



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE COLOMBIA

# **EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO CON ACEITES LUBRICANTES USADOS**

**Diana Constanza Cárdenas Villamizar**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Maestría en Ingeniería Ambiental  
Manizales Caldas, Colombia

2017

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS  
ELABORADAS CON ASFALTO MODIFICADO  
CON ACEITES LUBRICANTES USADOS**

**Diana Constanza Cárdenas Villamizar**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director: M.Sc. Luis Ricardo Vásquez Varela

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería y arquitectura, Maestría en Ingeniería Ambiental  
Manizales Caldas, Colombia

2017

## RESUMEN

En este estudio se evaluó la alternativa de aprovechar el aceite usado de motor sin pretratamiento como modificador de asfaltos para la fabricación de mezclas asfálticas en Colombia.

Inicialmente se generaron las curvas reológicas para 9 tipos de asfaltos modificados, para lo cual se prepararon soluciones de asfalto-aceite usado con composiciones que variaron desde 0% al 6% de aceite usado en peso; los ensayos de viscosidad se ejecutaron siguiendo la metodología INV E-714-07.

Posteriormente se realizaron pruebas Marshall para las soluciones asfalto-aceite usado al 0%, 1.5%, 2%, 2.5% y 6% en peso, con el fin de establecer el contenido máximo de aceite usado que se puede adicionar en la mezcla que cumpla con las exigencias de la norma de **mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) artículo 450 – 13** del INVIAS; encontrando que para los agregados y el asfalto 60/70 utilizados el máximo valor que se le puede adicionar de aceite es del 2%, pues a concentraciones superiores el asfalto modificado pierde sus propiedades ligantes. Se deben realizar pruebas adicionales en laboratorio y campo para evaluar el comportamiento de estas mezclas a largo plazo.

**Palabras clave:** Viscosidad, aceite usado, asfalto, mezcla asfáltica caliente, mezcla asfáltica tibia, pruebas Marshall.

## EVALUATION OF THE MECHANICAL RESISTANCE OF ASPHALTIC MIXTURES MADE WITH ASPHALT MODIFIED WITH USED LUBRICANT OILS

### **Abstract**

The purpose of this study was the evaluation of the alternative of utilization of used motor oils without pretreatment, as a modifier of the asphalts used in the manufacture of asphalt mixtures in Colombia. The tests consisted of the preparation of 10 solutions of asphalt-waste oil, with compositions ranging from 0% to 6% of waste oil by weight, in order to generate the different rheological curves for modified asphalts following INV E-714-07 methodology for viscosity.

Subsequently, Marshall tests were performed for Asphalt-Waste Oil solutions at 0%, 1.5%, 2%, 2.5% and 6% by weight, in order to establish the maximum content of waste oil that can be added in **the mixture that meets the requirements of the continuous gradation (asphalt concrete) asphalt mixtures standard Article 450-13** of Invias. Finding that for the type of aggregates used and the type 60/70 asphalt the maximum value that can be added the waste oil is 2%. When a concentration above the modified asphalt loses its binding properties. Further testing, both in the laboratory and in the field, is required to evaluate the performance of these mixtures in the long term

**Keywords:** Viscosity, waste oil, asphalt, hot mix asphalt, warm mix asphalt, Marshall test.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
RESUMEN .....	III
Lista de Figuras.....	IV
Lista de Tablas.....	VI
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	VII
Sistema de Unidades .....	VII
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
OBJETIVOS.....	6
1. ANTECEDENTES .....	7
2. ASFALTO Y MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	15
2.1 Propiedades del asfalto.....	15
2.1.1 Composición del asfalto.....	15
2.1.2 Propiedades físicas del asfalto.....	17
2.1.3 Propiedades reológicas del asfalto .....	19
2.2 Características del asfalto en Colombia.....	22
2.3 Producción de asfaltos en Colombia.....	23
2.4 Mezclas asfálticas.....	24
2.4.1 Propiedades de las mezclas asfálticas.....	25
2.4.2 Clasificación de las mezclas asfálticas .....	26
2.4.2.1 Fracción de agregado pétreo usado.....	26
2.4.2.2 Proporción de vacíos en la mezcla.....	26
2.4.2.3 Tamaño máximo de agregado pétreo.....	27
2.4.2.4 Estructura del agregado pétreo).....	27

