

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO DEL CEMENTO  
ASFÁLTICO 80-100 MODIFICADO CON LIGNINA EN EL HORNO DE  
PELÍCULA DELGADA**

**SINDY PATRICIA RAMIREZ TEATIN  
CRISTHIAN CAMILO FLOREZ AZUERO**

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

**2015**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO DEL CEMENTO  
ASFÁLTICO 80-100 MODIFICADO CON LIGNINA EN EL HORNO DE  
PELÍCULA DELGADA**

**Presentado por:**

**SINDY PATRICIA RAMIREZ TEATIN  
CRISTHIAN CAMILO FLOREZ AZUERO**

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

**Ing. DANIELLA RODRÍGUEZ URREGO**

**Directora de Proyecto de Grado**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTA, D.C.**

**2015**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero a Dios por toda la fortaleza que nos ha brindado hasta ahora, a nuestros padres por el apoyo incondicional, por toda la confianza depositada en nosotros para sacar esta carrera adelante y por ser el mayor ejemplo a seguir, a nuestra familia por ser parte fundamental en nuestras vidas.

A nuestra profesora y directora de tesis Daniella Rodríguez por su apoyo, entrega y dedicación en el desarrollo de este proyecto. A Daniela Toro compañera, amiga y colega, a nuestros compañeros y docentes que directa o indirectamente hicieron parte de este proceso. Muchas gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	15
2.	PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	17
3.	OBJETIVOS.....	18
3.1.	<b>Objetivo general</b> .....	18
3.2.	<b>Objetivos específicos</b> .....	18
4.	MARCOS GENERALES .....	19
4.1.	<b>MARCO CONCEPTUAL</b> .....	19
4.1.1.	<b>Envejecimiento</b> .....	19
4.1.2.	<b>Asfalto Modificado</b> .....	24
4.1.3.	<b>Modificación con Lignina</b> .....	28
4.2.	<b>MARCO REFERENCIAL</b> .....	31
4.2.1.	<b>Lignina</b> .....	31
4.2.1.1.	<b>Generalidades</b> .....	31
4.2.1.2.	<i>Estructura</i> .....	34
4.2.1.3.	<i>Tipos de lignina</i> .....	34
4.2.1.3.1.	<i>Lignina Kraft (Alcalina)</i> .....	34
4.2.1.3.2.	<i>Lignina Lignosulfonato</i> .....	35
4.2.1.3.3.	<i>Lignina Organosolv</i> .....	35
4.2.1.4.	<i>Utilización</i> .....	35
4.2.1.4.1.	<i>Productos industriales derivados de la lignina:</i> .....	36
4.2.1.4.2.	<i>Aplicaciones a escala industrial de las ligninas como productos poliméricos:..</i> 36	
4.2.2.	<b>Asfalto</b> .....	37
4.2.2.1.	<i>Composición fisicoquímica del asfalto</i> .....	37
4.2.2.2.	<i>Estructura química de los asfaltos</i> .....	38
4.2.2.2.1.	<i>Asfáltenos</i> .....	39
4.2.2.2.2.	<i>Máltenos</i> .....	40
4.2.2.2.3.	<i>Resinas</i> .....	40
4.2.2.2.4.	<i>Aromáticos</i> .....	41

4.2.2.2.5.	<i>saturados</i>	42
4.2.2.3.	<i>Funciones del asfalto</i>	43
4.2.2.4.	<i>Clasificación del asfalto</i>	44
4.2.2.4.1.	<i>Asfalto para pavimentación</i>	44
5.	MATERIALES Y MÉTODOS	48
5.1.	<i>Lignina (álcali)</i>	48
5.2.	Asfalto	49
5.3.	<i>Modificación de asfalto</i>	50
6.	ENSAYOS	53
6.1.	<i>Penetración de los materiales asfálticos</i>	54
6.2.	<i>Punto de ablandamiento de ensayo (anillo y bola)</i>	55
6.3.	<i>Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO)</i>	56
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	63
7.1.	<i>Ensayo de penetración antes del ensayo de RTFO</i>	64
7.2.	<i>Ensayo de punto de ablandamiento (Anillo y bola)</i>	65
7.3.	<i>Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO)</i>	67
8.	CONCLUSIONES	72
9.	ANEXOS	74

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Modelo estructural lignina de madera aserrada

Figura 2. Composición química del asfalto.

Figura 3. Asfáltenos

Figura 4. Resinas

Figura 5. Compuestos Aromáticos.

Figura 6. Compuestos saturados

Figura 7. Productos de refinado del petróleo.

Figura 8. Muestras de lignina en el laboratorio de ingeniería Civil

Figura 9. Metodología para la producción de mezclas

Figura 10. Ensayo de penetración del asfalto.

Figura 11. Ensayo punto de ablandamiento (Anillo y bola)

Figura 12. Modificación de Asfalto 80/100 con Polímero (Lignina).

Figura 13. Muestras (Asfalto + Polímero) listas para realizar ensayo de RTFO.

Figura 14. Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO).

Figura 15. Muestras después de ensayo al horno de lámina asfáltica delgada.

Figura 16. Muestras de envejecimiento para la realización de ensayos de penetración y punto de ablandamiento (anillo y bola).

Figura 17. Ensayo de penetración después de envejecimiento (RTFO).

Figura 18. Ensayo de punto de ablandamiento (anillo y bola).

Figura 19. Resultados de ensayo de penetración.

Figura 20. Resultados de ensayo de punto de ablandamiento

Figura 21. Resultados de Pérdida de masa ensayo de RTFO.

Figura 22. Resultados de ensayo de penetración antes y después de RTFO.

Figura 23. Resultados de ensayo de punto de ablandamiento antes y después de RTFO.

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Agentes Modificadores.

Tabla 2. Porcentajes utilizados en la modificación del asfalto CAP20.

Tabla 3. Porcentaje de lignina en diferentes tipos de plantas.

Tabla 4. Composición de los asfaltos según su procedencia de petróleo.

Tabla 5. Rangos de penetración estándar.

Tabla 6. Propiedades lignina – álcali.

Tabla 7. Caracterización del Asfalto en su estado original con los ensayos normalizados.

Tabla 8. Porcentajes del agente modificador.

## **GLOSARIO**

- **ASFALTO:** Sustancia de color negro que constituye la fracción más pesada del petróleo crudo. Se encuentra a veces en grandes depósitos naturales, como en el lago Asfaltitos o mar Muerto, lo que se llamó betún de Judea. Se utiliza mezclado con arena o gravilla para pavimentar caminos y como revestimiento impermeable de muros y tejados (Real Academia Española, 2015).
- **AHUELLAMIENTO:** El ahuellamiento es una depresión de la zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Con frecuencia se encuentra acompañado de una elevación de las áreas adyacentes a la zona deprimida y de fisuración. Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidropilano por almacenamiento de agua (Grupo técnico-convenio 587 de 2003, 2006).
- **ANTIOXIDANTE:** Un antioxidante es una molécula capaz de retardar o prevenir la oxidación de otras moléculas (Real Academia Española, 2015).
- **CEMENTO ASFALTICO:** Asfalto refinado o una combinación de éste con un aceite fluidificante, cuya viscosidad es apropiada para los trabajos de pavimentación.
- **CARPETA ASFÁLTICA:** La carpeta asfáltica es la capa superior de un pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento para el tránsito convencional como vehículos, motocicletas, la carpeta asfáltica se elabora con materiales pétreos y productos asfálticos.
- **DESGASTE DE LA CARPETA DE RODADURA:** Corresponde al deterioro del pavimento ocasionado principalmente por acción del tránsito, agentes abrasivos o erosivos. Se presenta como pérdida de ligante y mortero. Suele encontrarse en las

zonas por donde transitan los vehículos. Este daño provoca aceleración del deterioro del pavimento por acción del medio ambiente y del tránsito (Grupo técnico-convenio 587 de 2003, 2006).

- **EMULSIÓN ASFÁLTICA:** Dispersión de glóbulos de cemento asfáltico dentro de agua en presencia de un agente emulsificante. Puede ser aniónica o catiónica, dependiendo de la carga eléctrica de los glóbulos.
- **LIGANTE BITUMINOSO:** Material que contiene betún (bitumen), el cual es un hidrocarburo soluble en bisulfuro de carbono (CS<sub>2</sub>). El asfalto y el alquitrán son materiales bituminosos.
- **MEZCLAS ASFÁLTICAS:** Las mezclas asfálticas se utilizan comúnmente en la construcciones estables, ya sea en pavimentos como en las carpetas de rodadura o en capas inferiores, su función consiste en proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de carreteras, facilitando la circulación de los vehículos y transmitiendo las cargas del tráfico a la explanada para que sean soportadas por ésta.
- **PIEL DE COCODRILO:** Corresponde a una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente localizadas en zonas sujetas a repeticiones de carga. La fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas. Las fisuras se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Ante la repetición de cargas de tránsito, las fisuras se propagan formando piezas angulares que desarrollan un modelo parecido a la piel de un cocodrilo. Tales piezas tienen por lo general un diámetro promedio menor que 30 cm (Grupo técnico-convenio 587 de 2003, 2006)

- **PAVIMENTOS:** es un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados.
- **POLÍMERO:** Es un Material formado por macromoléculas formadas por un gran número de unidades estructurales que se repiten consecutivamente, 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).
- **VAINILLINA:** compuesto orgánico con la fórmula molecular  $C_8H_8O_3$ . Sus grupos funcionales incluyen el aldehído, éter y el fenol. Es el compuesto primario de la vaina de la vainilla. La vainilla sintética se emplea como agente saborizante en alimentos, bebidas y elementos farmacéuticos. Es una de las sustancias olorosas más apreciadas para crear aromas artificiales. (Solvey, 2014)
- **LICOR NEGRO:** la madera se compone a partes iguales de celulosa, lignina y agua. Para la extracción y blanqueo de la celulosa, se cuece la madera con productos químicos de donde resulta una mezcla de la lignina con agua y los químicos usados en el proceso, que forma el llamado licor negro, pero no apto todavía como combustible. Para ello, el licor negro tiene que secarse, reducirse y oxidarse en una caldera de recuperación que, gracias a la lignina ya en forma de combustible, permite producir vapor de alta presión. (M, Chavez-Sifontes, 2014) .

## INTRODUCCIÓN

El envejecimiento en pavimentos flexibles, ha sido durante mucho tiempo uno de los principales problemas que afectan la calidad y el tiempo de vida útil de la carpeta de rodadura. En este fenómeno intervienen por un lado, causas asociadas a variables intrínsecas como el tipo de agregados, el contenido de vacíos y las características propias de la mezcla asfáltica y por otro lado, factores externos como la humedad, la temperatura y la radiación, provocando daños que son imposibles de evitar pero si posibles de minimizar.

Los efectos que se producen corresponden en muchos casos a modificadores de orden químico, es decir en las relaciones moleculares de la mezcla. En general, estos cambios en la estructura molecular del asfalto provocan un endurecimiento físico que convierte lentamente la mezcla en un material frágil, susceptible a la aparición de grietas y otros fenómenos asociados.

Por esta razón surge la necesidad de ayudar a minimizar este proceso, al realizar la modificación del asfalto desde su estructura interna agregando un antioxidante natural, para cambiar así sus propiedades físicas y reológicas creando una carpeta asfáltica más resistente a factores que causan la oxidación y por consiguiente el envejecimiento.

Después de la celulosa la lignina es uno de los polímeros más abundantes debido a su origen natural. Su bajo costo de obtención, favorece su creciente importancia en distintas aplicaciones como la industria papelera, los combustibles, los alimentos, la fabricación de neumáticos, entre otros.

Esta investigación efectuará entonces, un análisis a los resultados obtenidos de la modificación con lignina de un cemento asfáltico (CA) 80-100, con el fin de mejorar las propiedades físicas-reológicas del material que conlleven a reducir el fenómeno de envejecimiento en las mezclas bituminosas. Esto se realizará a través de la caracterización del material y del ensayo rotatorio de película delgada (Rolling Thin Film Oven RTFO).

## 1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La importancia del asfalto en la construcción de carreteras se debe a su versatilidad y su bajo costo, convirtiéndose en uno de los materiales más usados a nivel mundial. Tan solo en países como Estados Unidos, estudios revelan que el 96% de la red vial se construyó utilizando asfalto (NCAT, 1999), así como en Colombia de acuerdo a Ecopetrol (2003), el 70% de las vías a nivel nacional y el 35% de la infraestructura vial de la ciudad de Bogotá también cuentan con este material, demostrando así su importancia. Sin embargo, el asfalto al ser un material susceptible a factores extrínsecos e intrínsecos como la temperatura, la radiación UV, la humedad, las precipitaciones, la temperatura de la mezcla, el tipo de asfalto y los agregados utilizados, deterioran sus cualidades y funciones correspondientes, convirtiéndose en un producto de poca durabilidad y de mayor costo (Atencia, Daza & Figueroa, 2013).

Estos cambios en las funciones del asfalto son conocidos como envejecimiento, un fenómeno que afecta las propiedades físicas, químicas y reológicas de la carpeta de rodadura. Puede presentarse en etapas tempranas como la mezcla en planta o en el proceso de construcción de una vía. Investigadores como Fernández (2011), y Vargas & Reyes (2010) explican que el ligante asfáltico se oxida en el momento de la elaboración por factores como la temperatura de mezcla y exposición al aire dando origen al envejecimiento, impidiendo el correcto funcionamiento de este producto y acortando su vida útil para el cual se había previsto. De acuerdo a esto, algunas investigaciones como la realizada por Chávez & Hernández (2009) citando a Thurston et al. (1941), centra su estudio en el comportamiento individual de los materiales constituyentes del asfalto o como Reyes-Ortiz (2009) que estudia los procesos externos que generan un cambio en las propiedades del asfalto original y modificado.

Esto abre paso a nuevas investigaciones en países como Colombia, Fernández, Rondón & Reyes (2011), especifican por medio de estudios y ensayos de laboratorio el comportamiento del cemento asfáltico (CA) y del asfalto modificado (CAM) cuando es afectado por la interacción de las variables ya mencionadas, en comparación con las alteraciones que se presentan cuando se produce el envejecimiento.

Las distintas problemáticas evidenciadas a partir del deterioro de la mezcla asfáltica por distintos factores, llevan a la necesidad de realizar una investigación más profunda y detallada de este acontecimiento, ya que al afectar directamente las vías dificulta la conservación de los pavimentos ante patologías a temprana edad, generando consecuencias inmediatas pasando de daños superficiales hasta daños estructurales.

