, aumentó 19,08 Pa\*s con respecto al asfalto convencional, siendo este el mayor incremento observado.

A una temperatura de 100°C, la viscosidad se incrementó 7,48Pa\*s con un porcentaje de sustitución de 20 p/p % de polímero en relación con el asfalto sin modificar, sus viscosidades respectivamente fueron 10,5 Pa\*s y 2,8 Pa\*s.

**Figura 31.** Viscosidad en Función de la Temperatura



Fuente. Archivo personal autoras

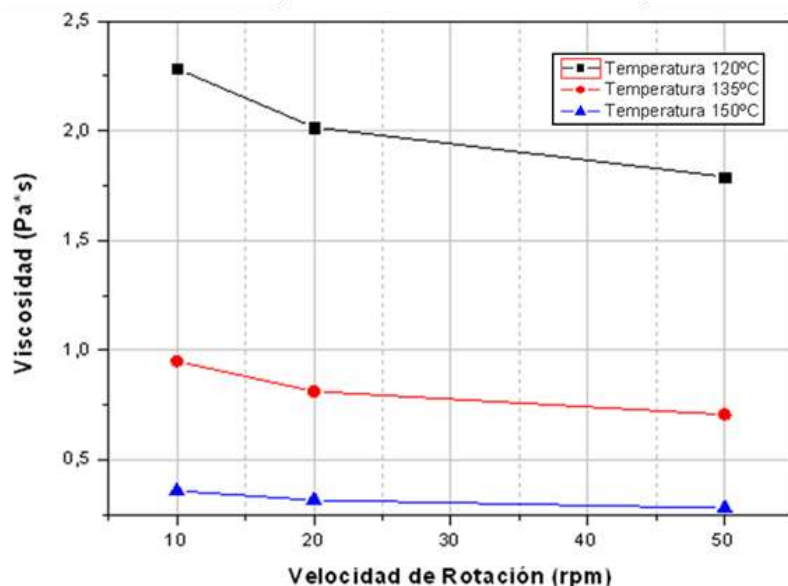
Se puede considerar con los resultados anteriores que la adición de polímero conlleva requerir temperaturas mayores a 135°C para los procesos de mezclado y compactación, si se tiene en cuenta que a estas temperaturas el efecto del contenido de polímero sobre la viscosidad del asfalto es menor que a temperaturas inferiores.

En la Figura 33 se evalúa la viscosidad de los porcentajes del 15 y 25 p/p % de adición de TE a diferentes temperaturas y velocidades. En la Figura 33a, se aprecia que el incremento de la velocidad de rotación generó un patrón de disminución de la viscosidad en las tres temperaturas, sin embargo a 150°C la viscosidad no varió considerablemente con los cambios de velocidad de rotación por lo cual ésta sería una temperatura ideal de mezclado y de bombeo.

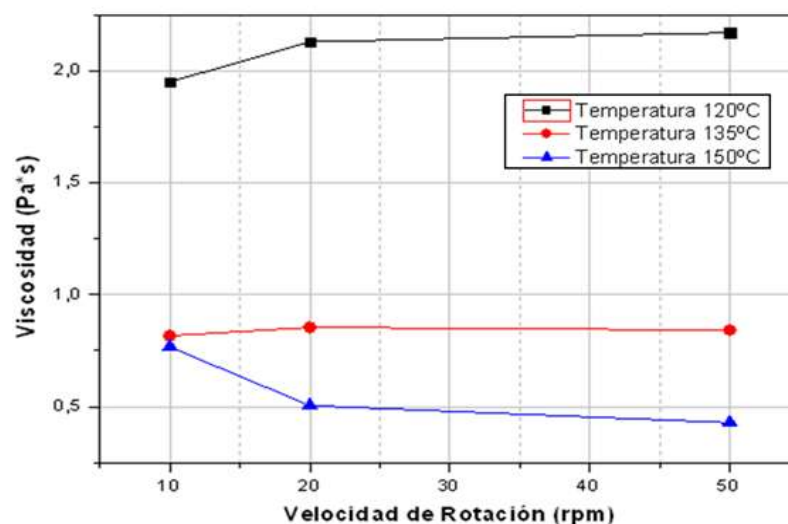
En la Figura 33b, para un asfalto modificado con 25 p/p %, la viscosidad obtenida a 120°C aumentó moderadamente con el incremento de la velocidad aunque a 150°C este cambio en la velocidad de rotación generó una disminución en la viscosidad del asfalto modificado, por lo tanto a temperaturas iguales o mayores a 150°C la viscosidad experimentará decrementos con cambios de velocidad de rotación. En contraste, a una temperatura de ensayo de 135°C, el incremento en la velocidad tuvo un efecto insignificante en la viscosidad del asfalto, haciéndola constante.

La viscosidad en los dos casos de modificación aumentó a medida que la temperatura es menor.

**Figura 32.** Viscosidad en Función de la Velocidad de Rotación.



a). Asfalto 80/100 modificado  
con 15 p/p% de TE



b). Asfalto 80/100 modificado  
con 25 p/p% de TE

Fuente. Archivo personal autoras

### 9.2.6 Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua

El agua no interfirió en el cubrimiento del agregado con la película asfáltica en ninguno de los porcentajes ensayados. Después de las 18 horas de inmersión el recubrimiento de la

superficie del agregado grueso fue del 100%, por lo tanto la adición de TE no generó ningún efecto negativo en la adherencia del asfalto al agregado.

### **9.2.7 Adherencia en bandeja**

La adición del polímero no afectó negativamente la adherencia con las partículas de agregados, y aunque es un ensayo subjetivo, en comparación con el asfalto convencional se pudo afirmar que mejoró esta propiedad, debido a que al manejar mayores porcentajes de modificación se requirió mayor esfuerzo para retirar las 50 partículas de agregado; se comprobó que el asfalto modificado es compatible con el agregado grueso.

## **9.3 REVISIÓN PRELIMINAR DE COSTOS**

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que los polímeros termoestables producto de desechos electrónicos se pueden emplear para la modificación de las propiedades reológicas del asfalto, sin embargo es conveniente conocer la viabilidad económica de la modificación con este tipo de desechos para poder implementarla a nivel industrial.

Según precios de ECOPETROL S.A, a noviembre de 2013 el asfalto 80/100 es comercializado a \$1.040.943.00 pesos/ton, se debe tener en cuenta que el proceso de modificación del asfalto implica la trituración mecánica de las carcasas de los componentes electrónicos cuyo costo es de \$50.000 pesos/ton. Si se modifica el asfalto con 25 p/p % de TE se obtendría un ahorro de \$ 28.562,4 pesos /m<sup>3</sup> (Ver ANEXO F), además se tiene que considerar la reducción de costos de mantenimiento viales a lo largo del ciclo de vida del pavimento a consecuencia del mejoramiento de las características reológicas del asfalto, tales como, mayor rigidez a altas temperaturas, menor susceptibilidad térmica, mejor adhesión con los agregados, aumento de la viscosidad a bajas velocidades de rotación, entre otras.