2.4.2.5	Granulometría.....	27
2.4.2.6	Por tipo de granulometría .....	28
2.4.2.7	Por temperatura.....	28
3	ACEITES USADOS.....	31
3.1	Definición de aceite usado .....	31
3.2	Historia del arte de la gestión de aceites usados en Colombia.....	32
3.3	Propiedades y clasificación de los aceites usados en Colombia .....	34
3.3.1	Composición de los aceites usados.....	34
3.3.2	Elementos presentes en los aceites usados.....	34
3.4	Clasificación del aceite usado de acuerdo con su procedencia .....	35
3.5	Clasificación de los aceites usados de acuerdo al decreto 4741 de 2005 ..	36
3.6	Clasificación de los aceites usados de acuerdo al mercado en Colombia ..	36
3.7	Generación de aceite usado en Colombia y su gestión .....	37
3.8	Gestión de aceites usados en Caldas.....	41
3.9	Alternativas para el aprovechamiento de aceites usados .....	43
3.9.1	Combustión.....	43
3.9.2	Incineración .....	43
3.9.3	Encapsulamiento en el Clinker .....	44
3.9.4	Vitrificación, ceramización y encapsulación.....	44
3.9.5	Re-refinación .....	45
3.9.6	Recuperación de bases lubricantes.....	45
3.9.7	Adición a mezclas asfálticas .....	46
4	METODOLOGIA.....	47
4.1	Preparación de asfaltos a diferentes concentraciones de aceite usado.....	47
4.2	Viscosidad de asfaltos modificados .....	49

4.2.1	Metodología para el cálculo de la viscosidad.....	49
4.3	Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente .....	50
4.3.1	Objetivo del método Marshall. ....	51
4.3.2	Metodología para encontrar el porcentaje de asfalto óptimo. ....	51
4.3.3	Características del método Marshall.....	51
4.3.4	Preparación de especímenes. ....	51
4.4	Criterios de INVIAS para la aceptación de mezclas asfálticas calientes de gradación continua bajo la metodología Marshall. ....	52
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1	Análisis de resultados de asfaltos modificados .....	54
5.1.1	Curva reológica.....	54
5.1.2	Temperaturas de agregados, fabricación y compactación.....	60
5.1.3	Caracterización del asfalto.....	61
5.2	Caracterización de agregados .....	61
5.3	Resultados pruebas Marshall.....	62
5.3.1	Densidad Bulk.....	62
5.3.2	Estabilidad .....	64
5.3.3	Flujo .....	66
5.3.4	Rigidez Marshall (Stiffness) .....	68
5.3.5	Índice de película asfáltica (I.P.A.).....	70
5.3.6	Filler / asfalto efectivo .....	72
5.3.7	Resumen de resultados de los diferentes ensayos frente la norma 450 INVIAS 2013 .....	74
6.	CONCLUSIONES.....	75
	REFERENCIAS.....	78

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Crecimiento vehicular en Colombia, 2001 – 2015 .....	3
Figura 2. Estado de la mayoría de talleres informales para el mantenimiento .....	4
Figura 3. Porcentaje del aceite gestionado en Colombia, 2011 - 2015.....	5
Figura 4. Estado del tramo de prueba de la autopista Trans-Canadá .....	14
Figura 5. Estado del asfalto a diferentes temperaturas .....	17
Figura 6. Impacto en la demanda de asfalto en Colombia por la construcción de vías 4G .....	23
Figura 7. Clasificación de las mezclas asfálticas según la temperatura.....	28
Figura 8. Comparación de la descarga de mezclas asfálticas. ....	30
Figura 9. Efectos ambientales durante el extendido de mezclas asfálticas. ....	30
Figura 10. Apariencia del aceite de motor .....	32
Figura 11. Aporte principales sectores a la generación de aceites usados en Colombia .....	38
Figura 12. Volumen de aceite usado gestionado por operadores avalados.....	39
Figura 13. Variación precios de compra Manizales del aceite usado tipo A del 2008 a 2014 .....	40
Figura 14. Distribución por ciudad gestores de aceite usados avalados por la FAU-2015.....	41
Figura 15. Preparación de los asfaltos modificados con aceite usado.....	49
Figura 16. Montaje para la toma de muestras a diferentes concentraciones .....	50
Figura 17. Preparación de asfaltos modificados para las pruebas Marshall .....	52
Figura 18. Curvas reológicas de los asfaltos modificados halladas en el laboratorio.....	55
Figura 19. Correlaciones para la construcción del modelo predictivo de viscosidad.....	56
Figura 20. Curvas reológicas extrapoladas para asfaltos modificados con aceite usado.....	59
Figura 21. Comportamiento reológico del asfalto 60-70 .....	60
Figura 22. Gráficas para cálculo de la Densidad Bulk del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	63
Figura 23. Densidad Bulk Máxima vs Concentración de aceite .....	64
Figura 24. Gráficas para cálculo de la Estabilidad del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	65
Figura 25. Estabilidad Máxima vs porcentaje de aceite .....	66
Figura 26. Gráficas para cálculo del Flujo del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	67
Figura 27. Flujo vs concentración de aceite .....	68
Figura 28. Gráficas para cálculo de la Rigidez Marshall del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	69