## 2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a que el envejecimiento de asfaltos es un problema que perjudica la vida útil de los pavimentos, es necesario identificar alternativas que mitiguen los efectos ocasionados por este fenómeno y así permitir que el pavimento actúe de una mejor manera y cumpla con la función establecida para el periodo de tiempo que fue diseñado. A través de los años se han propuesto investigaciones que presentan diversas alternativas para disminuir la oxidación del asfalto durante la fabricación de la mezcla asfáltica. Una de las opciones que ha presentado mayor impacto por sus resultados favorables es la modificación del asfalto con polímeros entre los cuales se encuentra la lignina la cual es vista actualmente como una de las opciones más aceptadas para la modificación por su efecto estabilizador. Con respecto a lo anterior se formula la siguiente pregunta,

¿El asfalto modificado con lignina reduce el envejecimiento en el proceso de mezclado?

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1.OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento de envejecimiento de un cemento asfáltico 80-100 modificado con lignina a través del ensayo RTFO.

#### **3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Establecer el porcentaje óptimo de lignina que mejore las propiedades del asfalto, a partir de los ensayos físico-reológicos.
2. Evaluar el efecto del asfalto envejecido al ser modificadas con lignina, en comparación con un asfalto normal a través del ensayo de RTFO.

## 4. MARCOS GENERALES

### 4.1.MARCO CONCEPTUAL

#### 4.1.1. *Envejecimiento*

La infraestructura Vial es parte fundamental en el desarrollo de una sociedad, ya que permite comunicar todo un territorio beneficiando a toda una población, este tipo de obras, están construidas principalmente con pavimento asfáltico, por lo que su comportamiento mecánico y dinámico depende de las propiedades de la mezcla asfáltica. (Reyes, 2009). Hace más de cinco décadas a nivel mundial, se ha venido desarrollando un estudio preciso de los efectos del envejecimiento en ligantes y mezclas asfálticas (Herrera-Nájera, R. García, G. Xicoténcatl, H & Medina, L, 2011). El envejecimiento es considerado como un fenómeno que altera las propiedades físico-químicas de la carpeta de rodadura que ocasiona en el pavimento un deterioro a través del paso del tiempo y por ende disminuye su durabilidad (Vargas & Reyes, 2010), esto se debe a la interacción de las mezclas con factores internos y externos que ocasionan un endurecimiento considerable e irreversible, afectando en gran escala su desempeño requerido (Fernández, Rondón & Reyes, 2011). Los factores internos o también llamados variables intrínsecas son las propiedades de los materiales que hacen parte de la mezcla como el cemento asfáltico, los agregados y el contenido de vacíos (Fernández, et al., 2011), y los factores externos o variables extrínsecas afectan el proceso de la mezcla, el almacenamiento, transporte y la construcción de la carpeta de rodadura, estos son: la temperatura de producción de la mezcla, la humedad, la radiación ultra violeta y la temperatura ambiente (Vargas & Reyes, 2010). No obstante, investigadores como Chávez, Hernández, Manzano, (2011) y Bell, (1989), afirman que solo la temperatura tiene una influencia marcada en el envejecimiento, ya que el ozono, oxígeno y los rayos UV son factores que existen, pero no tienen ninguna variación y “los demás factores ambientales tienen interdependencia: la humedad relativa,

es un indicador de la evapotranspiración y precipitación, y depende de la temperatura. La variación de la temperatura del día a la noche es función de la radiación térmica del sol y del tiempo de radiación” (Chávez, et al, 2011).

El envejecimiento se puede llegar a originar desde las primeras etapas de elaboración como el mezclado en planta, presentarse en el proceso de construcción de una vía, o más comúnmente en su periodo de servicio (Fernández, et al., 2011). Este fenómeno es impulsado por medios o mecanismos químicos que intervienen en este proceso que finalmente alteran el orden químico, físico, mecánico y reológico de la carpeta asfáltica (Aguar, et al., 2013).

Cuando se afecta las propiedades químicas de la mezcla se produce un cambio con respecto al orden en la estructura molecular del asfalto, provocando un endurecimiento en esta y por consiguiente convirtiendo lentamente la mezcla en un producto frágil y susceptible a presentar daños como: grietas longitudinales, transversales, fisuras, piel de cocodrilo, etc. (Fernández, et al., 2011), Durante este cambio se presentan dos (2) etapas que contribuyen con el proceso de envejecimiento (Suárez, J. 2005), el primero es la destilación de los componentes de luz asfáltica originado por el incremento en la temperatura de producción del asfalto, almacenamiento, transporte y colocación disminuyendo el peso del ligante asfáltico por su evaporación, el segundo mecanismo es la oxidación durante la vida de servicio que se produce cuando la mezcla se pone en contacto con el ambiente y este altera las fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfaltenos) (Araya, et al. 2012), provocando una fragilidad y un agrietamiento a pequeña o gran escala, y el tercer mecanismo es el endurecimiento estérico producido por los cambios de temperatura cercanos a la temperatura del ambiente ( Orozco, G & Murillo, J. 2011).

Este y otros factores hacen que el envejecimiento se convierta en interés de estudio por su misma complejidad en el proceso de desarrollo como un fenómeno en pavimentos asfálticos (Yung, Y. 2013).

Durante el ciclo de elaboración de la mezcla asfáltica, los asfaltos se oxidan como efecto de reacción con el oxígeno y la temperatura de mezcla alcanzadas en el momento de la elaboración (Vargas & Reyes, 2010). Al hablar de oxidación del cemento asfáltico se tiene relación con un cambio en su estructura molecular, el cual hace que se creen moléculas polares de mayor tamaño, causando la alteración de sus propiedades reológicas (Rondón, H., Reyes, F & Ojeda, B. 2008). La oxidación es conocida como un fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los componentes principales más reactivos del asfalto, manifestándose en forma de endurecimiento, pérdida de la consistencia visco elástica, fisuración y agrietamiento, presentándose en las etapas de producción a causa de factores como presión, temperatura y tiempo (Vacca, León & Ruiz, 2012) Esto abre paso a las primeras fases de desarrollo del envejecimiento y que en conjunto con diversos agentes climáticos es inducido a presentarse como un fenómeno más grave en su totalidad, para la estructura del pavimento(Vargas & Reyes, 2012).

Las carpetas asfálticas envejecidas son las que presentan un cambio en las propiedades originales de la mezcla durante el tiempo de servicio por efecto de agentes ambientales (Botasso, G., Rebollo, O., Cuattrocchio, A & Soengas, C. 2008) , por esta razón el envejecimiento se asocia con la pérdida de los componentes volátiles y la oxidación del asfalto (Vacca, et al, 2011) que consecuentemente impide el correcto funcionamiento de la capa superior del pavimento para lo cual fue construida (Chávez & Hernández 2009), siendo obligatorio terminar la vida útil de su servicio. Por esto es de gran importancia tener en cuenta el efecto del cambio en la composición químico y físico del cemento asfáltico durante el proceso de mezclado en caliente y tiempo de servicio si se quiere obtener una carpeta asfáltica con mayor durabilidad (Paredes, Reyes & Camacho, 2013).

Asimismo Cuando se habla de este fenómeno se debe tener presente que existen dos tipos de envejecimiento los cuales se dan de acuerdo al tiempo en el que se presentan

puntualizando la etapa de producción y colocación de la mezcla asfáltica la cual hace parte del primer tipo de envejecimiento ( Envejecimiento a corto plazo) (Puello, Afanasjeva & Alvares, 2013 ) y se tiene presente el tiempo de uso, y vida de servicio como vía, el cual corresponde al segundo tipo de envejecimiento ( Envejecimiento a largo plazo) (Chávez & Hernández, 2009).

Como se mencionó anteriormente el envejecimiento a corto plazo, se origina cuando se elabora la mezcla en la planta y durante la colocación in situ de la mezcla asfáltica (Chávez, et al, 2011). Es causado por la oxidación y la pérdida de volumen o volatilización del cemento asfáltico, El cual se presenta cuando hay reacción con los hidrocarburos de la atmósfera al elevarse la temperatura inicial y al tener contacto directo el oxígeno con el ambiente (Cárdenas, J., Fonseca,E. 2009) .

Vaca, León & Ruiz (2012) evalúan el desempeño dinámico y estático de mezclas asfálticas envejecidas a corto plazo por medio del ensayo de laboratorio Rolling thin Film Oven (Ensayo rotatorio de película delgada [RTFO]) el cual simula el proceso de producción y colocación de mezclas asfálticas generando un incremento en la viscosidad del asfalto con endurecimiento de la mezcla. Los estudios realizados afirman que el envejecimiento de asfalto con el ensayo RFTO simula de manera acertada el envejecimiento generado por factores reales (Puello, et al, 2013). El ensayo rotatorio de película delgada, propuesto por Hveem et al (1963), fue desarrollado para evaluar el envejecimiento del asfalto a corto plazo.

El envejecimiento a largo plazo se presenta exclusivamente en el periodo de servicio del pavimento, a causa de la oxidación, exposición a condiciones ambientales y en el campo durante el tiempo de servicio (Fernández, et al, 2011). Este tipo de envejecimiento Causa fallas igual de graves a la oxidación inicial, incluido un aumento en la rigidez, pérdida de la ductilidad, y fragmentación del producto bajo tensiones térmicas o carga (Pan, 2013), Al haber un aumento de asfaltenos y componentes aromáticos causados por la reacción de las condiciones ambientales se obtiene como resultado estos problemas (mayor rigidez,

pérdida de ductilidad, fragmentación) en el pavimento, sus efectos no se ven a corto plazo, a través del tiempo estas características se pueden detallar (Fernández, et al, 2011). Sin embargo, el envejecimiento oxidativo a largo plazo puede causar fallas graves, como el gran aumento de la rigidez ya mencionado, pérdida de ductilidad, y el craqueo de los productos finales bajo tensiones térmicas y / o de carga.

Actualmente existe un método para especificaciones de materiales asfálticos, resultado de diversas investigaciones a través de la historia: el método SUPERPAVE (SUPERforming Asphalt PAVements) el cual mide las propiedades físicas de los asfaltos sobre los asfaltos envejecidos por el laboratorio creando condiciones reales de operación del pavimento (Puiggené, Torres-Llosa y Takamura, 2013). En el método SUPERPAVE “el potencial de ahuellamiento es verificado con una muestra de asfalto original y otra luego de realizar el envejecimiento en RTFO, mientras que el potencial de fisuración (debida a fatiga y a cambios térmicos) es corroborado mediante el envejecimiento por medio del Pressure Aging Vessel (PAV)”(Vacca, et al, 2012). El ensayo PAV tiene como mecanismo oxidar aceleradamente la mezcla asfáltica representando un estado de servicio por muchos años lo cual simula un envejecimiento a largo plazo (Salcedo, C. 2008).

Alternando a esto, Bell (1989) “estudió el envejecimiento de sistemas asfalto-agregado y concluyó que los métodos más recomendados para evaluar la durabilidad a largo tiempo son envejecimiento en horno, oxidación bajo presión, tratamiento con luz ultravioleta, tratamiento con humedad, y para corto tiempo son calentamiento y tratamiento con microondas. Adicionalmente, dividió las pruebas para evaluar las mezclas asfalto-agregado, en pruebas destructivas y no destructivas, siendo algunas de estas últimas el módulo dinámico, el módulo elástico y la prueba de tensión indirecta” (Vargas & reyes, 2010).

En Colombia se comenzó a estudiar el envejecimiento bajo condiciones naturales a mediados del año 1997 por investigadores como Afánasieva & Álvarez, evaluando los

cambios que se daban en las propiedades físicas y mecánicas a partir de ensayos de viscosidad, ductilidad, penetración, punto de ablandamiento y densidad.

#### **4.1.2. *Asfalto Modificado***

A nivel mundial la utilización de los asfaltos modificados se ha convertido en uno de los métodos de mayor uso para el mejoramiento de las características que presentan las mezclas asfálticas al experimentar niveles elevados de tránsito y distintas temperaturas (Rondón, Reyes, Figueroa, Rodríguez, Real & Montealegre, 2007). Su uso permite conseguir un producto de mayor durabilidad y mejor comportamiento bajo las cargas de tránsito, por eso desde hace varios años esta tecnología de asfaltos modificados se emplea en distintos países del mundo como Brasil, México, Chile, España, Costa Rica y Colombia (Figueroa, Reyes, Hernández, Jiménez & Bohórquez, 2007).

Esta alternativa tiene un efecto significativo en los pavimentos ya que consigue una mejora en propiedades como cohesión y adhesividad, un mayor tiempo de vida útil y por ende logra disminuir costos de mantenimiento en las vías (Pérez & López, 2012), obteniendo una mayor resistencia a los efectos del agua y cambios climáticos. También se mejoran las propiedades elásticas y de viscosidad con el fin de obtener un producto más resistente a la deformación y fatiga, minimizando los efectos producidos por este fenómeno que ataca a los pavimentos (Salinas, P. 2009).

Países como Estados Unidos, Venezuela, Costa Rica, Salvador, Francia y Brasil iniciaron las investigaciones para minimizar los efectos del envejecimiento (Pérez & López, 2012), buscando alternativas convenientes para reducir el riesgo del daño por este fenómeno y a su vez, contribuir a la fomentación de la innovación en materiales para carreteras a partir del uso de desechos, elementos no biodegradables y materiales orgánicos (Aguilar, et al, 2013).

A partir de esto se han realizado trabajos con la utilización de llantas, vidrio, polietileno, PVC, icopor, polímeros, fibras, ceras naturales, cal, etc.

Aguilar et al. 2013, realizaron un estudio del uso de materiales de desechos como una alternativa para la modificación de asfaltos, donde se evaluó el uso de poliestireno (una mezcla de llenante de polímero que incluye caucho, talco, fibra de carbón, fibra de vidrio, polipropileno, polietileno y caucho de llanta), como modificador para el asfalto (AC-30). Los ensayos se realizaron en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme UCR, Universidad de Costa Rica). La caracterización del asfalto se realizó siguiendo la metodología SUPERPAVE para el asfalto original, el asfalto envejecido a corto plazo (RTFO) y el asfalto envejecido a largo plazo (RTFO+PAV). Los modificantes fueron incorporados al asfalto de acuerdo a una dosificación por peso, obteniendo un resultado que permite concluir, que al utilizar estos materiales se mejora el desempeño frente a la deformación permanente y a la fatiga. Adicionalmente trae consigo ventajas como la reutilización de elementos no biodegradables que generan alto impacto en el medio ambiente, pues su lugar de disposición final son fosas o basureros (Aguilar, Salazar, Villegas, Leiva, Loira & Navas, 2013).