## 10 CONCLUSIONES

- La adición del residuo de TE por vía húmeda provoca la obtención de un asfalto de alta consistencia y su endurecimiento a bajas temperaturas, a tal punto que con adiciones superiores a 20 p/p% se llega a una condición de rigidez que puede ser perjudicial en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica facilitando la fisuración térmica en climas particularmente fríos.
- El punto de ablandamiento del asfalto convencional se incrementa con la adición del polímero haciéndolo menos susceptible a la acción de la temperatura y más resistente al ahuellamiento.
- La modificación de un asfalto 80/100 con un polímero termoestable no afecta negativamente la adhesión y cohesión del asfalto con los agregados pétreos, esto evidenciado en los ensayos de Adherencia en bandeja y Stripping. Aunque son ensayos subjetivos, a juicio de las experimentadoras, la adición del TE mejora la unión de los componentes de la mezcla, debido a que en el ensayo de adherencia en bandeja se necesitó aplicar más fuerza para retirar las partículas del agregado en el caso del asfalto modificado que con el asfalto convencional.
- Se pueden implementar los polímeros termoestables provenientes del reciclaje del pos-consumo de aparatos electrónicos para la modificación de asfaltos en zonas de temperaturas superiores a 25°C, debido a que los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que se logra un mejor comportamiento en estado sólido a temperaturas mayores a 25°C.
- El asfalto perdió ductilidad con la adición de TE lo que conlleva optimizar las propiedades necesarias del asfalto a altas temperaturas, tales como, resistencia al ahuellamiento, rigidez a altas temperaturas, baja susceptibilidad térmica, deformación permanente, exudación, etc.

- Los resultados mostraron una reducción de la susceptibilidad a la deformación permanente, determinado a partir del incremento en la consistencia del asfalto, debido al aumento de rigidez que experimenta este al ser modificado con el residuo polímero termoestable.
- Del ensayo de viscosidad, se identificó que la incorporación del TE genera un aumento en la viscosidad del asfalto debido a la distribución de los tamaños de las partículas de polímero que hacen que este pierda su fluidez; con la adición del 40% p/p de TE el aumento fue significativo lo que se puede traducir como un problema en el bombeo del asfalto, se sugiere utilizar el asfalto con un porcentaje de adición del 25 p/p % debido a que a temperaturas iguales a 135°C su viscosidad es constante y muy similar a la de un asfalto convencional como se muestra en la Figura 33b.
- El porcentaje óptimo de sustitución es de 25 p/p % , ya que en comparación con el asfalto sin modificar y con las demás adiciones, se obtuvo un asfalto con mejor comportamiento reológico reflejado en el aumento de su consistencia en un 49% respecto al asfalto convencional, en su poca susceptibilidad térmica con un punto de ablandamiento de 60,25°C y una reducción en su ductilidad de 51% en relación con el 15 p/p% de sustitución; asimismo, con este porcentaje de modificación se puede utilizar una temperatura de 135°C para los procesos de compactación y mezclado, ya que la viscosidad del asfalto modificado con 25 p/p % no varía significativamente respecto al asfalto convencional y se mantiene constante con la variación en velocidad de rotación.
- La utilización del asfalto modificado con el 25 p/p % de TE producto de residuos electrónicos representaría un ahorro de \$ 28.562.4 pesos/m<sup>3</sup> de carpeta asfáltica.
- Es conveniente realizar ensayos mecánicos con un porcentaje de TE de 25 p/p %, para revisar el comportamiento que tiene ante cargas estáticas y dinámicas, a partir de ensayos como módulos dinámicos.

- Se recomienda realizar ensayos al asfalto modificado con polímeros de residuos electrónicos a altas temperaturas, ya que, resultaría un asfalto útil en regiones donde las temperaturas sean mayores a 25.

## REFERENCIAS

- Identificación de Plásticos. (2008-I). Facultad de Ingeniería Industrial. Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito.
- Desechos plásticos: un asunto cotidiano y global. (8 de Marzo de 2013). *El Espectador*.
- AASHTO. (2002). Standard Method of Test for Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixture. T 182-84.
- AASHTO. (2004). Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer. T 316-04.
- AASHTO. (2007). Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials. T 49-07.
- AASHTO. (2009). Standard Method of Test for Ductility of Asphalt Materials. T 51-09.
- AASHTO. (2009). Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). T 53-09.
- Airey, G. (2002). Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Constr. Build.*
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. International Thomson Editores.
- ASOPAC. (2004). Cartilla Pavimento Asfáltico. (1).
- Bastiaan, C., Zoeteman, J., Krikke, H., & Venselaar, J. (2010). Handling WEEE waste flows: on the effectiveness.
- Beckert, Y., Mendez, M., & Rodriguez, Y. (2001). Polymer Modified Asphalt. *Visión Tecnológica*, 9(1).
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros: Procesado y Propiedades*. Publicaciones Universidad de Alicante.
- Billmeyer, F. W. (1975). *Ciencia de los polímeros*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Callister, W. D. (1996). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2*. Barcelona: Editorial Reverté.
- CEMPRE, Compromiso Empresarial para el Reciclaje Colombia. (2013). PLÁSTICOS: Situación. Colombia.

- FUNDES. (2010). El sector reciclaje en Bogotá y su región: Oportunidades para los negocios inclusivos. *Series guías Sectoriales*.
- Goodman, S. (1998). *Handbook of Thermoset Plastics*. New Jersey: Noyes Publications.
- Green, L. (2000). Recycling-no more electronics dumping in Massachusetts.
- Hai-Yong, K., & Julie M, S. (2005). Electronic waste recycling: a review of U.S infrastructure and technology options.
- Hidalgo, L. (2012). *La basura eléctrica y la contaminación ambiental*. Universidad Tecnológica Equinoccial.
- INVIAS. (2007). Adherencia en bandeja. I.N.V.E 740.
- INVIAS. (2007). Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua (Stripping). I.N.V.E 737.
- INVIAS. (2007). Ductilidad de los materiales asfálticos. I.N.V.E 702.
- INVIAS. (2007). Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional. I.N.V.E 717.
- INVIAS. (2007). Penetración de los materiales asfálticos. I.N.V.E-706.
- INVIAS. (2007). Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola). I.N.V.E 712.
- Jiuyong, G., Jie, G., & Zhenming, X. (2009). Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review.
- Jiuyong, G., Jie, G., Shifeng, W., & Zhenming, X. (2008). Asphalt Modified with nonmetals separated from pulverized waste printed circuit boards.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura: Ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson Educación.
- Lozano Ruiz, S. L. (2005). *Asfalto Modificados con PVC recicaldo de cables*. Bogotá D.C: Facultad de Ingeniería. Departamento de ingeniería Química. Universidad de Los Andes.
- Madrid, M. F., & Salas, S. X. (2006). *Mejora de mezclas asfálticas de rodadura 0/10 cerradas con el uso de un elastómero (caucho) y con el uso de un plastomero (tiras de bolsas de leche) en un asfalto 80-100*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