Figura 29. Rigidez Máxima al 4% de mezcla asfáltica.....	70
Figura 30. Gráficas para cálculo del I.P.A. del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	71
Figura 31. Gráficas para cálculo del Filler/Asfalto Efectivo para asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso.....	72
Figura 32. Filler/Asfalto Efectivo Máximo .....	73

## Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Historia del asfalto en el mundo y en Colombia .....	7
Tabla 2. Antecedentes de la utilización de modificadores de asfaltos para fabricación de mezclas asfálticas tibias.....	10
Tabla 3. Composición elemental del asfalto .....	15
Tabla 4. Clasificación de asfaltos según su rango de penetración .....	18
Tabla 5. Tipo de asfalto a emplear en mezclas asfálticas calientes de gradación continua .....	18
Tabla 6. Especificaciones técnicas que deben cumplir los asfaltos en Colombia .....	22
Tabla 7. Resultados del análisis elemental del asfalto realizado por Ecopetrol .....	22
Tabla 8. Producción anual de asfalto Ecopetrol 2010-2020.....	24
Tabla 9. Descripción de los agregados minerales para mezclas asfálticas .....	25
Tabla 10. Clasificación de mezclas asfálticas por espacios vacíos .....	27
Tabla 11. Denominación de agregados minerales para mezclas asfálticas .....	28
Tabla 12. Evolución en la gestión de aceites usados en Colombia .....	33
Tabla 13. Composición promedio de aceites base .....	34
Tabla 14. Elementos contaminantes presentes en los aceites usados en Colombia .....	35
Tabla 15. Características de los aceites usados según su procedencia en Colombia .....	35
Tabla 16. Codificación de los aceites usados.....	36
Tabla 17. Resumen de aceites usados gestionados en Caldas período 2007 – 2014.....	42
Tabla 18. Gestión de aceites usados en Caldas con respecto a Colombia .....	43
Tabla 19. Ventajas y desventajas de la incineración de aceites usados.....	44
Tabla 20. Ventajas y desventajas del encapsulamiento en Clinker del aceite usado.....	44
Tabla 21. Ventajas y desventajas del encapsulamiento y vitrificación .....	45
Tabla 22. Ventajas y desventajas del uso de aceites usados en mezclas asfálticas .....	46
Tabla 23. Criterios de diseño de mezclas de gradación continúa por el método Marshall para Colombia.....	53
Tabla 24. Cálculo de la viscosidad para los asfaltos modificados.....	58
Tabla 25. Temperatura óptima para agregados, mezcla, compactación de mezclas asfálticas modificadas con aceite usado .....	60
Tabla 26. Caracterización del asfalto 60 – 70 y asfaltos modificados con aceite.....	61
Tabla 27. Granulometría de los agregados utilizados.....	62
Tabla 28. Norma 450-13 INVIAS.....	74

## **Lista de Símbolos y Abreviaturas**

### **Sistema de Unidades**

g = gramo

mol = cantidad de materia

g/mol = peso molecular

°C= grados Celsius

°F= grados Fahrenheit

nm= Nanómetro

%p/p= Porcentaje en peso de la muestra

Ton= Toneladas

Kcal= Kilocaloría

L= litros

.