En otra investigación, se incorporaron látices sintéticos de estireno-butadieno de altos sólidos y polimerizados en frío (látex de SBR) para la modificación del bitumen en mezcla asfáltica en caliente y para emulsiones bituminosas empleadas en aplicaciones en frío como el micro-pavimento y tratamientos superficiales. Se realizaron los ensayos de penetración y viscosidad para el asfalto seguidos del método SHRP (Strategic Highway Research Program) de los Estados Unidos, que da como resultado las especificaciones SUPERPAVE obteniendo una correlación real del rendimiento del pavimento. La mezcla del asfalto con el látex de SBR se realizó por agitación a presión atmosférica utilizando un sistema de extracción de afluentes. Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron concluir que al modificar el asfalto con este polímero disminuye factores del envejecimiento como:

ahuellamiento o acanalamiento por deformación plástica del ligante bituminoso, rotura por cambios de la temperatura, fatiga y desprendimiento de agregados (Puiggené, Torres-Llosa y Takamura, 2013).

Así mismo Vargas & Reyes, 2010 citando a Ruan, Davison & Glover (2003), que al analizar una mezcla asfáltica modificada con polímero la cual estaba envejecida , determina que la modificación con polímeros incrementa el módulo complejo (incremento en la resistencia a la deformación "ablandamiento") a temperaturas elevadas y lo disminuye a bajas temperaturas, lo que significa que los polímeros disminuyen la susceptibilidad al envejecimiento de los asfaltos y reducen el incremento de la ductilidad.

Con lo anterior es posible determinar que los polímeros industriales y polímeros de desechos de productos biodegradables son los productos más utilizados en el área de asfaltos modificados (Figueroa y Fonseca, 2008). Polímeros de tipo elastómero tienden a deformarse al inducirles fuerza pero vuelven casi a su forma original cuando se retira la fuerza inducida, entre los más destacados se encuentran los copolímeros en bloque de estireno y butadieno SBS (Pérez & López, 2012). Estos son algunos de los agentes modificadores comúnmente empleados en las investigaciones más recientes:

**Tabla 1.** Agentes Modificadores.

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

**Fuente:** Figueroa, et al, (2007).

Los polímeros son compuestos orgánicos con un alto peso molecular, conformados por cadenas sucesivas de grupos estructurales llamados monómeros. Los polímeros se dividen en plastómeros y elastómeros (Rondón, 2007).

Los plastómeros son un grupo de materiales sintéticos que se diferencian entre sí, por su estructura química y tipo de enlace (termoplásticos y termoendurecibles). Los elastómeros son componentes poliméricos con diversos cambios en sus dimensiones (Pérez & López, 2012).

#### **4.1.3. *Modificación con Lignina***

Actualmente se está buscando una técnica con resultados efectivos para minimizar el daño que genera el envejecimiento a los pavimentos (Aragão, P. Alves da Frota, C. Bertoldo, R.A & Freitas da Cunha, T.M, 2011), la tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas se ha convertido en una alternativa que es considerablemente estudiada y aplicada en el mundo, con el uso de polímeros que modifican las propiedades del asfalto y la mezcla (Reyes, F.A. Guáqueta, C. Porras, L.M. Rondón, H.A, 2013).

Al existir una compatibilidad entre la matriz del asfalto y un material adicional, se mejoran las propiedades reológicas de la mezcla evitando problemas como el desgaste de la carpeta de rodadura o un aumento a la resistencia de fatiga (Botaro, Rodríguez, Castro & Cerantola, 2006). Se ha demostrado que la presencia de polímeros en el asfalto reduce efectos tales como el endurecimiento del asfalto y la pérdida de las propiedades físicas deseables también conocidas como oxidación, de igual forma reduce los efectos producidos por el envejecimiento y por lo tanto desacelera la formación de grietas y surcos en el pavimento, junto a otras patologías (Gadioli, Moráis, Waldman & Paoli, 2014).

En la búsqueda de un asfalto resistente a la oxidación, Pan (2013), realizó una investigación en la ciudad de Washington en la cual utilizó la técnica de espectroscopias de fotoelectrones de rayos x (XPS): Es un método utilizado para la caracterización de superficies, donde se estudia los elementos químicos y atómicos de la estructura del pavimento. Este mismo autor, utilizó dicha técnica para probar la validez de los modelos de asfaltos modificados y no modificados. Para ello, elaboró 7 muestras de asfalto modificado con aditivos biológicos entre los que se encontraba la lignina, polímero considerado antioxidante por tener una gran cantidad de estructuras de fenol (Chávez, M. & Domine, M. 2013).

La mezcla se llevó a cabo a una temperatura de 130 °C y 150 °C, en un tiempo equivalente a 2 horas, para comprobar la resistencia de la lignina a elevadas temperaturas y simular el envejecimiento del asfalto. Con este procedimiento se demostró la capacidad de la lignina para sobrevivir a 130°C y 150 °C, y se concluyó que la lignina que se estudió era adecuada para las mezclas en caliente. Una vez realizadas las mezclas, se ejecutó la técnica de espectroscopia para analizar los elementos de la mezcla a nivel molecular (Pan, 2013). A partir de los resultados de la investigación realizada se afirma que al utilizar tecnologías como la modificación de asfalto se mejora el comportamiento que experimentan las mezclas tradicionales cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente (Pan, 2013), es decir, se reduce la pérdida de componentes volátiles, incrementando la viscosidad y endureciendo la mezcla (Elizondro, F., Salazar, J & Villegas, E. 2010).

Botaro, Castro, Junior & Cerantola (2006), estudiaron las características de una mezcla asfáltica modificada con poliestireno reciclado (PS), polvo de neumáticos (PPN) y lignina (LIG), Donde realizaron ensayos como penetración y punto de ablandamiento (Anillo y bola) para determinar la eficacia de la mezcla de asfalto. Se usaron porcentajes de 1% a 6% de agentes modificadores, como lo muestra la Tabla 2. Los resultados en estos ensayos indicaron que a mayor porcentaje de agente modificar menor penetración y mayor punto de ablandamiento. El propósito principal de esta investigación fue reforzar la matriz de la mezcla base y obtener como resultado un aumento en su resistencia (Gadioli, Moráis, Waldman & Paoli, 2014), para esto se tuvo en cuenta las características, concentración del aditivo y naturaleza de la matriz de asfalto (Aguar, et al., 2013).

**Tabla 2.** Porcentajes utilizados en la modificación del asfalto CAP20.

BLENDA	POLÍMERO	ASFALTO ( % en masa)	POLÍMERO (% en masa)
CAP20PS1	PS	99,0	1,0
CAP20PS2	PS	98,0	2,0
CAP20PS3	PS	97,0	3,0
CAP20PS4	PS	96,0	4,0
CAP20PS5	PS	95,0	5,0
CAP20PS6	PS	94,0	6,0
CAP20LIG1	LIG	99,0	1,0
CAP20LIG2	LIG	98,0	2,0
CAP20LIG3	LIG	97,0	3,0
CAP20LIG4	LIG	96,0	4,0
CAP20LIG5	LIG	95,0	5,0
CAP20LIG6	LIG	94,0	6,0
CAP20PPN1	PPN	99,0	0,1
CAP20PPN2	PPN	98,0	0,2
CAP20PPN3	PPN	97,0	0,3
CAP20PPN4	PPN	96,0	0,4
CAP20PPN5	PPN	95,0	0,5
CAP20PPN6	PPN	94,0	0,6

**Fuente:** Botaro. Et al, (2006)

Algunos polímeros contienen diferentes porcentajes de fibras vegetales, el uso de estas fibras reduce el impacto termoplástico y mejora la resistencia mecánica de los asfaltos, igualmente reducen el peso de los materiales compuestos y posibilitan la opción de obtener materia prima de recursos renovables. Es por esto que la lignina es vista actualmente como uno de los polímeros más aceptados para modificar asfalto, por su efecto estabilizador que

presentan las fibras, mayor rigidez en ellas y una interacción aceptable en cuanto a fibra-matriz (Gadioli, et al, 2014).

“En el mundo se generan entre 40 y 50 millones de toneladas de lignina por año”, (Bedia, Rosas & Márquez, 2009) siendo así un biopolímero de fácil acceso por su abundancia natural y gran producción. Hoy en día a nivel mundial su uso como materia prima es importante en industrias papeleras, de alimentos, fabricación de tableros aglomerados y materiales rígidos, combustibles y como emulsionantes en mezclas de betunes y asfaltos.

## **4.2. MARCO REFERENCIAL**

### **4.2.1. Lignina**

#### ***4.2.1.1. Generalidades***

El botánico suizo A.P. Candolle (1778-1841) utilizó el término "lignina" (derivado del latín lignum = madera) por primera vez, considerada como un biopolímero abundante ya que se encuentra presente en todas las plantas vasculares, se forma mediante el proceso de fotosíntesis, (Sifontes y Domine, 2013), es uno de los polímeros orgánicos más abundantes en la Tierra, compone el 30% de carbono orgánico no fósil y de un cuarto a un tercera parte de la masa seca de la madera. La lignina está considerada como un recurso renovable accesible y de potencial uso industrial cuya producción anual se ha estimado alrededor de  $5-36 \times 10^8$  toneladas. (Chávez, M. & Domine, M, 2013, citando a Sustainable Forestry for Bioenergy & Bio-based Products, 2007). En la tabla 3 se presentan los porcentajes con respecto al contenido de lignina de varios tipos de plantas importantes desde el punto de vista comercial.

**Tabla 3.** Porcentaje de lignina en diferentes tipos de plantas.

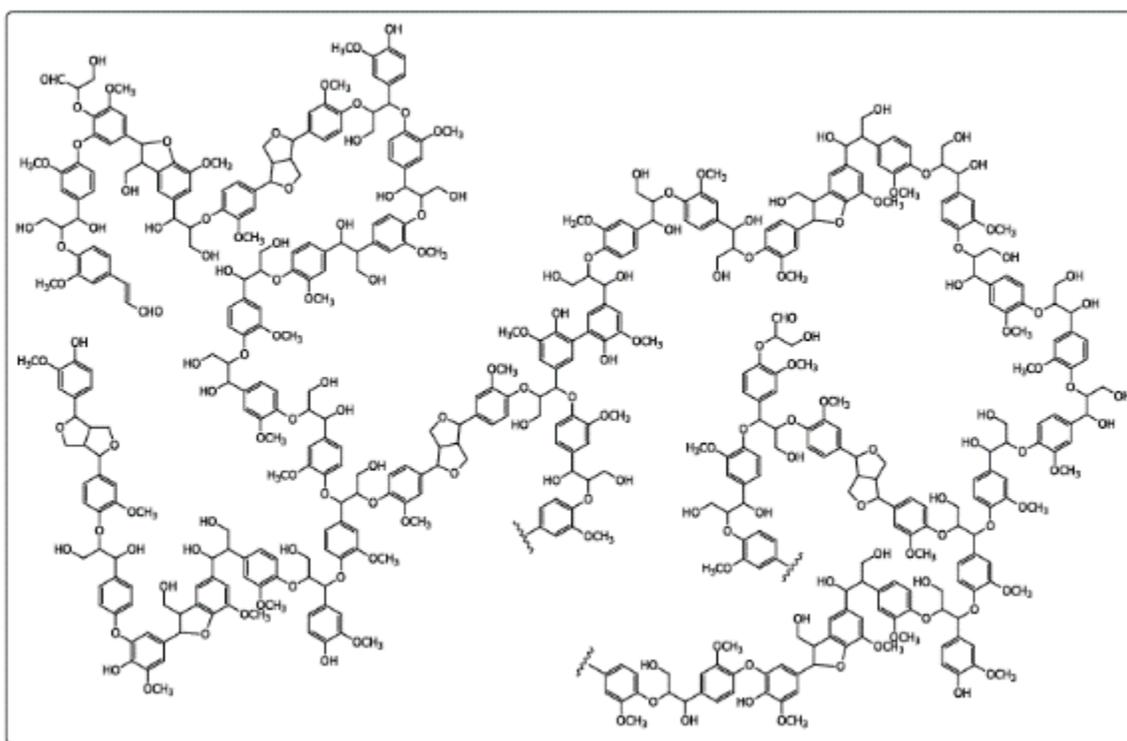
Planta		
Nombre científico	Nombre común	Contenido de lignina (%)
<i>Picea abies</i>	Abeto Noruego	28-29
<i>Tsuga canadensis</i>	Abeto Oriental	31
<i>Panicum virgatum</i>	Pasto varilla	33
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Abeto de Douglas	29
<i>Pinus sylvestris</i>	Pino de Escocia	28
<i>Pinus radiata</i>	Pino de Monterey	27
<i>Prunus amigdalus</i>	Almendro	26
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucalipto rosa	25
<i>Eucalyptus globulus</i>	Eucalipto de goma azul	22
<i>Acacia mollisima</i>	Acacia negra	21
<i>Betula verrucosa</i>	Abedul	20
<i>Populus tremula</i>	Álamo europeo	19
<i>Olea eusopaea</i>	Olivo	19
<i>Gossypium hirsutum</i>	Algodón	16
<i>Saccharum species</i>	Bagazo de caña	14
<i>Oryza species</i>	Paja de arroz	6,1

**Fuente:** Chávez, M. & Domine, M, (2013).

La lignina cumple con una función fundamental que se caracteriza por dar soporte estructural, impermeabilidad y resistencia contra agentes microbiológicos y estrés oxidativo. Se trata de un elemento amorfo, ópticamente inactivo e insoluble en agua. Todo ello hace que la lignina se convierta en un polímero muy resistente a la degradación (Medina, Fernández, Aguilar & Garza, 2011).

Su estructura molecular es considerada como una de las más complejas entre los polímeros orgánicos, debido a la dificultad que afecta su aislamiento y caracterización estructural (Sifontes & Domine, 2013). La molécula está compuesta de varios tipos de subestructuras que parecen repetir de una manera casual, y por unidades de fenilpropano que forman una red polimérica tridimensional, con un mayor contenido de núcleos aromáticos (Bedia, Rosas & Márquez, 2009). Estas unidades estructurales no se repiten de forma regular, ya que cada molécula proviene de diferente origen (Sifontes & Domine, 2013), como se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1.** Modelo estructural lignina de madera aserrada.