- Maldonado, A. (2012). *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: Una aproximación al análisis narrativo de política pública de Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Martinez, J. (2010). Plan Empresa de Bioplas. *CEIPA*.
- Mayorga, I., & Morris, M. (2008). *Evaluación de la variación de las propiedades mecánicas de estabilidad, flujo, ahuellamiento y módulos dinámicos en mezclas asfálticas de rodadura 0/100 cerrada adicionando viruta de ganchos para ropa hechos de polipropileno*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Maza, G. (2011). La inminente crisis de la basura electrónica en Latinoamérica. *AeTecno*.
- Miravete, A. (2002). *Los Nuevos Materiales en la construcción*. Barcelona: Editorial Reverté,S.A.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras Toma I*. Bogotá, D.C: Ediciones y Publicaciones.
- Ott, D. (Marzo de 2008). Gestión de los Residuos Electrónicos en Colombia. *Tecnologías de la Información y Comunicación*.
- Panyakapo, P., & Panyakapo, M. (2008). Reuse of thermosetting plastics was lightweight concrete.
- Pascault, J.-P., Sautereau, J., Verdu, J., & Williams, R. J. (2005). *Thermosetting Polymers*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Peña, M. (2011). ¿Qué Hacer con los Desechos Electrónicos? *La Opinión*.
- Pickering, S. (2005). Recycling technologies for thermoset composite materials—current status. Nottingham: ScienceDirect.
- Ravi, V. (2011). Evaluation overall quality of recycling of e-waste from end-of-life computers.
- Redacción Negocios. (14 de Junio de 2012). Reciclando Basura Electrónica. *El Espectador*.
- Repsol. (2013). *Fisicoquímica del asfalto*. Recuperado el 13 de Julio de 2013, de [http://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion](http://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion)
- Reyes, F. A., & Figueroa, A. S. (2008). *Uso de plásticos en mezclas asfálticas*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

- Reyes, F., Madrid, M., & Salas, S. (2007). Mezclas Asfálticas modificadas con un elastómero (caucho) y un plastómero (tiras de bolsa de leche con asfalto 80/100).
- Ripley, K. (2008). Perspectives on Electronic Waste in Latin America and the Caribbean.
- Rodriguez, A. M., Martinez, M., Rodriguez, I., Hernandez, H., & Armenteros, T. (2011). *Desarrollo tecnológico, impacto sobre el medio ambiente y la salud*. Cuba: Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología.
- Rondón, H., Fernández, W., & Castro, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista de Ingeniería de construcción*.
- Rondón, H., Moreno, L., Rodriguez, D., & Lee, J. (2009). Experiencias sobre materiales alternativos para modificar asfalto. *Revista Ingeniería. Facultad de Ingeniería. Universidad Distrital Francisco José de Caldas*.
- Rondón, H., Rodriguez, D., & Moreno, L. (2007). Resistencia mecánica evaluada en el ensayo Marshall de mezclas densas calientes elaboradas con asfaltos modificados con desechos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (PED) y poliestireno (PS). *Revista Ingenierías. Universidad de Medellín*.
- Serrano, C. (Marzo de 2001). *Materiales Plásticos Termofijo: Si al reciclaje*. Recuperado el 07 de Junio de 2013, de Tecnología del Plástico:  
<http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/ateneo/dossier/plasticos/plasticocom/termofijos.htm>
- Seymour, R. B., & Carraher, C. E. (1995). *Introducción a la Química de los Polímeros*. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- Silva, H., Machado, A., Oliveira, J., & Costa, L. (2011). Waste Polymers recycling in high performance asphalt mixtures.
- Subgranon, T. (2013). *Introduction to polymer modified Asphalt Emulsion*. Recuperado el 13 de Julio de 2013, de  
<http://nersp.nerdc.ufl.edu/~tia/Polymer%20Modified%20Asphalt%20Emulsion.pdf>
- Tanskanen, P. (2013). Management and recycling of electronic waste.

- Vasudevan, R., Nigam, S., Velkennedy, R., Ramaling Chandra Sekar, A., & Sudarakanna, B. (2007). Utilization of waste polymers for flexible pavement and easy disposal of waste polymers. Proceedings of the International Conference on Sustainable Solid Waste Management.
- Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakanna, B., & Velkennedy, R. (2011). *A technique to dispose waste plastic in an ecofriendly way-application in construction of flexible pavements*. Tamil Nadu, India.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schenellmann, M., & Boni, H. (2005). Environ Impact Asses.
- Yang, W., Dong, Q., Liu, S., Liu, L., & Li, J. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes.
- Yokoyama, S., & Lji, M. (1995). Recycling of thermosetting plastics waste from electronic component production precesses.
- Zheng, Z., Shen, C., Cai, S., Ma, S., & Xing, Y. (2008). The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropulene composites.



**ANEXOS**

**ANEXO A**

**FICHA TÉCNICA ASFALTO 80-100. INCOASFALTO S.A**



## FICHA DE SEGURIDAD

### ASFALTO

#### I. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO.

Nombre:	Asfalto.
Otros Nombres:	Brea, Betún, Bitumen, Resina de Petróleo.
Referencias:	60-70; 80-100
Características:	Líquido muy viscoso o material semisólido de color negro.
Estabilidad:	Estable bajo condiciones de uso normal.
Incompatibilidades:	Se debe evitar el contacto con Flúor, agentes oxidantes fuertes. Evitar el contacto con calor, chispas, llamas, otras fuentes de ignición. Evitar Temperaturas extremas.

Número de Naciones Unidas: 1999

#### II. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE LOS INGREDIENTES.

El asfalto consta de tres componentes mayoritarios, el primero se describe como una mezcla de asfaltenos, que son moléculas complejas de alto peso molecular, insoluble en hidrocarburos parafínicos y soluble en compuestos aromáticos como el benceno. El segundo componente es una mezcla de resinas y el tercero es el aceite mineral. Los asfaltenos cargan con la responsabilidad de las características estructurales y de dureza de los asfaltos, las resinas le proporcionan sus propiedades aglutinantes y los aceites la consistencia adecuada para hacerlos trabajables. Cerca del 90 al 95% del peso del asfalto está compuesto por carbono e hidrógeno, o lo conocido como hidrocarburo.

#### III. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.

**Inhalación:** El efecto de la exposición a vapores de asfalto líquido o diluido depende del tipo de solvente en que se haya agregado. Puede irritar las membranas mucosas del tracto respiratorio.