**Fuente:** (Chávez & Domine, 2013).

#### **4.2.1.2. Estructura**

De forma más explícita Brauns define la estructura de la lignina en las siguientes características:

- Se consideran polímeros vegetales formados a base de unidades fenilpropanoides.
- La mayor parte de ellas se compone de grupos metoxilo contenidos en la madera.
- Al reaccionar con nitrobenzeno las ligninas producen vainillina.
- Cuando se colocan a ebullición en una solución etanólica de ácido clorhídrico, las ligninas forman monómeros del tipo "cetonas de Hibbert" (mezcla de cetonas aromáticas resultantes de la ruptura de los principales enlaces éter ( $\beta$ -O-4) entre unidades de lignina).

#### **4.2.1.3. Tipos de lignina**

##### **4.2.1.3.1. Lignina Kraft (Alcalina)**

Este tipo de lignina es obtenida por medio del proceso denominado sulfato o Kraft, el cual es considerado como uno de los procesos más utilizados, esto debido a la variedad de materia primas que puede ofrecer (Bedia, Rosas & Márquez, 2009). En este procedimiento se usa una disolución acuosa (hidróxido de sodio y sulfuro sódico) en condiciones fuertemente alcalinas como agente químico en la preparación del licor negro, el cual se puede obtener por medio de otros procesos (evaporación y quema del residuo para la producción necesaria de energía). Seguido de esto se llega a la reutilización como materia prima inicial, en el cual la lignina es obtenida a través del procedimiento de precipitación del licor negro, donde se realiza una filtración para la recuperación de la lignina obtenida, después de esto se seca el producto recuperado para su debida comercialización. (5° Congreso Forestal Español, 2009). Estas ligninas, presentan bajos pesos moleculares (alrededor de 700 Da), son insolubles en agua y tienen bajos niveles de contaminantes en azúcares y cenizas (Bedia, Rosas & Márquez, 2009).

#### ***4.2.1.3.2. Lignina Lignosulfonato***

Este tipo de lignina se origina del proceso de fabricación de la pasta de papel (proceso al sulfito). Presentan pesos moleculares que oscilan entre 4.000 y 150.000 Da, son solubles en agua y van acompañados de diversos productos de degradación (azúcares) y son consideradas como ligninas industriales importantes con respecto a las cantidades comercializadas (Bedia, Rosas & Márquez, 2009).

#### ***4.2.1.3.3. Lignina Organosolv***

Este tipo de lignina es obtenida en los procesos denominados “organosolv”, los cuales usan solventes orgánicos como medio de cocción mezclados con agua o en presencia de catalizador ácido o básico, en este procesos la reparación de los solventes orgánicos del licor negro es por medio de destilación lo que hace que el impacto ambiental sea menor con respecto a los procesos anteriores, asimismo se obtiene una pasta de mejor rendimiento con facilidad de blanqueo y una lignina poco degradada (5° Congreso Forestal Español, 2009) .

No se ha determinado un método específico para separar la lignina de la madera sin que su estructura quede intacta en un 100%, aunque en las últimas décadas, se han desarrollado diferentes proyectos investigativos con el fin de reemplazar los procesos convencionales, que en gran parte usan sulfuro, esto con tecnologías de pulpeo que se basan en la utilización de solventes orgánicos (5° Congreso Forestal Español, 2009).

#### ***4.2.1.4.Utilización***

La lignina se considera un producto renovable, actualmente a nivel mundial su uso tiende cada vez más a la obtención de productos de mayor valor añadido. Estos usos alternativos apenas representan un porcentaje mínimo de sus aplicaciones tales como paneles, dispersantes, carbón activo, adhesivos, tableros, surfactantes, usos veterinarios (antidiarreicos y curas de la colibacilosis), usos médicos (cáncer de colon, enfermedades gástricas, enfermedades de la piel y antibióticos) (El mansouri, 2006).

#### **4.2.1.4.1. Productos industriales derivados de la lignina:**

- Vainillina, sustituto del extracto de vainilla natural.
- Dimetil sulfuro y metil mercaptano, utilizado ampliamente en la producción de alimentos para animales.
- Sulfoxido de dimetilo, empleado en medicina como acarreador de drogas y como solvente de muchos materiales carbohidratos.
- Dimetil sulfona, empleada como plastificante y solvente selectivo.

#### **4.2.1.4.2. Aplicaciones a escala industrial de las ligninas como productos poliméricos (Chávez & Domine, 2013).**

- aditivo en cemento y concreto, ayuda la molienda, reduciendo la aglomeración de las partículas y conservando la superficie limpia (solo un 0,2 % de lignina es necesaria para mejorarla)
- empleado para concreto como agente de arrastre de aire se obtiene un aumento a la resistencia del desgajamiento y del rompimiento.
- Su propiedad de dispersión es útil en el mezclado y colocación de concreto se necesita de 0.15 a 0.35 lb de derivado de lignina por saco de cemento, reduciendo arriba del 20% de agua empleada, esto se traduce en un mejoramiento a la resistencia compresiva y a la durabilidad del concreto.
- Ingredientes de resinas, la lignina ha sido usada con éxito como agente amarrante de suela, de cartón y de papel laminado.
- La lignina residual después del proceso de hidrolisis acida o auto hidrólisis puede ser utilizada como materia prima para la producción de fenol, benceno, tolueno, xileno y otros compuestos aromáticos.

#### **4.2.2. Asfalto**

Hace parte del grupo de sustancias bituminosas, las cuales son encontradas en la naturaleza en estado sólido, líquido o gaseoso. Proviene del petróleo y está formado por compuestos de mayor peso molecular, los cuales son hidrocarburos y heterocompuestos formados por carbono e hidrógenos acompañados por otros compuestos como: nitrógeno, azufre y oxígeno (Subiaga, A. Cuattrocchio, A. 1990), obtenidos durante la destilación del petróleo o directamente del subsuelo (Romero, C.M & Gómez A. 2002).

Los asfaltos de petróleo pueden tener dos tipos de bases. La primera es base asfáltica que son los que poseen mejores características para la construcción de pavimentos ya que tiene mejores propiedades en cuanto a resistencia, y los de base parafínicas los cuales se oxidan paulatinamente al ser expuestos a agentes ambientales como el aire y temperatura (Garzón, E. & Cárdenas, A.2013).

Los asfaltos utilizados para pavimentación tienen una consistencia de sólido a semisólido, con propiedades termoplásticas, esto se debe a que su consistencia varía según la temperatura (a bajas temperaturas se obtiene un asfalto sólido frágil y quebradizo y a altas temperaturas se obtiene un asfalto líquido viscoso).

##### **4.2.2.1. Composición fisicoquímica del asfalto**

La composición de los asfaltos es compleja, ya que está constituido por cadenas de moléculas formadas básicamente por carbono, hidrogeno, azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio( Repsol, 2013), como lo muestra la Tabla 4.

La composición específica, depende del origen del petróleo crudo del cual procede.

**Tabla 4.** Composición de los asfaltos según su procedencia de petróleo.

<b>Elemento</b>	<b>Betún A</b>	<b>Betún B</b>	<b>Betún C</b>	<b>Betún D</b>
Carbono (%)	83.77	85.78	82.90	86.77
Hidrógeno (%)	9.91	10.19	10.45	10.93
Nitrógeno (%)	0.28	0.26	0.78	1.10
Azufre (%)	5.25	3.41	5.43	0.99
Oxígeno (%)	0.77	0.36	0.29	0.20
Vanadio (ppm)	180	7	1380	4
Níquel (ppm)	22	0.4	109	6

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

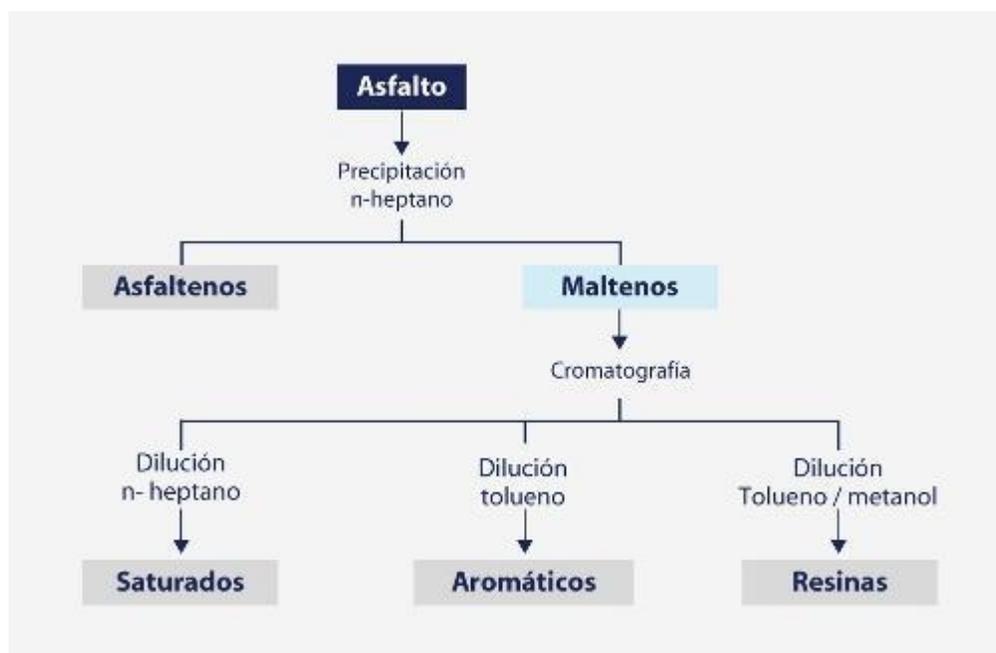
n

#### **4.2.2.2. Estructura química de los asfaltos**

El asfalto químicamente se divide en dos grandes grupos principales: los asfáltenos y máltenos como se puede ver en la figura 2.

Cuando el asfalto se disuelve en n-heptano, los materiales duros son precipitados, denominados como máltenos (Repsol, 2013), y por el contrario los asfáltenos son insolubles en n-alcanos, tales como el n-pentano o n-heptano, y solubles en tolueno.

**Figura 2.** Composición química del asfalto.



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

□

#### **4.2.2.2.1. Asfáltenos**

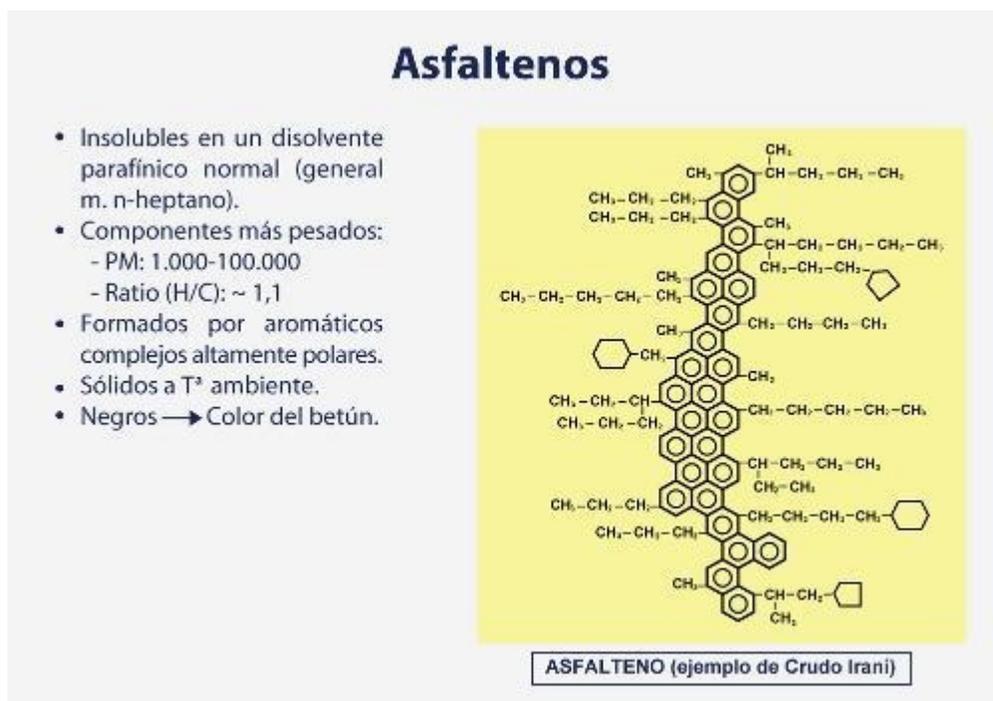
Los asfáltenos son un tipo de componentes de los hidrocarburos, los cuales son compuestos que abarcan un rango de composiciones que va desde el gas natural seco hasta el alquitrán.

A lo largo de este rango, la densidad y viscosidad se eleva de manera significativa

(Akbarzadeh, H., Hammami, A., Kharrat, A. & Zhang D., At. El, 2006)

Su estructura es compleja, compuesta de aromáticos de color negro o marrón el cual además de contener carbón también contiene elementos químicos como; nitrógeno, azufre y oxígeno entre otros, con vistos como compuestos polares de alto peso molecular (Repsol, 2013), en la Figura 3. Se pueden observar estas características.

**Figura 3.**Asfáltenos



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

¶

#### 4.2.2.2.2. *Máltenos*

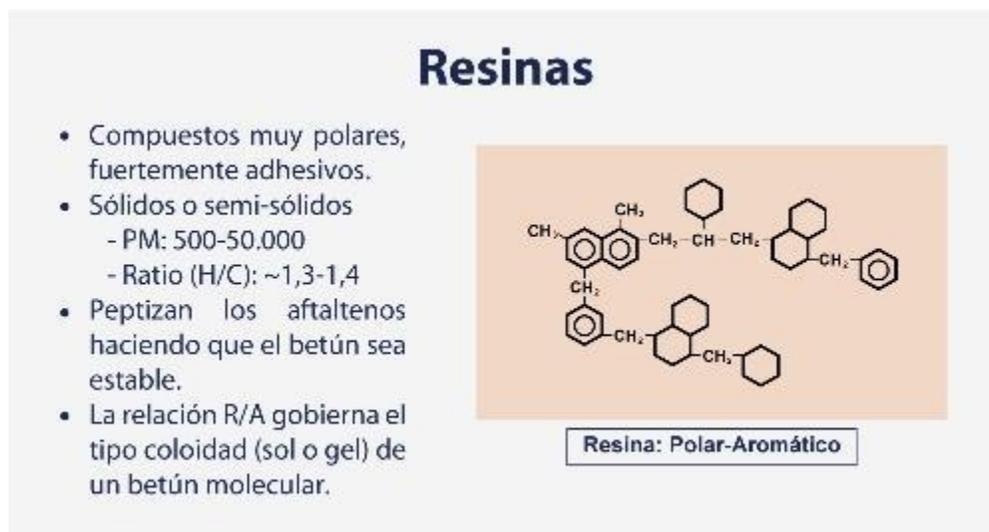
Los maltenos son sustancias solubles en solventes como en normal h—heptano, constituidos por resinas, saturados y aromáticos. Estos compuestos son considerados muy polares de color marrón o marrón claro, sólidos o semisólidos, y como los asfaltenos son compuestos de carbón, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre (Repsol, 2013).