**Ingestión:** Por ingestión puede causar disturbios gastrointestinales.

**Piel:** En algunas personas puede causar dermatitis, inflamación por contacto o graves quemaduras.

**Ojos:** Los humos de asfalto pueden causar irritación de las membranas serosas de la conjuntiva.

---



## FICHA DE SEGURIDAD

### IV. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS.

- Ingestión:** Se debe solicitar ayuda médica.
- Inhalación:** Se debe solicitar ayuda médica.
- Piel:** Si el asfalto se pone en contacto con la piel, utilizar inmediatamente agua fría. Solicitar ayuda médica.
- Ojos:** No se debe intentar eliminar las partículas de asfalto de los ojos. La víctima deberá atenderse inmediatamente por el médico.

### V. MEDIDAS PARA COMBATIR EL FUEGO.

- ✦ En caso de incendio evacuar o aislar El área de peligro. Restringir El acceso a personas innecesarias y sin La protección adecuada, incomunicar las áreas de peligro. En caso de pequeños derrames, cubrir con arena o algún otro material absorbente no combustible y posterior a esto lavar con agua.
- ✦ Usar equipo de protección personal.
- ✦ No introducir agua en los contenedores. De no poderse alejar del área del incendio, enfriarlos aplicando agua a las paredes.
- ✦ Extinguir con polvo químico seco, Dióxido de Carbono, espuma. Utilizar agua para enfriar los recipientes, estructuras y material expuesto al fuego.
- ✦ Como procedimiento especial para combatir los incendios, eliminar el combustible que alimenta el fuego, utilizar agua en spray para dispersar vapores, o para enfriar superficies expuestas al fuego y proteger al personal. No utilizar chorro sólido porque esparcirá el fuego.

### RIESGOS ESPECIALES POR FUEGO Y EXPLOSIÓN.

Los recipientes que los contienen pueden explotar cuando se calientan. Los vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire. Se producen humos tóxicos en caso de fuego. Tener cuidado al calentarlo a temperaturas cercanas a 232°C ya que los vapores emitidos pueden entrar en combustión en presencia de llama.

## FICHA DE SEGURIDAD

### VI. MEDIDAS PARA CASO DE DERRAME ACCIDENTAL.

- ⚡ Eliminar todas las fuentes de Ignición.
- ⚡ Utilizar material absorbente inerte como tierra o arena.
- ⚡ El producto puede recogerse con equipo de bombeo especial o por gravedad.
- ⚡ Si es sólido, barrer o recoger con pala, almacenarlo y disponerlo.
- ⚡ Aislar el área de derrame o fuga inmediatamente, por lo menos 50 a 100 metros a la redonda.
- ⚡ Alejar personal innecesario, ubicarse en dirección del viento.
- ⚡ Evitar chispas, llamas o fumar dentro del área de riesgo.
- ⚡ Ventilar el área.
- ⚡ Utilizar agua en atomizador para reducir los vapores y proteger al personal de limpieza.
- ⚡ En caso de pequeños derrames, cubrir con arena u otro material absorbente no combustible y lavar luego con agua.
- ⚡ En caso de derrames más grandes cumplir con lo mencionado en el Plan de Contingencias Control Derrame de Combustible y/o Hidrocarburos.
- ⚡ Todo derrame será comunicado de inmediato a los Organismos Gubernamentales respectivos, en cuya jurisdicción se produzca el incidente.
- ⚡ Luego de notificar el derrame, se procederá a evaluar la gravedad del incidente, considerando: Causa del incidente y posición geográfica del derrame, fecha y hora del derrame, magnitud, estimación inicial de la extensión y naturaleza de los daños, tipo de hidrocarburo, ubicación de las áreas críticas y acciones inmediatas de protección requeridas, acción de respuesta adoptada y estimación del equipo necesario, acciones correctivas que se adoptarán.

### VII. MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO.

El Asfalto normalmente se almacena en tanques metálicos con aislamiento térmico que dispongan de un sistema de calentamiento que permita mantenerlo en estado líquido de tal forma que pueda bombearse fácilmente. El sitio dispuesto para el almacenamiento debe contar con los elementos de seguridad necesarios y cumplir las disposiciones ambientales para el manejo de este tipo de hidrocarburo. No incrementar su temperatura cerca a 232.2 °C (450 °F), puesto que los vapores emitidos pueden hacer combustión en presencia de llama y son tóxicos al ser inhalados en altas cantidades.

Para la manipulación y almacenamiento de Asfaltos tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ⚡ Almacenamiento Exclusivo y Señalizado.
- ⚡ Piso sólido de fácil limpieza.
- ⚡ Estructura de contención sólida con muros en lo posible con resistencia a altas temperaturas.
- ⚡ Ventilación natural.
- ⚡ Extintores bien ubicados, señalizados, con la capacidad y cantidad necesaria.



## FICHA DE SEGURIDAD

- ⚡ Uso de elementos de protección y seguridad industrial.
- ⚡ No fumar.
- ⚡ Evitar la respiración prolongada de gases o vapores
- ⚡ No ingerir, es nocivo para la salud.
- ⚡ Almacene el asfalto preferiblemente en tanques horizontales, con sistema de calentamiento y recirculación.
- ⚡ No almacene el producto en tanques que contengan residuos incompatibles.

Para el almacenamiento se utiliza el color rojo, que identifica los inflamables.

Durante todas las operaciones de carga o descarga de asfalto, debe mantenerse en áreas frescas, secas, bien ventiladas, alejadas de llamas abiertas y de toda fuente de ignición. Debe prohibirse fumar. Nadie debe entrar a un tanque que ha contenido material asfáltico hasta que se haya ventilado y se hayan efectuado las pruebas adecuadas indicando que la atmósfera no es peligrosa. Cuando deba abrirse un tambor o tanque que ha estado expuesto al sol o haya sido calentado, usar un protector facial y guantes de caucho.

Aunque son productos estables, debe tenerse cuidado al calentarlos a temperaturas cercanas a 450 °F (232.2 °C) debido a que los vapores emitidos pueden hacer combustión en presencia de llama. Para su manejo deben aplicarse todas las medidas de seguridad establecidas para manipulación de materiales a altas temperaturas.

Almacenar en áreas frescas, secas bien ventiladas y alejadas de toda fuente de ignición.

### VIII. CONTROLES DE EXPOSICION Y PROTECCION PERSONAL.

**Respiratoria:** En casos de emergencia y no rutinarios se recomienda utilizar aparatos de respiración autocontenidos.

**Guantes Protectores:** Guantes de Neopreno.

**Protección Ocular:** Gafas de seguridad y protectores faciales.

**Otros:** Camisa de manga Larga con botones en los puños. Zapatos o botas de seguridad.



## FICHA DE SEGURIDAD

### IX. PROPIEDADES FISICAS.

El asfalto es un producto inflamable, corrosivo y tóxico, material aglomerante, resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo acción del calor o cargas permanentes. Componente de la mayor parte de los petróleos, se obtiene como residuo de la destilación al vacío del crudo pesado. Su color varía entre el color café oscuro y negro, de consistencia sólida, semisólida o líquida, dependiendo de la temperatura a la que se exponga.