#### 4.2.2.2.3. *Resinas*

Las resinas son materiales muy adhesivos y actúan como dispersantes o peptizantes de los asfaltenos como lo muestra la Figura 4.

Son elementos sólidos de color rojizo u oscuro, capaces de reblandecerse a altas temperaturas.

**Figura 4.**Resinas



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

□

#### 4.2.2.2.4. Aromáticos

Estos elementos constituyen entre el 40% y 65% de la composición total de los asfaltos, son consideradas como las fracciones de menor peso molecular entre la estructura del asfalto. Los aromáticos representan la mayor proporción de los dispersantes de los asfáltenos peptizados (Repsol, 2013), como se puede ver en la figura 5.





- El asfalto tiene propiedades tales como consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad. Estas propiedades lo hacen ideal para la construcción de pavimentos flexibles, como también para bases estabilizadas, emulsiones asfálticas, y otras.
- En su mayoría, los asfaltos se comportan como sólidos o semisólidos a una temperatura ambiente y su comportamiento varía dependiendo a la temperatura a la que se lo someta, al aumentarle los grados se ablanda y se vuelve fluido, permitiendo así recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de una mezcla asfáltica.

#### ***4.2.2.4. Clasificación del asfalto***

El asfalto se clasifica de acuerdo a su uso.

- Asfalto para pavimentación
- Asfalto para uso industrial

##### ***4.2.2.4.1. Asfalto para pavimentación***

Los asfaltos para pavimentación se dividen en tres grupos de ligantes asfálticos:

###### ***4.2.2.4.1.1. Emulsiones Asfálticas***

Se componen por dos elementos, los cuales corresponden a agua y cemento, cada uno de estos elementos tienen una participación porcentual del 30 -40 % y 60-70%. Son utilizados en tratamientos superficiales, riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas.

De acuerdo a su velocidad de rotura de la emulsión se dividen a su vez en: emulsiones asfálticas de rompimiento rápido, de rompimiento medio y de rompimiento lento.

#### 4.2.2.4.1.2. Asfalto Líquido

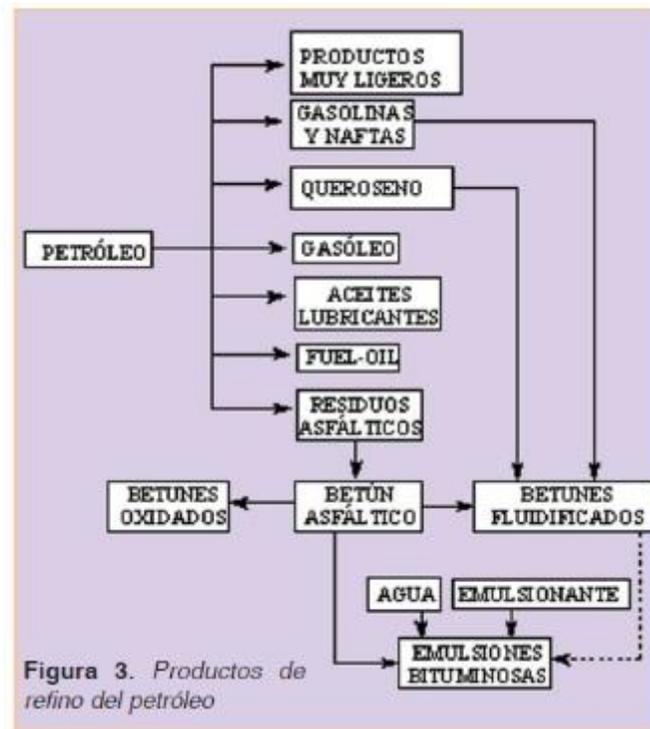
Son conocidos también como asfaltos rebajados o “cut backs”, estos asfaltos están compuestos por una base asfáltica de cemento asfáltico y un fluidificante volátil que puede ser bencina, kerosene o aceite. El solvente es aplicado con el fin de aportar al asfalto la viscosidad necesaria para permitir así la mezcla con los agregados y por lo tanto trabajar a bajas temperaturas o a una temperatura ambiente, después de elaborada la mezcla los fluidificantes se evaporizan permaneciendo el residuo asfáltico que rodea y aglutina los agregados.

La forma de evaporación del solvente determina si el tiempo de curado es lento (“SC” asfaltos rebajados de curado lento), medio (“MC” asfaltos rebajados de curado medio) o rápido (“RC” asfaltos rebajados de curado rápido).

#### 4.2.2.4.1.3. Cemento Asfáltico

El cemento asfáltico es el producto del proceso de la refinación del crudo como se puede ver en la figura 7.

**Figura 7.** Productos de refino del petróleo.



**Fuente:** Martínez, A., Martín, N., Gómez, A. & Páez, A. (2008).

Tiene propiedades de aglutinamiento, flexibilidad, resistencia y viscosidad la cual es apropiada para la pavimentación, se distingue con las letras AC la cual vienen acompañados del rango de penetración.

El cemento asfáltico se pueden sub-clasificar en tres sistemas diferentes: viscosidad antes y después de envejecimiento y penetración. Se encuentran en rangos de consistencia, de acuerdo al ensayo de penetración, el cual es considerado como uno de los ensayos más comunes en la caracterización del asfalto. En la tabla 4 se puede observar los rangos de penetración estándar.

**Tabla 5.** Rangos de penetración estándar.

<b>Rango</b>	<b>Penetracion estandar (0,01 mm)</b>
AC 40-50	40-50
AC 60-70	60-70
AC 85-100	85-100
AC 120-150	120-150
AC 200-300	200-300

**Fuente:** Garzón, E. & Cárdenas, A. (2013).

En Colombia los rangos de penetración empleados son:

- AC 60-70
- AC 80-100

El rango de AC 60-70 son empleados para climas cálidos y AC 80-100 se utilizan para climas templados o fríos.

#### Especificaciones de los Cementos Asfálticos

Para la determinación de calidad de un cemento asfáltico, es necesario realizar una sucesión de ensayos normalizados por el instituto Nacional de vías (INVIAS).

Ensayos para la caracterización de asfaltos:

- Penetración, Norma INVIAS 2007 (I.N.V.E 706-07)
- Índice de penetración, Normas INVIAS 2007 ( I.N.V.E-724 – 07)
- Viscosidad absoluta, Norma INVIAS 2007 , ( I.N.V.E-716-07)
- Ductilidad, Norma INVIAS 2007, (I.N.V.E-702-07)
- Contenido de agua, Norma INVIAS 2007, ( I.N.V.E-704-07)
- Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland, Norma INVIAS 2007, (I.N.V.E-709-07)

- Perdida por calentamiento en película delgada en movimiento , Norma INVIAS 2007, (I.N.V.E-709-07)
- Solubilidad en tricloroetileno, Norma INVIAS 2007, ( I.N.V.E- 713-07)

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación se emplearon dos materiales; lignina Alkali como material modificante y asfalto 80-100.

### 5.1.Lignina (álcali)

El agente modificador es resultante de un proceso industrial y sus propiedades son especificadas por SIGMA-ALDRICH laboratorios de químicos, como se puede ver en la tabla 6.

**Tabla 6.** Propiedades lignina – álcali.

#### PROPIEDADES

<b>Tensión superficial</b>	<b>43 mN / m (1% acuoso)</b>
<b>Impurezas</b>	<b>5% de humedad</b>
<b>Pérdida</b>	<b>13.4 wt. % pérdida en calefacción @ 316°C</b> <b>3.3 wt. % pérdida en calefacción @ 149°C</b> <b>5.7 wt. % pérdida en calefacción @ 204°C</b> <b>8.5 wt. % pérdida en calefacción @ 260°C</b>
<b>PH</b>	<b>6,5 (25 ° C, 5%, solución acuosa)</b>
<b>Transición de</b>	<b>punto de sinterización 188 ° C</b>

<b>temperatura</b>	
<b>Solubilidad</b>	<b>NaOH soluble 0.05% (caliente 5% acuoso)</b>  <b>MEK: parcialmente soluble</b>  <b>benceno: insoluble</b>  <b>dioxano: soluble</b>  <b>etilenglicol: soluble</b>  <b>hexano: insoluble</b>  <b>metanol: parcialmente soluble</b>
<b>Densidad</b>	<b>1,3 g / ml a 25 ° C</b>
<b>Densidad aparente</b>	<b>23 libras / pies cúbicos (suelto)</b>  <b>32 libras / pies cúbicos (embalado)</b>

**Fuente:** Recuperado de:

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/370959?lang=en&region=CO>

## 5.2.Asfalto

El asfalto utilizado corresponde a penetración de 80/100 provenientes de la planta de producción en Barrancabermeja de la empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda., Colombia. Estos asfaltos se caracterizaron en su estado original con los ensayos normalizados (ver tabla 2) presentando las siguientes propiedades.

**Tabla 7.** Caracterización del Asfalto en su estado original con los ensayos normalizados.

<b>PROPIEDAD</b>	<b>NORMA DE</b>	<b>ESPECIFICACION</b>	<b>REPORTE</b>
------------------	-----------------	-----------------------	----------------

	<b>REFERENCIA INV</b>			<b>DE CONTROL</b>
		<b>MIN</b>	<b>MAX</b>	
<b>Penetración @ 25°C, 100 g, 5s (mm/10)</b>	<b>E-706</b>	<b>80</b>	<b>100</b>	<b>90</b>
<b>Punto de ablandamiento</b>	<b>E-712</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>47</b>
<b>Índice de penetración</b>	<b>E-724</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>-0.50</b>
<b>Pérdida por calentamiento película delgada en mov @ 163 °C, 85 min (%)</b>	<b>E-720</b>		<b>1</b>	<b>0,48</b>
<b>Peso específico</b>	<b>E-707</b>			<b>1,004</b>
<b>Incremento en el punto de ablandamiento después de pérdida por calentamiento en película delgada, °C</b>	<b>E-712</b>		<b>9</b>	<b>6,8</b>

### *5.3. Modificación de asfalto*

Con la ayuda de una maquina común de moler, se tritura la lignina y se pasa por el tamiz de malla N°8 para la obtención de un material más fino (Figura 8) y apto para su mezcla con el asfalto, seguido de esto se deposita el material (Lignina) a utilizar en un recipiente conveniente para su adecuado secado en el horno a una temperatura de 25°C por un tiempo de 24 horas.

**Figura 8.** Muestras de lignina en el laboratorio de ingeniería Civil



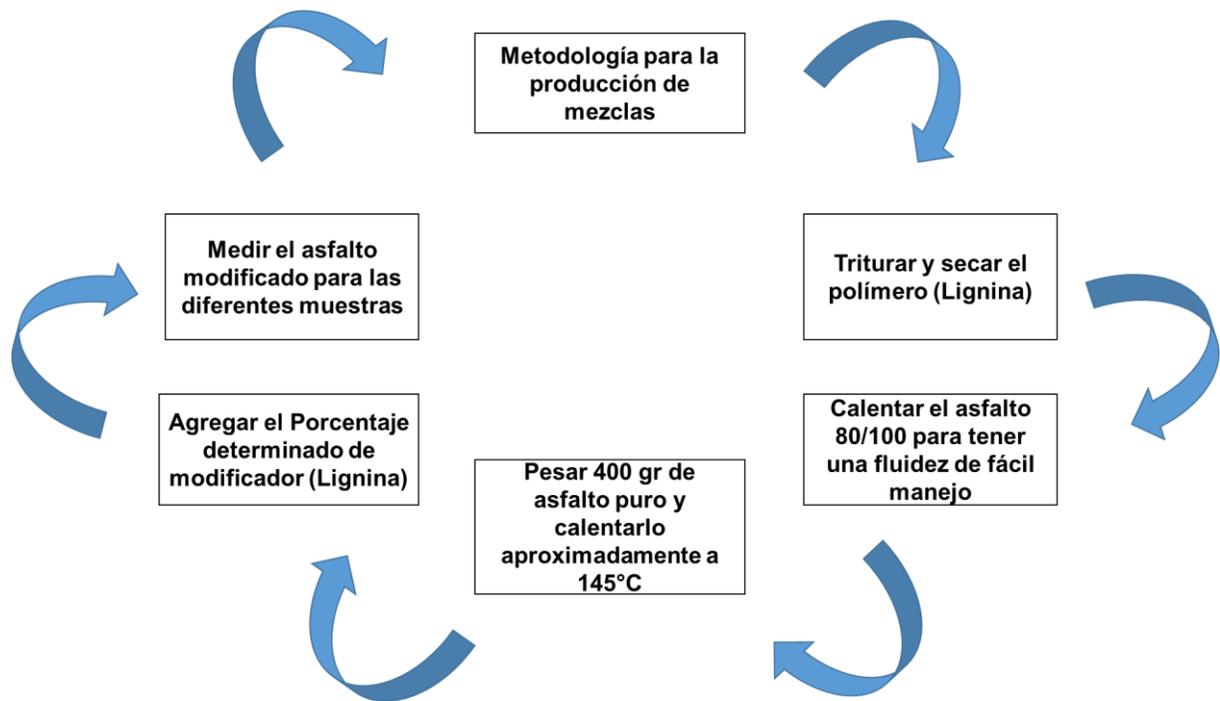
**Fuente:** (Universidad Piloto de Colombia, 2014)

La modificación de asfalto se llevó a cabo siguiendo la metodología presentada en la Figura 9, Las mezclas se preparan mediante el calentamiento del asfalto 80/100 puro

(aproximadamente a 135°C) agitándolo para evitar sobrecalentamientos locales, al tener un estado fluido se vierte con una espátula 400 gramos de asfalto a un molde, para agregar el porcentaje determinado del modificador las temperaturas de calentamiento (125° y 135° C), con una batidora marca UNIVERSAL ROYAL, IU-518, MOTOR 100W, 110V 60 HZ, a una velocidad máxima se mezclan las dos sustancias (asfalto 80-100 + Lignina álcali) por un tiempo de 30 minutos, esto para evitar la formación de burbujas de aire y obtener homogeneidad en cada una de las muestras.

Por cada porcentaje de asfalto modificado con lignina se hacen 5 muestras para la prueba de penetración y punto de ablandamiento. Los moldes de la prueba, para probar la penetración y punto de ablandamiento (anillo y bola), se obtuvieron por las normas especificadas para cada ensayo descrito en los artículos correspondientes.