<b>Aspecto a 25°C</b>	Sólido
<b>Color</b>	Negro
<b>Olor</b>	Característico

### PROPIEDADES QUIMICAS.

El asfalto es un mezcla de numerosos hidrocarburos parafínicos, aromáticos y compuestos heterocíclicos que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno, casi en su totalidad solubles en sulfuro de carbono. Los hidrocarburos constituyentes del asfalto forman una solución coloidal en la que un grupo de moléculas de los hidrocarburos más pesados (asfáltenos) están rodeados por moléculas de hidrocarburos más ligeros (resinas), sin que exista separación entre ellas, mediante transición, donde finalmente terminan los aceites ocupando los espacios restantes.

### X. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD.

El Asfalto es estable bajo condiciones de uso normal, se debe evitar el contacto con flúor y agentes oxidantes fuertes, a temperatura ambiente es considerado como un material no peligroso.

Se debe evitar el contacto con calor, chispas, llamas otras fuentes de ignición, evitar temperaturas extremas.



## FICHA DE SEGURIDAD

### XI. INFORMACION TOXICOLÓGICA.

No aplicable.

### XII. INFORMACION ECOLÓGICA

**Ecotoxicidad:** No se conocen efectos negativos para El medio ambiente.

**Movilidad:** No aplicable.

**Persistencia/Degradabilidad:** Baja biodegradabilidad.

**Potencial de Bioacumulación:** No aplicable.

**Otros efectos:** No aplicable

### XIII. CONSIDERACIONES PARA DESECHOS.

La vía más común que se adopte para la eliminación, cuando resulta impracticable la recuperación del hidrocarburo, sea descargándolo en sitios designados, de relleno de tierra. Los materiales destinados para directo enterramiento deberán tener un contenido máximo de hidrocarburo, de aproximada mente 20%.

En el caso de líneas de playa ligeramente contaminadas con desperdicios oleosos o con bolas de alquitrán, puede ser posible enterrar el material recolectado en la parte posterior de dicha playa, a condición de que no exista riesgo de daños a la vegetación, o que el hidrocarburo pudiera estar al descubierto. Una cobertura de por lo menos un metro deberá ser suficiente.

### XIV. INFORMACION PARA EL TRANSPORTE.

Este producto es clasificado como un material peligroso cuando se envía a temperaturas por encima de 212°F (100°C) y es considerado no peligroso cuando se envía a temperatura ambiente.

Se transporta en vagones o camionetas cisternas y se suministra en tambores o cubos. El personal que maneja el producto debe utilizar la protección de seguridad necesaria.

### XV. REGULACION DE USO.

Su uso principal de los asfaltos es la construcción y conservación de vías. Pueden aplicarse de diferentes formas tales como emulsiones asfálticas, asfaltos líquidos o directamente como cemento asfáltico.





## FICHA DE SEGURIDAD

### USOS Y APLICACIONES.

- Como ligante en Concretos Asfálticos, utilizados en estructuras de pavimento flexible.
- Emulsiones Asfálticas.

### PRESENTACIÓN.

- A granel.
- En Tambor por 200 Kg (pedido especial)

### XVI. OTRA INFORMACION.

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN			
			60-70		80-100	
			Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración (25 °C, 100g, 5 s)	0,1 mm	E - 706	60	70	80	100
Punto de ablandamiento	°C	E - 712	45	55	42	53
Índice de Penetración	-	E - 724	-1	+1	-1	+1
Viscosidad absoluta (60 °C)	P	E - 716 E - 717	1500	—	1000	—
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	E - 702	100	—	100	—
Solubilidad en tricloroetileno	%	E - 713	99	—	99	—
Contenido de agua	%	E - 704	—	0,2	—	0,2
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E - 709	230	—	230	—
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos)	%	E - 720	—	1,0	—	1,0
Penetración del residuo luego de la pérdida de masa por calentamiento (E - 720), en % de la penetración original	%	E - 706	52	—	48	—
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento ( E - 720)	°C	E - 712	—	5	—	5


Durante todas las operaciones de carga o descarga de asfalto, debe mantenerse el área libre de llamas abiertas y otras fuentes de ignición. Cuando deba abrirse un tambor que ha sido expuesto al sol o se haya calentado, usar protector facial y guantes de caucho.

	<b>GESTIÓN DE PRODUCCION DE MATERIALES ASFÁLTICOS</b>	CÓDIGO: GB-F-024
	<b>CERTIFICADO DE CALIDAD</b>	VERSIÓN: 2
		FECHA: 27-07-2013

CLIENTE:	UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA	TIPO DE ASFALTO:	CEMENTO ASFALTICO 80/100
FECHA:	16-07-13	No. LOTE:	NA
		FECHA DE FABRICACIÓN:	12-07-13

PESO CERTIFICADO (Kg)	4 GALONES
-----------------------	-----------

ENSAYO / ANÁLISIS	UNIDAD	NORMA DE ENSAYO INV	ESPECIFICACIÓN		RESULTADO	FRECUENCIA
			Min.	Máx.		
Penetración (25 °C, 100g, 5s)	0.1 mm	E-706	80	100	94	CADA LOTE
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712	42	53	46,0	CADA LOTE
Índice de Penetración	-	E - 724	REPORTAR		-0,67	CADA LOTE
Viscosidad absoluta (60 °C)	P	E - 716 E - 717	1000	-	1510	CADA LOTE
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	>150	QUINCENAL
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99,8	SEMESTRAL
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	°C	E-709	230	-	290,0	QUINCENAL
<b>PERDIDA DE MASA EN EL HORNO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO (INV E-720) Y ENSAYOS SOBRE EL RESIDUO</b>						
Pérdida de masa	%	E-720	-	1,0	0,6478	QUINCENAL
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento. (%) de la penetración original	%	E-706	48,0	-	58,0	QUINCENAL
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento ( E - 720)	cm	E-712	-	5,0	4,8	QUINCENAL

ELABORÓ
 <b>IncoAsfaltos</b> Industria Colombiana de Asfaltos S.A. SAN JOSE PARA MARTINEZ NIT. 900.097.459-8 DIRECTOR DE I+D+D
<i>LEONARDO CROCEL</i>

<b>RECIBIÓ</b>
NOMBRE: NA
FIRMA:

SERIAL: PM11536

**ANEXO B****RESULTADOS DE LABORATORIO DE PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES  
ASFÁLTICOS**

**Penetración del Cemento Asfaltico AC 80 – 100**

<b>PENETRACIÓN</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>		<b>MUESTRA 3</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 3</b>	<b>Molde 4</b>	<b>Molde 5</b>	<b>Molde 6</b>
<b>Penetración 1</b>	88,1	94,4	92,4	88,5	90,4	85,6
<b>Penetración 2</b>	90,8	87,6	84,4	82,4	83,5	85,2
<b>Penetración 3</b>	85,7	86,3	85,8	86,4	80,3	80,2
<b>Promedio</b>	88,200	89,433	87,533	85,767	84,733	83,667
<b>Penetración Promedio</b>	88,82		86,65		84,20	
<b>Promedio Total</b>	86,56					
<b>Desviación Estándar</b>	3,84					
<b>Error</b>	0,91					