**Figura 9.** Metodología para la producción de la modificación del asfalto.



**Fuente:** Propia.

Los porcentajes de polímero agregado (Lignina-álcali) usados fueron: 5 p/p %, 10 p/p %, 15 p/p % y 20 p/p % como se puede ver en la tabla 6. Estos porcentajes son utilizados para lograr obtener una comparación de las propiedades del asfalto en función del contenido de polímero.

**Tabla 8.** Porcentajes del agente modificador.

<b>Mezcla asfalto modificado con lignina</b>		
<b>Asfalto puro= 400 gr</b>		
N°	% Lignina	Lignina (gr)
1	5	20
2	10	40
3	15	60
4	20	80
Total lignina		480

*Fuente: Propia.*

## 6. ENSAYOS

Para la elaboración de los ensayos se utilizó la misma dosificación de asfalto (400 gr) y los porcentajes de lignina ya descritos en la tabla 7.

Ensayos:

- Penetración de los materiales asfálticos.
- Punto de ablandamiento (Anillo y bola).
- Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada (RTFO)

### ***6.1. Penetración de los materiales asfálticos***

La prueba de penetración es normalizada por la **I.N.V. E – 706 – 07**

Este ensayo describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos, mediante la penetración de una aguja de dimensiones normalizadas, en decimas de mm, sometido a una carga predeterminada, durante un tiempo y temperatura.

Para la realización de este ensayo se calentó el asfalto 80/100 hasta una temperatura adecuada con el fin de tener un material de fácil manejo y poder obtener 400 gr de asfalto seguido de esto se realiza la mezcla con el polímero (Lignina) como fue descrito en párrafos anteriores.

Después de tener la mezcla (Asfalto + Lignina), se inicia con el proceso de llenado en moldes cilíndricos de dimensiones y especificaciones definidas en la norma, la mezcla durante este proceso se agita el recipiente direccionado hacia abajo para facilitar el asentamiento del asfalto y evitar formación de grumos o burbujas en la mezcla.

A continuación los moldes se sumergen por una hora en el baño de agua (Modelo BW-106) a una temperatura de 25°C. Se toman tres lecturas de penetración por cada molde siguiendo las indicaciones para la realización de este ensayo.

Se utilizan 25°C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga total de 100 (*Penetrómetro automático*).

**Figura 10.** Ensayo de penetración del asfalto.



**Fuente:** Propia.

### ***6.2. Punto de ablandamiento de ensayo (anillo y bola)***

La prueba de punto de ablandamiento es normalizada por la I.N.V. **E – 712 – 07**

Este método cubre la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30° a 157° C (86° a 315° F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30° a 80° C), la cual debe estar a una tasa de crecimiento constante de 5 grados por minuto.

Para la realización de este ensayo la mezcla (asfalto + Lignina), se vierte en los anillos de bronce, que con anterioridad se han calentado a la misma temperatura del asfalto. Estos anillos se sobreponen en una base lubricada con glicerina que hace de agente aislante para evitar la adherencia del asfalto.

El baño de agua se prepara con una temperatura de iniciación de  $5 \pm 1^\circ\text{C}$ , después de enrazar las muestras se ubican dentro del baño de agua dejándolas por 15 minutos como

periodo de enfriamiento, para continuar con el procedimiento del ensayo de punto de ablandamiento.

**Figura 11.** Ensayo punto de ablandamiento (Anillo y bola)



Fuente: Propia.

### ***6.3. Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO)***

La prueba de Horno de lámina asfáltica delgada (RTFO) es normalizada por la I.N.V.E-721-07

Este procedimiento indica el cambio aproximado que se presentan en las propiedades del asfalto o mezcla asfáltica, esto se da durante el proceso de mezclado en caliente a temperaturas aproximadamente de 150°C (300°F), mediante la medición de penetración, viscosidad o ductilidad. Con el proceso anterior el asfalto o la mezcla de asfalto se aproxima a la condición del asfalto cuando es incorporado al pavimento.

Para la realización de este ensayo se inicia con el peso de los recipientes sin la mezcla (asfalto + Lignina) y con la mezcla seguido de la nivelación del horno, se ponen rápidamente los recipientes con la mezcla de asfalto sobre la repisa circular a  $163 \pm 1^\circ\text{C}$ , y después se da inicio a la rotación del estante, al finalizar con la rotación se retiran los recipientes y se dejan en reposo para después tomar el peso, se toman las muestras para dar inicio a las pruebas de penetración y punto de ablandamiento (anillo y bola).

**Figura 12.** Modificación de Asfalto 80/100 con Polímero (Lignina).



**Fuente:** Propia.

**Figura 13.** Muestras (Asfalto + Polímero) listas para realizar ensayo de RTFO.



**Fuente:** Propia.

**Figura 14.** Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO).



**Fuente:** Propia.

**Figura 15.**Muestras después de ensayo al horno de lámina asfáltica delgada.



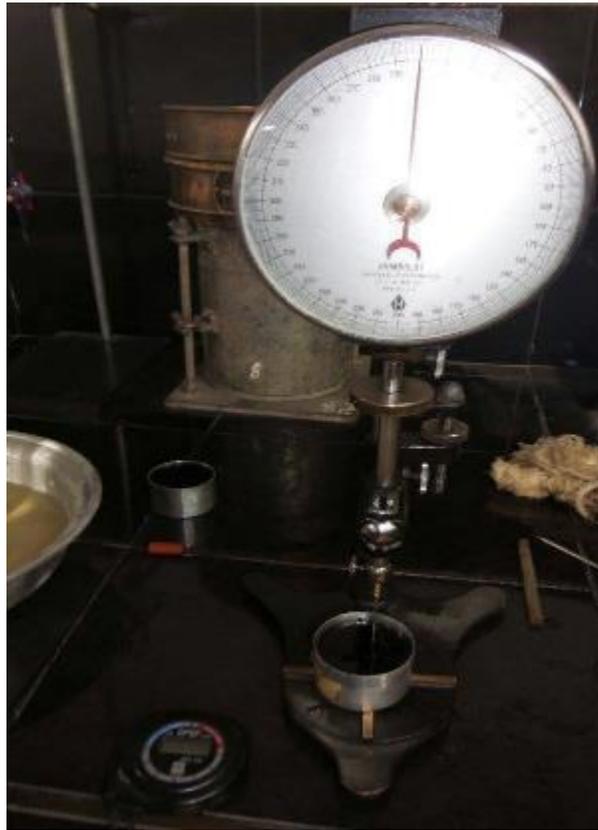
**Fuente:** Propia.

**Figura 16.** Muestras de envejecimiento para la realización de ensayos de penetración y punto de ablandamiento (anillo y bola).



**Fuente:** Propia.

**Figura 17.** Ensayo de penetración después de envejecimiento (RTFO).



**Fuente:** propia.

**Figura 18.**Ensayo de punto de ablandamiento (anillo y bola).



**Fuente:** Propia.

## **7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El objetivo principal de este proyecto, está basado en mejorar el comportamiento oxidativo del asfalto cuando es expuesto a la atmosfera así como reducir el aumento de la rigidez, la pérdida de ductilidad, y el agrietamiento del producto final, causado por la oxidación del asfalto, para ello se busca la obtención de mezclas con un aumento en la resistencia a las condiciones de conducción, el aumento de impermeabilidad al agua y mezclas menos sensibles a las variaciones de temperatura, cuando se realice la comparación con asfalto sin modificar.

Las pruebas de penetración y punto de ablandamiento (anillo y bola) que ya han sido utilizadas en la producción de asfalto modificados (Lu y Isacsson, 1999) son importantes en esta investigación como un punto de comparación entre los 6 porcentajes de asfalto modificado con Lignina.

Se realiza la debida caracterización física del asfalto convencional y modificado con 5%,10%,15% y 20% de lignina (ensayos de penetración, punto de ablandamiento y RTFO).

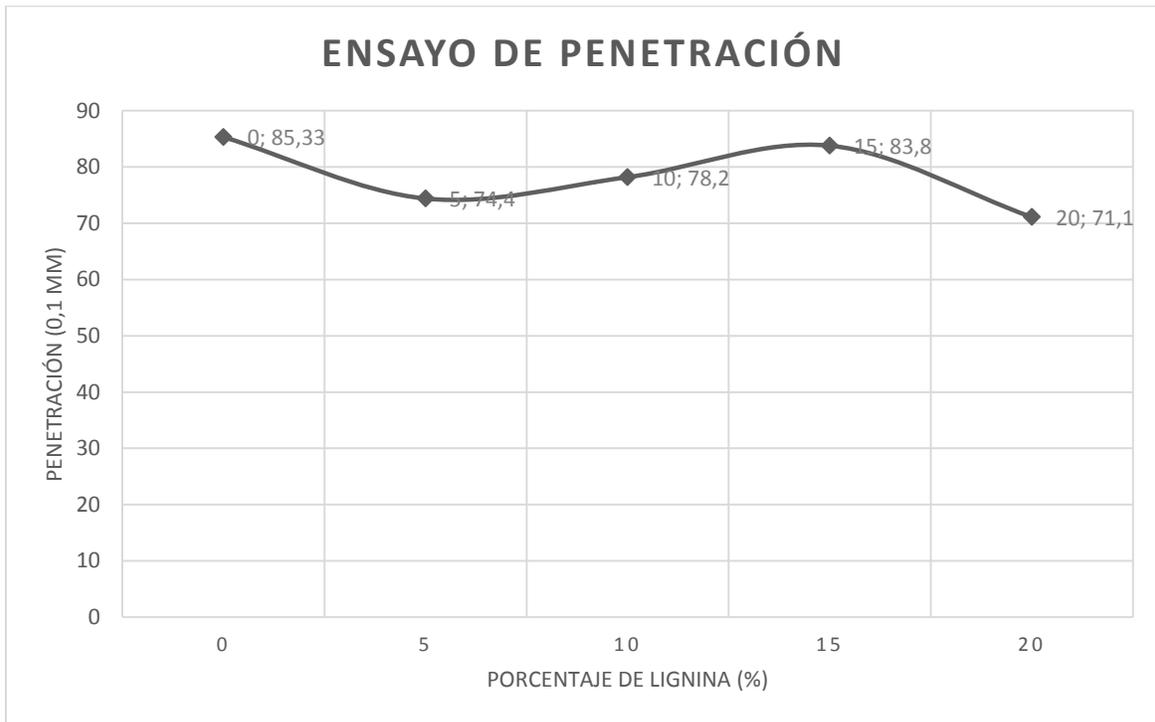
### ***7.1. Ensayo de penetración antes del ensayo de RTFO***

Esta prueba (Ensayo de penetración se usan como una medida de consistencia. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas. Se considera esencial para la clasificación y la comprensión de las propiedades de los asfaltos.

Los resultados de esta prueba como lo muestra la figura 19, se dan a una distancia de penetración universal (decimas de milímetro, dmm) en la que la aguja normalizada estándar penetra verticalmente la mezcla en las condiciones definidas de carga a una temperatura de 25°C, el error de medición según la norma utilizada es de 0,5 dmm. En este ensayo se obtiene una curva la cual como se puede observar no es uniforme ya que los puntos de penetración varían según el porcentaje de modificación; para el asfalto convencional se obtiene un valor de 0,8533 mm al dar inicio con la modificación a un 5% de lignina la penetración aumenta a un 0,744 mm con el 10% disminuye a un 0,782 mm al adicionar un 15% de lignina vuelve a disminuir la penetración esta vez con 0,838 mm y aumenta considerablemente cuando se agrega el 20 % de modificante al tener una penetración de 0,717 mm. Según lo obtenido se presenta que a un porcentaje del 15 p/p de lignina se alcanza una resistencia mayor a la penetración lo contrario a esto al aumentarle el porcentaje de lignina (por encima del 15 p/p) desciende la resistencia a la penetración, aun

así se observa que el asfalto de 80/100 presenta resultados similares al asfalto modificado con 15% de lignina.

**Figura 19.** Resultados de ensayo de penetración.



**Fuente:** Propia.

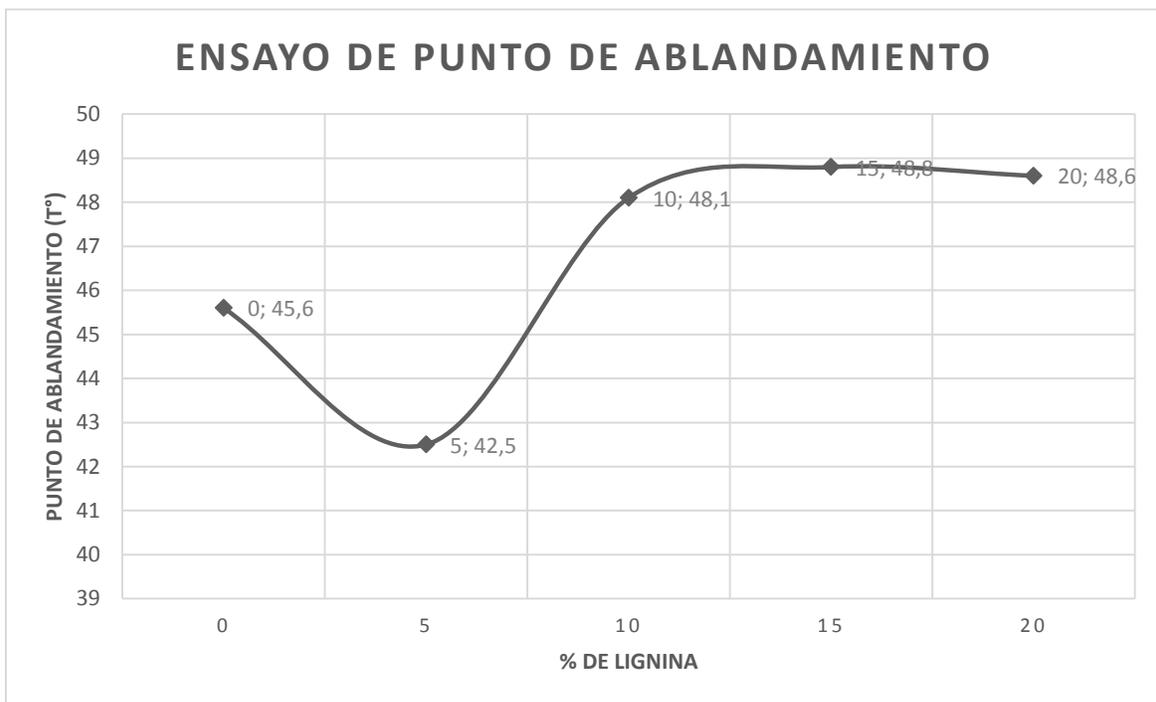
### **7.2. Ensayo de punto de ablandamiento (Anillo y bola)**

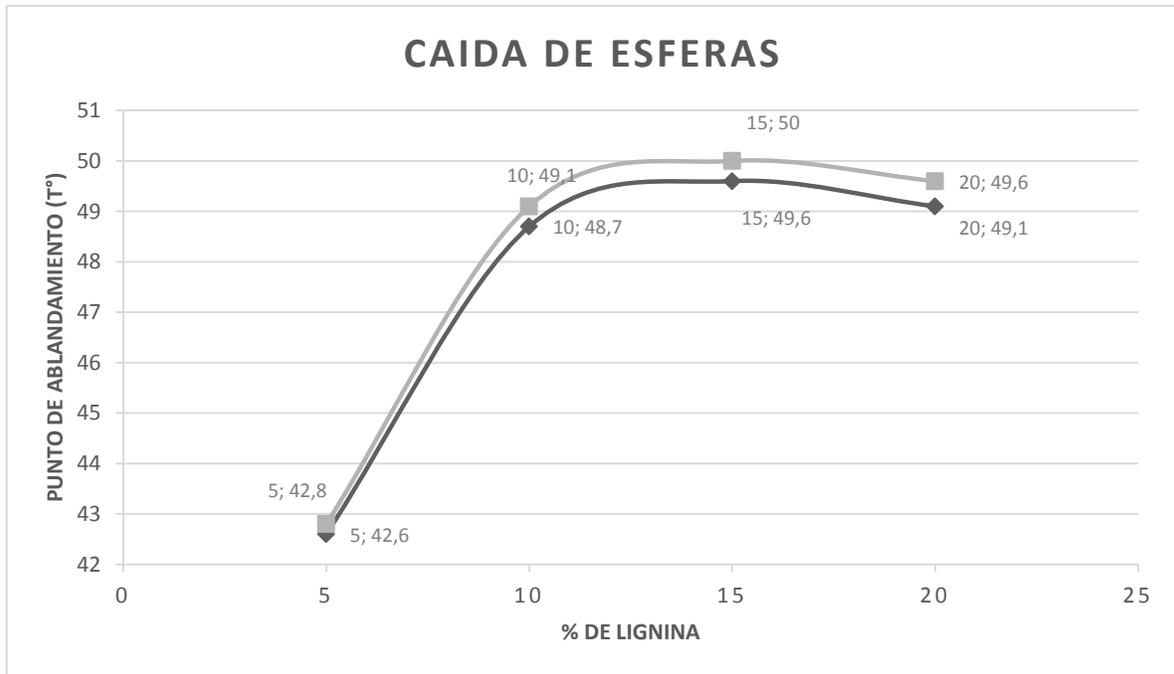
El ensayo de anillo y bola está destinado a medir los cambios en la consistencia de la muestra como una función de la temperatura, puede ser correlacionada con la dureza del material. Los resultados de la Figura 20 muestran la relación entre los puntos de ablandamiento de las mezclas utilizando los diferentes porcentajes del polímero. Donde se indica que al agregarle un 5 p/p de lignina se disminuye el punto de ablandamiento en un

6.80 p/p con respecto al asfalto convencional y aumenta en un 5.48 p/p con respecto al porcentaje de modificante del 10 p/p lo que significa que hay un incremento de temperatura para que el asfalto pueda fluir.

El incremento más alto que se presenta en el punto de ablandamiento se obtuvo con el modificante del 15 p/p de lignina el cual aumenta en un 7.02 p/p con respecto al punto de ablandamiento del asfalto en estado original.

**Figura 20.** Resultados de ensayo de punto de ablandamiento



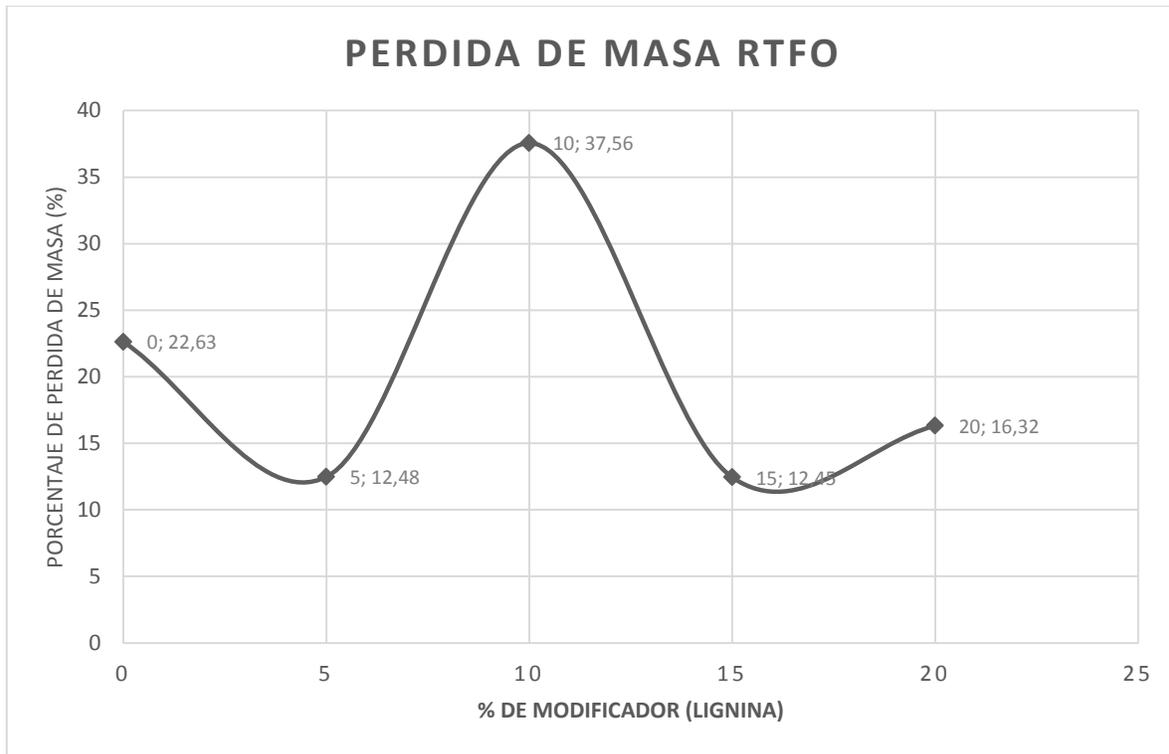


**Fuente:** Propia.

### ***7.3. Ensayo al Horno de Lámina Asfáltica Delgada (RTFO)***

Se conoce que el ensayo de envejecimiento a corto plazo es la representación de la oxidación del asfalto en proceso de construcción, sin tener en cuenta el estado de envejecimiento durante su etapa de servicio (PAV).

**Figura 21.** Resultados de Pérdida de masa ensayo de RTFO.

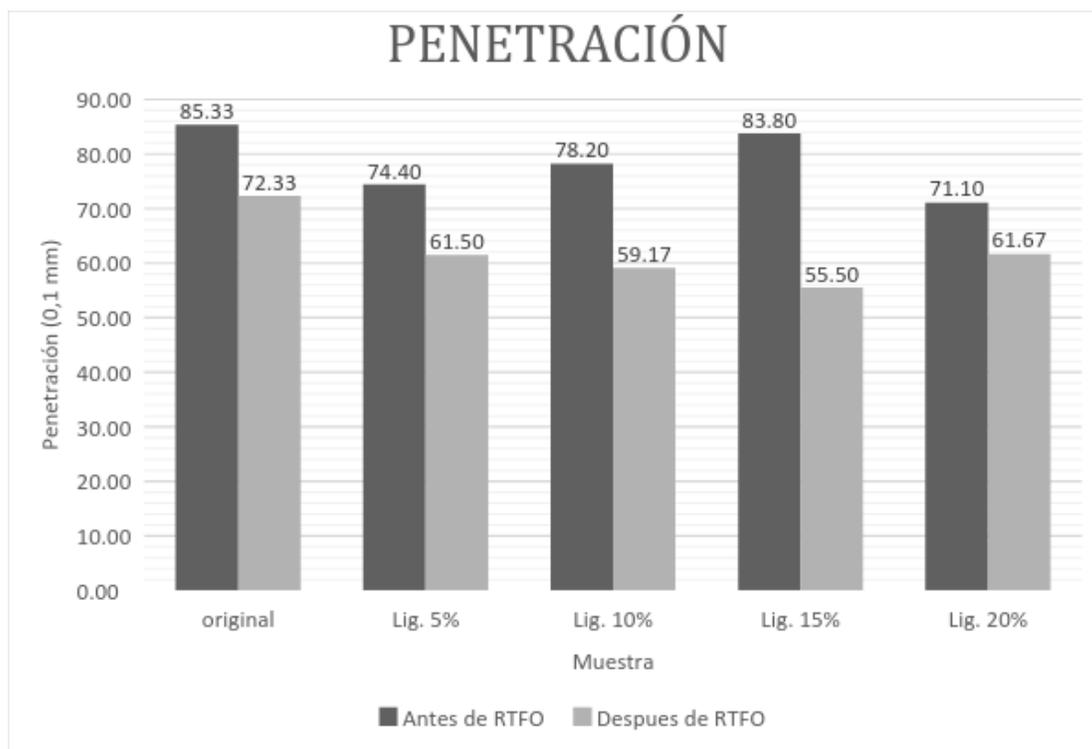


**Fuente:** Propia.

Con el ensayo de RTFO se obtiene la pérdida de masa del asfalto simulada en la etapa de colocación Figura 21. Con el asfalto no modificado se obtiene una pérdida de masa de 22,63 p/p la cual disminuye a un porcentaje de 12,48 p/p con el 5 p/p de modificador y aumenta a 37,56 p/p con el 10% de lignina, para el 15 p/p disminuye nuevamente esta vez a 12,45 p/p y aumenta a 16,32 con el porcentaje de lignina del 20 p/p.

En general con 10 p/p de modificador la pérdida de masa es de 37,56 porciento lo que indica una pérdida de masa mucho mayor al compararla con el asfalto convencional. Por el contrario, con el porcentaje modificador del 15 p/p la pérdida de masa obtenida es menor frente al asfalto sin modificar.

**Figura 22.** Resultados de ensayo de penetración antes y después de RTFO.



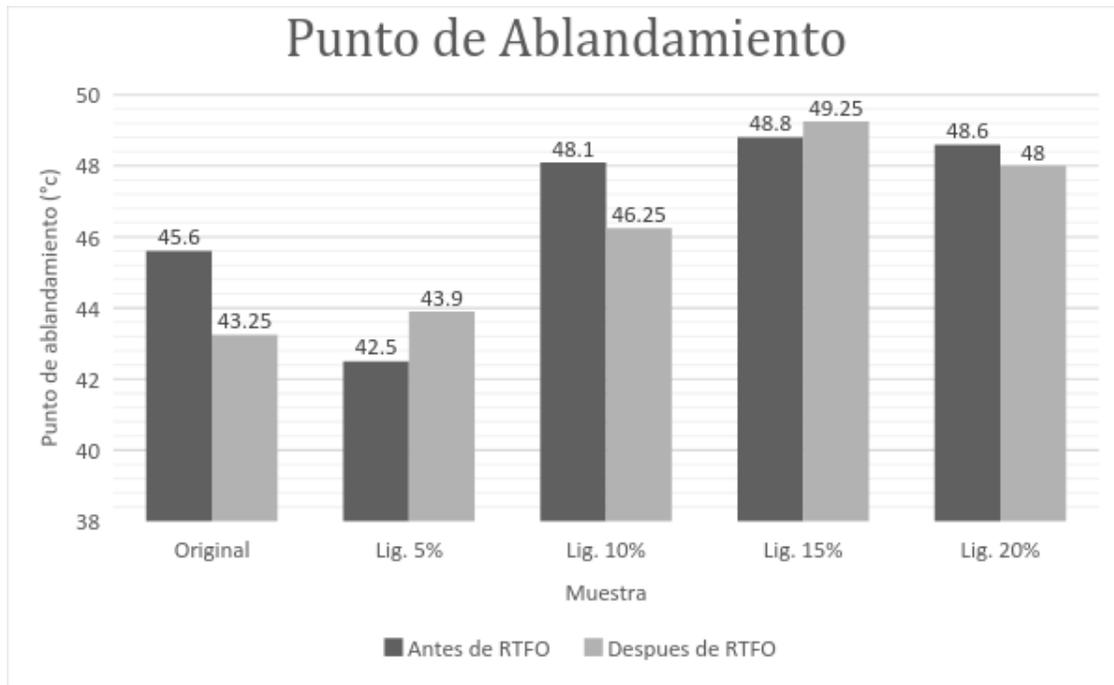
**Fuente:** Propia.

Después de tener resultados de un asfalto convencional y modificado con lignina, se presenta como afecta la oxidación al asfalto en su estado original y al modificado con lignina a través del ensayo RTFO.

Como se observa en la Figura 22 el cemento asfáltico 80/100 al modificarse con lignina en porcentajes de 5% al 15% p/p, incrementa su resistencia a la penetración disminuyendo valores medidos en un 23,2%. Al adicionar 20% de lignina esta resistencia vuelve a disminuir, por lo que el valor de la penetración aumenta.

De acuerdo a estos resultados, se observa que la adición de lignina rigidiza el material modificado en un promedio de 17,8%, valor que no sobrepasa los límites que inician el fisuramiento.

**Figura 23.** Resultados de ensayo de punto de ablandamiento antes y después de RTFO.



**Fuente:** Propia.

En la Figura 23 Se presenta el ensayo de punto de ablandamiento antes y después del RTFO mostrando su comportamiento cuando está en estado original, y cuando es modificado con lignina al 5p/p, 10p/p, 15 p/p y 20 p/p.

Se evidencia que el asfalto en estado original al presentar oxidación por el ensayo de RTFO disminuye el punto de ablandamiento en un 5,15% con respecto al asfalto que no presenta oxidación, sin embargo con el 5p/p de modificante se obtiene un aumento del 3.29 p/p en relación al mismo asfalto modificado antes del RTFO. Para la modificación del 10

p/p el punto de ablandamiento disminuye 3.85 p/p con respecto al asfalto antes del ensayo de RTFO. Para el modificante del 15% el punto de ablandamiento después del ensayo de RTFO aumenta 1%; con el 20% de modificante el punto vuelve a disminuir frente al asfalto sin oxidar.