**Penetración del Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 5%**

<b>PENETRACIÓN</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>		<b>MUESTRA 3</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 3</b>	<b>Molde 4</b>	<b>Molde 5</b>	<b>Molde 6</b>
<b>Penetración 1</b>	69,4	66,7	66,2	65,3	66,3	65,7
<b>Penetración 2</b>	68,4	64,5	68,8	71,7	69,3	68,5
<b>Penetración 3</b>	65,6	63,6	61,5	68,3	64,1	66,2
<b>Promedio</b>	67,800	64,933	65,500	68,433	66,567	66,800
<b>Penetración Promedio</b>	66,367		66,967		66,683	
<b>Promedio Total</b>	66,67					
<b>Desviación Estándar</b>	2,49					
<b>Error</b>	0,59					

**Penetración del Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 10%**

<b>PENETRACIÓN</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>		<b>MUESTRA 3</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 3</b>	<b>Molde 4</b>	<b>Molde 5</b>	<b>Molde 6</b>
<b>Penetración 1</b>	63,8	65,6	68,5	66,7	66,7	67,5
<b>Penetración 2</b>	64	67,4	66,1	65,5	66,3	68
<b>Penetración 3</b>	64,8	66,8	65,6	66,6	64,1	68
<b>Promedio</b>	64,2	66,6	66,73	66,27	65,7	67,83
<b>Penetración Promedio</b>	65,4		66,5		66,77	
<b>Promedio Total</b>	66,22					
<b>Desviación Estándar</b>	1,42					
<b>Error</b>	0,33					

**Penetración del Cemento Asfáltico AC 80 – 100. Modificado p/p 15%**

PENETRACIÓN	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	Molde 6
Penetración 1	54	61,7	53,5	53,9	52,9	50,6
Penetración 2	53,3	54,6	58	54,9	56,5	56,4
Penetración 3	59,6	62	56,2	51,7	53,7	53,6
Promedio	55,63	59,43	55,90	53,50	54,37	53,53
Penetración Promedio	57,53		54,70		53,95	
Promedio Total	55,39					
Desviación Estándar	3,19					
Error	0,75					

**Penetración del Cemento Asfáltico AC 80 – 100. Modificado p/p 20%**

PENETRACIÓN	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	Molde 6
Penetración 1	52,7	57,1	56,3	51,7	51,1	54,7
Penetración 2	55,8	49	53,2	52,6	54,6	51,9
Penetración 3	54,8	53,5	53,3	53,7	51,2	53,8
Promedio	54,43	53,20	54,27	52,67	52,30	53,47
Penetración Promedio	53,82		53,47		52,88	
Promedio Total	53,39					
Desviación Estándar	2,01					
Error	0,47					

**Penetración del Cemento Asfáltico AC 80 – 100. Modificado p/p 25%**

PENETRACIÓN	MUESTRA 1		MUESTRA 2		MUESTRA 3	
	Molde 1	Molde 2	Molde 3	Molde 4	Molde 5	Molde 6
Penetración 1	45,5	47,6	42,6	43,8	43,4	46,5
Penetración 2	42,2	45,8	41,8	42,4	45,6	45,4
Penetración 3	46,8	44,7	41,6	41,4	47,8	47,3
Promedio	44,83	46,03	42,00	42,53	45,60	46,40
Penetración Promedio	45,43		42,27		46,00	
Promedio Total	44,57					
Desviación Estándar	2,20					
Error	0,52					

**Penetración del Cemento Asfáltico AC 80 – 100. Modificado p/p 40%**

<b>PENETRACIÓN</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>		<b>MUESTRA 3</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 3</b>	<b>Molde 4</b>	<b>Molde 5</b>	<b>Molde 6</b>
<b>Penetración 1</b>	31,8	39,1	33,4	30,4	31,1	33,7
<b>Penetración 2</b>	34,9	35,6	31,6	39,6	32,2	32,2
<b>Penetración 3</b>	36,2	30,3	32,6	30,3	38,5	30,2
<b>Promedio</b>	34,30	35,00	32,53	33,43	33,93	32,03
<b>Penetración Promedio</b>	34,65		32,98		32,98	
<b>Promedio Total</b>	33,54					
<b>Desviación Estándar</b>	3,11					
<b>Error</b>	0,73					

**ANEXO C**

**RESULTADOS DE LABORATORIO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE  
MATERIALES BITUMINOSOS DEL CEMENTO ASFÁLTICO**

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico  
100.**

AC 80 –

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	45,5	45,1	45,8	45,8
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	45,55			
<b>Desviación Estándar</b>	0,33			
<b>Error</b>	0,17			

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico  
100. Modificado p/p 5%**

AC 80 –

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	48,3	48,3	48,3	48,7
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	48,4			
<b>Desviación Estándar</b>	0,20			
<b>Error</b>	0,1			

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico  
100. Modificado p/p 10%**

AC 80 –

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	50,7	51,7	50,3	50,8
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	50,88			
<b>Desviación Estándar</b>	0,59			
<b>Error</b>	0,3			



**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico**

**AC 80 –**

**100. Modificado p/p 15%**

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	54,3	55,3	54,7	55
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	54,85			
<b>Desviación Estándar</b>	0,43			
<b>Error</b>	0,21			

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico**

**AC 80 –**

**100. Modificado p/p 20%**

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	54,8	55	55,4	55,7
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	55,23			
<b>Desviación Estándar</b>	0,40			
<b>Error</b>	0,2			

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfaltico**

**AC 80 –**

**100. Modificado p/p 25%**

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	59,3	60	58,9	62,8
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	60,25			
<b>Desviación Estándar</b>	1,76			
<b>Error</b>	0,88			

**Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos del Cemento Asfáltico****AC 80 –****100. Modificado p/p 40%**

<b>PUNTO DE ABLANDAMIENTO</b>	<b>MUESTRA 1</b>		<b>MUESTRA 2</b>	
	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>	<b>Molde 1</b>	<b>Molde 2</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	65,7	67,3	76,5	77,4
<b>Pto de Ablandamiento Promedio</b>	71,25			
<b>Desviación Estándar</b>	6,08			
<b>Error</b>	3,04			

**ANEXO D**

**RESULTADOS DE LABORATORIO DE DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES  
BITUMINOSOS**



PINZ - LAB  
 LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES  
 INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

**TOMA DE DATOS MATERIALES ASFÁLTICOS**

INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-AF1-02 / IE-AF1-03 / EI-AF1-05 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E 702-07 INV E 709-07 INV E 712-07

CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_

Fecha de Ensayo: 9 Agosto de 2013

Referencia: Daisy Universidad Piloto

Descripción: Ensayo Ductilidad (modificado) 15% CA: 80-100

**I. DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS (INV E -702-07)**

EQUIPO UTILIZADO (No de inventario)

Ductilómetro X Termómetro X Baño María \_\_\_\_\_

PRUEBA No.	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD (mm/min)	Probeta No. 1 (cm)	Probeta No. 2 (cm)	Probeta No. 3 (cm)
1	25	5	38		
2	25	5	40		
3					

OBSERVACIONES: Mezcla asfáltica bastante brumosa, se mezcló y mantuvo en horno 1 hora a 145°C - 145° - 150°C

**II. PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND (INV E-709-07)**

EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)

Equipo Copa Abierta de Cleveland \_\_\_\_\_ Termómetro \_\_\_\_\_

PRUEBA No.		1	2	3
Temperatura del punto de ignición	A [°F]			
Temperatura del punto de llama	A [°F]			

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

**III. PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ANILLO Y BOLA (INV E-712-07)**

EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)

Aparato de Anillo y Bola \_\_\_\_\_ Termómetro \_\_\_\_\_ Baño María \_\_\_\_\_

Placa de Calentamiento \_\_\_\_\_

ANILLO No.	Líquido utilizado	Punto de ablandamiento (°C)
1		
2		

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

[Signature]  
 EJECUTO: LABORATORISTA

[Signature]  
 REVISO: TECNOLOGO  
[Signature]



PINZ - LAB  
LABORATORIO DE SUELOS, PAVIMENTOS Y MATERIALES  
INTERV. - INSPECT. - LAB/TA - ING. CIVL.

### TOMA DE DATOS MATERIALES ASFÁLTICOS

INSTRUCTIVO DE ENSAYO: IE-AF1-02 / IE-AF1-03 / EI-AF1-05 PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: INV E 702-07 INV E 709-07 INV E 712-07

CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_

Fecha de Ensayo: 9 Agosto de 2013

Referencia: Daissy Universidad Piloto

Descripción: Ensayo Ductilidad (modificado) 25% CA. 80-100

#### I. DUCTILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS (INV E -702-07)

EQUIPO UTILIZADO (No de inventario)

Ductilómetro X Termómetro X Baño María \_\_\_\_\_

PRUEBA No.	TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD (mm/min)	Probeta No. 1 (cm)	Probeta No. 2 (cm)	Probeta No. 3 (cm)
1	25	5	18		
2	25	5	20		
3					

OBSERVACIONES: Mezcla brumosa, alto porcentaje modificado se mezcló a 145° - 150°C 1 hora en horno

#### II. PUNTO DE IGNICIÓN Y DE LLAMA MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND (INV E-709-07)

EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)

Equipo Copa Abierta de Cleveland \_\_\_\_\_ Termómetro \_\_\_\_\_

PRUEBA No.	1	2	3
Temperatura del punto de ignición A [°F]			
Temperatura del punto de llama A [°F]			

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

#### III. PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE ANILLO Y BOLA (INV E-712-07)

EQUIPO UTILIZADO (No. De inventario)

Aparato de Anillo y Bola \_\_\_\_\_ Termómetro \_\_\_\_\_ Baño María \_\_\_\_\_

Placa de Calentamiento \_\_\_\_\_

ANILLO No.	Líquido utilizado	Punto de ablandamiento (°C)
1		
2		

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_

[Signature]  
EJECUTO: LABORATORISTA

[Signature]  
REVISOR: TECNÓLOGO

**ANEXO E**

**RESULTADOS DE LABORATORIO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL CEMENTO  
ASFALTICO AC 80 – 100**

## TABLAS PROGRAMA WINGATHER

### Resultados de ensayo de Viscosidad en función de la Temperatura:

#### Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-04 Test Time: 06:05:11 p.m.	Model: RV Spindle: SC4-27
Sample Name:	

# Datos	Viscosity	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Temperature	Time Interval
	(mPas)	(RPM)	(%)	(N/m <sup>2</sup> )	(1/sec)	(°C)	(mm:ss.t)
1	2800	20	22,4	19,04	6,8	100	24:57,3
2	2800	20	22,4	19,04	6,8	100	00:59,9
3	2800	20	22,4	19,04	6,8	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>2800</b>						

4	712,5	20	10	4,85	6,8	120	30:15,9
5	712,5	20	10	4,85	6,8	120	00:59,9
6	712,5	20	10	4,85	6,8	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>712,5</b>						

7	312,5	20	10,5	2,13	6,8	135	25:51,0
8	300	20	10,3	2,04	6,8	135	00:59,9
9	312,5	20	10,5	2,13	6,8	135	01:00,0
<b>Promedio</b>	<b>308,3</b>						

10	162,5	20	10,3	1,1	6,8	150	25:11,8
11	162,5	20	10,3	1,1	6,8	150	00:59,9
12	162,5	20	10,3	1,1	6,8	150	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>162,5</b>						

**Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 5%**

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-10 Test Time: 05:26:50 p.m. Model: RV	Spindle: SC4-27
Sample Name:	

# Datos	Viscosity	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Temperature	Time Interval
	(mPas)	(RPM)	(%)	(N/m <sup>2</sup> )	(1/sec)	(°C)	(mm:ss.t)
1	4150	20	33,2	28,22	6,8	100	24:38,8
2	4150	20	33,2	28,22	6,8	100	00:59,9
3	4150	20	33,2	28,22	6,8	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>4150</b>						

4	987,5	20	23,1	6,72	6,8	120	26:21,7
5	987,5	20	23,1	6,72	6,8	120	00:59,9
6	987,5	20	23,1	6,72	6,8	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>987,5</b>						

7	400	20	10,1	2,72	6,8	135	26:30,1
8	400	20	10,1	2,72	6,8	135	00:59,9
9	400	20	10,1	2,72	6,8	135	01:00,0
<b>Promedio</b>	<b>400,0</b>						

10	187,5	20	10,5	1,28	6,8	150	25:03,8
11	187,5	20	10,5	1,28	6,8	150	00:59,9
12	187,5	20	10,5	1,28	6,8	150	01:00,0
<b>Promedio</b>	<b>187,5</b>						



### Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 10%

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-07 Test Time: 01:04:38 p.m. Model: RV	Spindle: SC4-27
Sample Name:	

# Datos	Viscosity (mPas)	Speed (RPM)	Torque (%)	Shear Stress (N/m <sup>2</sup> )	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	5037,5	20	40,3	34,26	6,8	100	25:28,9
2	5062,5	20	40,5	34,42	6,8	100	00:59,9
3	5037,5	20	40,3	34,26	6,8	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>5045,8</b>						

4	1212,5	20	10,1	8,25	6,8	120	26:50,3
5	1225	20	10,5	8,33	6,8	120	00:59,9
6	1237,5	20	11,1	8,42	6,8	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>1225</b>						