El punto de ablandamiento más alto del asfalto después del ensayo de RTFO es el del modificante del 15%, el cual al compararlo con el asfalto original sin oxidación incrementa en un 3.65 °C y con respecto al asfalto convencional con oxidación su aumento es de 3°C. De acuerdo a esto, la modificación con lignina no sobrepasa los límites máximos de incremento por lo que posibilita su uso haciéndolo ideal para climas cálidos.

## 8. CONCLUSIONES

- Este trabajo informativo e investigativo permite conocer un elemento poco estudiado en la industria. Así mismo, la teoría relacionada a la modificación de asfalto 80-100 con lignina, se presenta como un medio base para la transformación y posterior profundización en el tema de envejecimiento a corto plazo.
- De acuerdo a la investigación y los ensayos realizados, se observó que la adición de lignina rigidiza el material en estado original en un promedio de 17,8%, porcentaje que no sobrepasa los límites que provocan fisuramiento, ondulaciones, abultamientos, entre otras patologías.
- El excesivo porcentaje de lignina en la mezcla puede llegar a convertirse en un problema. Se encontró que porcentajes alrededor del 20% de lignina, rigidiza demasiado el material lo cual perjudica las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica, facilitando la fisuración térmica particularmente en climas fríos.
- El porcentaje óptimo de sustitución es de 15 % de lignina ya que en comparación con el asfalto sin modificar y con las demás adiciones, se obtuvo un asfalto con mejor comportamiento reológico lo cual se reflejó en el aumento de su consistencia en un 33.77% respecto al asfalto convencional y en su poca susceptibilidad térmica con un punto de ablandamiento de 48,8°C. Así mismo, con este porcentaje de modificación se puede utilizar una temperatura de 135°C para los procesos de compactación y mezclado.
- Como este trabajo se enfocó en determinar el porcentaje óptimo de lignina que mejorara el comportamiento reológico del asfalto, es necesario continuar la investigación con la ejecución de ensayos mecánicos sobre mezclas modificadas

con 15% de lignina para determinar el desempeño de dicha mezcla en una estructura multicapa.

- Se recomienda realizar el ensayo PAV (Pressure Aging Vessel), con muestra del asfalto 80-100 modificado al 15% de lignina para registrar su comportamiento al envejecimiento acelerado representando un estado de servicio por varios años.
- El uso de lignina en la modificación de asfaltos provoca un beneficio no solo a las características técnicas del material sino a todas las industrias que por sus actividades económicas generan lignina como desperdicio, ya que sugiere un nuevo uso y permite reutilizar este desecho.

## 9. ANEXOS

**Tabla 9.** Resultados de ensayo de RTFO

CONVENCIONAL					
PRUEBA	Peso del recipiente + muestra	Peso del recipiente + muestra	Peso recipiente (Pr) g	Pérdida de peso g	% Pérdida de peso
1	199,58	199,47	164,07	0,11	0,3097719
2	192,22	192,14	159,81	0,08	0,2468374
3	195,99	195,91	161,06	0,08	0,22902949
4	197,02	196,95	162,08	0,07	0,20034345
5	198,32	198,24	162,83	0,08	0,22541561
6	196,73	196,66	161,8	0,07	0,2004008
7	196,8	196,73	162,21	0,07	0,20237063
8	197,46	197,39	161,72	0,07	0,19585898
Promedio	196,765	196,68625	161,9475	0,07875	0,22625353

**Fuente:** Propia.

**Tabla 10.** Resultados de ensayo de RTFO 5%.

MODIFICADO AL 5% DE LIGNINA					
PRUEBA	Peso del recipiente + muestra	Peso del recipiente + muestra	Peso recipiente (Pr) g	Pérdida de peso g	% Pérdida de peso
1	199,12	199,08	164,07	0,04	0,11412268
2	194,87	194,82	159,81	0,05	0,14261266
3	196,08	196,04	161,06	0,04	0,11422045
4	197,12	197,07	162,08	0,05	0,14269406
5	197,95	197,91	162,83	0,04	0,11389522
6	196,79	196,74	161,8	0,05	0,14289797
7	197,24	197,2	162,21	0,04	0,11418784
8	196,77	196,73	161,72	0,04	0,11412268
Promedio	196,9925	196,94875	161,9475	0,04375	0,1248442

Fuente: Propia.

**Tabla 11.** Resultados de ensayo de RTFO 10%.

MODIFICADO AL 10% DE LIGNINA					
PRUEBA	Peso del recipiente + muestra	Peso del recipiente + muestra	Peso recipiente (Pr) g	Pérdida de peso g	% Pérdida de peso
1	199,03	199	164,07	0,03	0,08581236
2	194,66	194,63	159,81	0,03	0,08608321
3	196,32	196,28	161,06	0,04	0,11344299
4	196,95	196,91	162,08	0,04	0,11471179
5	197,9	197,87	162,83	0,03	0,0855432
6	196,89	196,86	161,8	0,03	0,08549444
7	167,32	167,2	162,21	0,12	2,34833659
8	196,8	196,77	161,72	0,03	0,08551881
Promedio	193,23375	193,19	161,9475	0,04375	0,37561793

Fuente: Propia.

**Tabla 12.** Resultados de RTFO 15%

MODIFICADO AL 15% DE LIGNINA					
PRUEBA	Peso del recipiente + muestra inicial (Po) g	Peso del recipiente + muestra final (Pf) g	Peso recipiente (Pr) g	Pérdida de peso g	% Pérdida de peso
1	199,36	199,32	164,07	0,04	0,11334656
2	194,83	194,78	159,81	0,05	0,14277556
3	196,26	196,21	161,06	0,05	0,14204545
4	197,23	197,19	162,08	0,04	0,11379801
5	197,95	197,91	162,83	0,04	0,11389522
6	196,89	196,84	161,8	0,05	0,14249074
7	197,33	197,29	162,21	0,04	0,11389522
8	196,78	196,74	161,72	0,04	0,11409013
Promedio	197,07875	197,035	161,9475	0,04375	0,12454211

**Fuente:** Propia.

**Tabla 13.** Resultados de RTFO 20%.

MODIFICADO AL 20% DE LIGNINA					
PRUEBA	Peso del recipiente + muestra inicial (Po) g	Peso del recipiente + muestra final (Pf) g	Peso recipiente (Pr) g	Pérdida de peso	% Pérdida de peso
1	169,13	169,1	164,07	0,03	0,59288538
2	194,82	194,78	159,81	0,04	0,11425307
3	196,1	196,06	161,06	0,04	0,11415525
4	197,15	197,12	162,08	0,03	0,0855432
5	197,88	197,85	162,83	0,03	0,08559201
6	196,92	196,88	161,8	0,04	0,11389522
7	197,24	197,21	162,21	0,03	0,08564088
8	196,74	196,7	161,72	0,04	0,11422045
Promedio	193,2475	193,2125	161,9475	0,035	0,16327318

**Fuente:** Propia.

## REFERENCIAS

- Aguilar, J.P. Salazar, J. Villegas, R.E. Leiva, F. Loria, L.G. Navas, A. (2013) Uso de materiales de desecho como modificantes de asfalto en costa rica.
- Orozco, G & Murillo, J. (2011). Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga, Colombia.
- (Akbarzadeh, H., Hammami, A., Kharrat, A. & Zhang D.,Allenson. S., Creek. J., Kabir. S., Jamal. A., Marshall. A., Rodgers. R., Mullins. O. & Solbakken. T. (2006). Los asfaltenos: Problematicos pero ricos en potencial.
- Araya, F., Gonzales, A., Delgadillo, R., Wahr, C., Garcia, G., Zuñiga, R. (2012). Caracterizacion reologica avanzada de betunes tradicionales y modificados utilizados actualmente en Chile. Revista ingenieria de construccion. 27 (3).
- Bedia, Rosas , Marquez & Rodriguez,( 2009) Preparation and Characterization of Carbon Based Acid Catalysts for the Dehydration of 2-Propanol”.  
doi:10.1016/j.carbon.2008.10.008
- Botasso, G., Rebollo, O., Cuattrocchio, A & Soengas, C.( 2008). Utilización de caucho de neumáticos en mezcla asfáltica densa en obras de infraestructura. Infraestructura Vial. 20.
- Cárdenas, J., Fonseca, E.( 2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. Scielo. 12.
- Chávez, L.E., Hernández, C., (2008), Estado del Arte y Perspectiva del Envejecimiento de los Pavimentos Asfálticos.

- Chávez, M. & Domine, M. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en ciencias e Ingeniería*. 4(4), 15-16.
- Elizondro, F., Salazar, J., Villegas, E. (2010). Caracterización de Asfaltos Modificados con diferentes aditivos. *Ingeniería y construcción*. 20 (1 y 2).
- Fernández W. D., Rondón H., & Reyes F., (2013), A review of asphalt and asphalt mixture aging.
- Fernández W. D., Rondón H., & Reyes F., (2013), A review of asphalt and asphalt mixture aging.
- Figueroa, A.S. Reyes, F.A. Hernández, D. Jiménez. Bohórquez N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Analysing polystyrene-modified asphalt and its incidence in a heatdense asphalt mixture*. *Revista ingeniería e investigación* 27 (3).
- Gadioli, R., Morais, J.A., Waldman, W.R., & De Paoli, M-A., (2014), The role of lignin in polypropylene composites with semi-bleached cellulose fibers: Mechanical properties and its activity as antioxidant.
- Garzón, E. & Cárdenas, A. (2013). Variación de temperatura de los componentes de una mezcla densa en caliente tipo 3 con cemento asfáltico 80-100. Universidad Católica de Colombia. Colombia, Bogotá.
- Grupo técnico-convenio 587 de 2003, (2006). Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras, Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Colombia, Bogotá D.C.
- Herrera-Nájera, R. García, G. Xicotécatl, H & Medina, L. (2011). Efecto de la composición del bloque elastomérico de sbs y sebes en las propiedades reológicas de asfaltos modificados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 11(1), 133-144.
- Martínez, A., Martín, N., Gómez. A. & Páez. A. (2008). *Betunes Asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente*. España, Madrid.

- Pan, T. (2013). Coniferyl-alcohol lignin as a bio-antioxidant for petroleum asphalt: A quantum chemistry based atomistic study. *Science direct*. 113. 454-466.
- Paredes, L.A. Reyes, O.J. Camacho, J.M. (2013). Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada. *Revista Tecnura*. 18 (41), 103 – 119.
- Pérez, M.A. López, J.A. (2012). Estado del conocimiento de asfaltos modificados en Colombia y su influencia en la pavimentación. state of knowledge of asphalt modified in colombia and its influence on the paving. *Revista virtual de los programas de ingeniería*. 4(6), 89-105.
- Puello, J.P. Afanasjeva, N. Cifuentes, M.A. (2013). Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido. *Rev. Ion*. 26(1), 73-84.
- Puiggené, J. Torres-Llosa, J. Takamura. DR. (2013). Efectos del empleo de lates de SBR en la modificación de cemento asfáltico y de emulsiones bituminosa de uso vial. BASF corporation
  
- Reyes, O. J., Millán, S, (2009), Influence of Temperature, Granulation, and Water in the Cohesion of Asphalt Mixtures.
- Romero, C.M & Gómez A. (2002). Propiedades físicas y químicas de asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfáltenos. *Acad. Colomb.Cienc*.26(98).
- Rondón, H., Moreno, L., Rodríguez, D., Lee, J. (2009). Experiencias sobre el estudio de materiales alternativos para modificar asfaltos. *Revista ingeniería-Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. 14(2).
- Rondón, H., Reyes, F & Ojeda, B. (2008). Comportamiento de una mezcla densa de asfalto en caliente modificada con desecho de poli cloruro de vinilo (PVC). *SciELO, ciencia e ingeniería Neogranadina*. 18(2).

- Rondón, H.A. Reyes, F, A. Figueroa, A.S. Rodríguez, E. Real, C.M & Montealegre, T.A. (2007). Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia. *Infraestructura Vial*. (19).
- Salcedo, C. (2008). Experiencia de Modificación de cemento asfáltico con polímeros SBS en obra. Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Salinas, P. (2009). Aplicación de micro pavimento usando asfalto modificado con polímero en la vía sullana-Aguas verdes. Universidad Piura. Piura, Perú.
- Solvey, (2014). Los procesos sintéticos hacia la vainillina. *food ingredients Brasil, Revista* N° 31 - 2014.
- Suarez, J. (2005). Caracterización de asfaltos con tecnología Superpave y análisis de ahuellamiento. Universidad de los Andes., Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Subiaga, A. Cuattrocchio, A. (1990). Partes fundamentales y reologicas de asfalto para uso Vial. Argentina, Buenos Aires.
- Vacca, H. A., Leon, M.P., & Ruiz, D. M., (2012), Evaluation of de rolling thin film oven aging of the 80-100 asphalt cement in the static and dynamic behavior of asphalt mixtures.
- Vargas, X., Reyes F.A., (2010), El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e investigación* .30 ( 3), 27-44.
- Yung, Y. (2013). Caracterización, diseño y verificación de una mezcla drenante en caliente modificada con grano de llanta y fibra kaltex. Maestría en ingeniería-Infraestructura y sistemas de transporte. Universidad Nacional, Medellín, Colombia.
- Aragão, P., Alves da Frota, C., Bertoldo, R.A., & Freitas da Cunha, T.M., (2011), Estudo de misturas areia-asfalto com areia de residuo de construção e demolição, fibra do açaí e polímeros para a cidade de manaus, am
- Bell C. Aging of Asphalt-Aggregate Systems, 1a edition, Transportation Research Bureau Press. EUA, 1989, p. 120.

- Botaro, V.R., Rodriguez, S.Castro., Rodriguez, F., & Cerantola,A.E., (2006), Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, residuos de pneu e lignina organossolve.
- Chávez, L.E., Hernández, C.,& Manzano, A. (2011), Modelación del envejecimiento de los pavimentos asfálticos con la metodología de la superficie de respuesta.
- Real Academia Española. (2015). Diccionario de la lengua española (22.aed.). Consultado en <http://www.rae.es/>
- Reyes, F.A. Guáqueta, C. Porras, L.M. Rondón, H.A. (2013).Comportamiento de un cemento asfáltico modificado con un desecho de PVC. Revista Ingenierías Universidad de Medellín. 12(22), 75-84.
- Nour-Eddine El Mansouri, (2006). Despolimerización de lignina para sus aprovechamientos en adhesivos para producir tableros de partículas. PhD Tesis. Universidad Rovira y Virgilio, Tarragona.
- Sifontes & Domine,( 2013). Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Medina, Fernández, Aguilar & Garza, (2011).