7	525	20	10	3,57	6,8	135	22:47,8
8	525	20	10	3,57	6,8	135	00:59,9
9	525	20	10	3,57	6,8	135	01:00,0
<b>Promedio</b>	<b>525,0</b>						

10	225	20	10,8	1,53	6,8	150	25:53,5
11	225	20	10,8	1,53	6,8	150	00:59,9
12	225	20	10,8	1,53	6,8	150	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>225</b>						

### Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 15%

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-05 Test Time: 05:35:19 p.n Model: RV	Spindle: SC4-27
Sample Name:	

# Datos	Viscosity (mPas)	Speed (RPM)	Torque (%)	Shear Stress (N/m <sup>2</sup> )	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	6175	20	49,4	41,99	6,8	100	25:12,5
2	6150	20	49,2	41,82	6,8	100	00:59,9
3	5662,5	20	45,3	38,51	6,8	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>5995,8</b>						

4	1625	20	13	11,05	6,8	120	26:23,5
5	1625	20	13	11,05	6,8	120	00:59,9
6	1537,5	20	12,3	10,46	6,8	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>1595,8</b>						

7	662,5	20	11,4	3,15	6,8	135	01:34,2
8	662,5	20	11,4	1,19	6,8	135	00:59,9
9	662,5	20	11,4	1,19	6,8	135	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>662,5</b>						

10	328,2	20	9,9	0	6,8	150	26:20,3
11	328,8	20	10	0	6,8	150	01:00,0
12	328,8	20	10	0	6,8	150	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>328,6</b>						

### Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 20%

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-10 Test Time: 08:16:48 p.n Model: RV	Spindle: SC4-27
Sample Name:	

# Datos	Viscosity (mPas)	Speed (RPM)	Torque (%)	Shear Stress (N/m <sup>2</sup> )	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	10600	20	84,8	72,08	6,8	100	21:13,3
2	10512,5	20	84,1	71,48	6,8	100	00:59,9
3	10337,5	20	82,7	70,3	6,8	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>10483,3</b>						

4	2625	20	21	17,85	6,8	120	28:31,6
5	2537,5	20	20,3	17,26	6,8	120	00:59,9
6	2537,5	20	20,3	17,26	6,8	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>2566,7</b>						

7	974,3	20	20,2	5,8	6,8	135	35:22:00
8	974,3	20	20,2	5,8	6,8	135	00:59,9
9	974,3	20	20,2	5,8	6,8	135	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>974,3</b>						

10	482,5	20	19,3	8,97	18,6	150	11:18,9
11	400	20	16	7,44	18,6	150	00:59,9
12	415	20	16,6	7,72	18,6	150	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>432,5</b>						

### Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 25%

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.		
Test Date: 2013-09-11	Test Time: 12:27:28 p.m	Model: RV	Spindle: SC4-27
Sample Name:			

# Datos	Viscosity (mPas)	Speed (RPM)	Torque (%)	Shear Stress (N/m <sup>2</sup> )	Shear Rate (1/sec)	Temperature (°C)	Time Interval (mm:ss.t)
1	12300	20	98,4	85	6,8	100	24:47,5
2	12500	20	100	85	6,8	100	00:59,9
3	12300	20	98,4	83,64	6,8	100	01:00,0

**Promedio 12366,7**

4	3025	20	24,2	20,57	6,8	120	26:04,9
5	2975	20	23,8	20,23	6,8	120	00:59,9
6	3025	20	24,2	20,57	6,8	120	00:59,9

**Promedio 3008,3**

7	1287,5	20	10,3	8,76	6,8	135	22:44,4
8	1325	20	10,6	9,01	6,8	135	00:59,9
9	1287,5	20	10,3	8,76	6,8	135	00:59,9

**Promedio 1300,0**

10	575	20	9,9	3,91	6,8	150	25:20,1
11	575	20	9,9	3,91	6,8	150	00:59,9
12	575	20	9,9	3,91	6,8	150	00:59,9

**Promedio 575**

**Viscosidad Cemento Asfaltico AC 80 – 100. Modificado p/p 40%**

Wingather V3.0	Brookfield Engineering Labs, Inc.
Test Date: 2013-09-11 Test Time: 04:06:14 p.n Model: RV	Spindle: SC4-29
Sample Name:	

# Datos	Viscosity	Speed	Torque	Shear Stress	Shear Rate	Temperature	Time Interval
	(mPas)	(RPM)	(%)	(N/m <sup>2</sup> )	(1/sec)	(°C)	(mm:ss.t)
1	21600	20	43,2	108	5	100	23:43,0
2	22400	20	44,8	112	5	100	00:59,9
3	21650	20	43,3	108,25	5	100	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>21883,3</b>						

4	6050	20	12,1	30,25	5	120	27:28,4
5	6100	20	12,2	30,5	5	120	00:59,9
6	5900	20	11,8	29,5	5	120	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>6016,7</b>						

7	2650	20	10,4	13,25	5	135	24:12,2
8	2750	20	11,2	13,75	5	135	00:59,9
9	2700	20	11	13,5	5	135	00:59,9
<b>Promedio</b>	<b>2700,0</b>						

10	1250	20	10	6,25	5	150	21:37,5
11	1150	20	10,3	5,75	5	150	00:59,9
12	1250	20	10,5	6,25	5	150	01:00,0
<b>Promedio</b>	<b>1216,6667</b>						

**Resultados de ensayo de Viscosidad en función de la Velocidad de Rotación:**

**Porcentaje de Modificación de 15 p/p %:**

<b>Viscosity</b>	<b>Speed</b>	<b>Temperature</b>
<b>(mPas)</b>	<b>(RPM)</b>	<b>(°C)</b>
2283,3	10	120
2016,7	20	120
1790,0	50	120
950,0	10	135
812,5	20	135
706,7	50	135
358,3	10	150
316,7	20	150
280,0	50	150

**Porcentaje de Modificación de 25 p/p %**

<b>Viscosity</b>	<b>Speed</b>	<b>Temperature</b>
<b>(mPas)</b>	<b>(RPM)</b>	<b>(°C)</b>
1950,00	10	120
2129,17	20	120
2170,00	50	120
816,67	10	135
854,17	20	135
841,67	50	135
766,67	10	150
504,17	20	150
428,33	50	150

**ANEXO F**  
**REVISIÓN PRELIMINAR DE COSTOS**

## Revisión de Costos Preliminares

<b>Densidad BULK compactada mezclas asfálticas</b>	2,3 ton/m3
<b>Cantidad de Asfalto para 1 m3 de vía*:</b>	0,13 ton

Descripción	Cantidad Asfalto [ton]	Cantidad Polímero [ton]	Precio/ton**	Total
<b>Asfalto</b>	0,13	-	1.040.943,00	131.679,29
<b>Asfalto + TE</b>	0,10	0,03	50.000,00	103.116,94
<b>AHORRO</b>				<b>28.562,35</b>

\*Suponiendo un porcentaje óptimo de asfalto de 5,5%

\*\* Precios Noviembre 2013