### **Abreviaciones Principales**

WMA = Warm Mix Asphalt. (Mezclas Asfálticas Tibias)

HMA = Hot Mix Asphalt. (Mezclas Asfálticas Calientes)

HWMA = Hot Warm Mix Asphalt. (Mezclas Asfálticas Semicalientes)

CM= Cold Mix Asphalt (Mezclas Asfálticas Frías)

INVIAS = Instituto Nacional de Vías

A.U.= Aceites Usados

FAU= Fondo de Aceites Usados

RAP= Pavimento Asfáltico Reciclado

RESPEL= Residuos Peligrosos

NT= Nivel de tránsito

4G= Vías de cuarta generación

COVs= Compuestos Orgánicos Volátiles

MDC – 19 = Mezcla asfáltica densa en caliente

## INTRODUCCIÓN

En el siglo XXI el mundo afronta grandes retos ambientales por el deterioro de los recursos naturales, tanto por su agotamiento como por su contaminación; entre las principales causas de estos impactos ambientales negativos se tienen el alto crecimiento demográfico y las estrategias consumistas como la obsolescencia programada donde es más económico comprar un objeto nuevo que reparar uno viejo, esto ha llevado a que se generen cada día una mayor cantidad de residuos gaseosos (emisiones), sólidos, semisólidos y líquidos los cuales por su inadecuada gestión están ocasionando impactos ambientales negativos que podrían ser evitados si se logra su reincorporación en el ciclo productivo.

Este trabajo se enfocó en los aceites lubricantes usados de motor, ya que son residuos líquidos catalogados como peligrosos y que causan graves daños al medio ambiente y a la salud por los metales pesados que se les han incorporado después de su utilización.

En 1996, Colombia adopta el convenio de Basilea, y se empieza el camino para mejorar la legislación en materia de residuos peligrosos y por ende su gestión. Durante la década siguiente la gestión de los aceites usados lubricantes y refrigerantes se puede catalogar como incipiente y solo hasta el 2006 el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible elaboró la primera versión del Manual Técnico de Gestión de Aceites Usados con el fin de disminuir los impactos ambientales generados por estos residuos. Este manual detalla las técnicas y requerimientos necesarios para el almacenamiento, transporte, tratamiento, aprovechamiento y disposición final de aceites usados.

En el año 2005 se publica el decreto 4741 “Metodología para la gestión de residuos peligrosos en Colombia (Respel)”, en el que se establecen las obligaciones de las empresas generadoras y gestoras de estos residuos, además de los instrumentos de monitoreo y control por parte de la Corporaciones Autónomas Regionales.

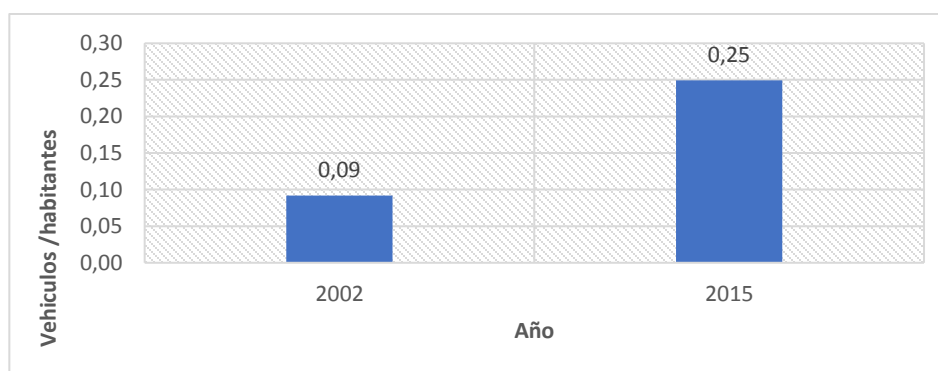
En la actualidad en Colombia se producen aproximadamente 25 millones de galones anuales de aceites usados y de los cuales se gestionan correctamente alrededor de 15 millones de galones (Ramírez, 2016). El aprovechamiento de los aceites usados se realiza principalmente mediante la aplicación de tecnologías comprobadas como la re-refinación (reúso de bases) y el co-procesamiento (aprovechamiento energético) que tienen como fin la desactivación de las sustancias peligrosas presentes en los aceites usados. (Benitez, y otros, 2015)

Aunque se ha mejorado en la gestión de los aceites usados se deben buscar alternativas para su reincorporación en el ciclo productivo y así acercarse a una gestión del 100%. Por éso en este trabajo se evalúa mediante ensayos de laboratorio la posibilidad de su uso como modificador del asfalto para la fabricación de mezclas asfálticas y lograr incorporar a la matriz del asfalto los componentes peligrosos. Otro beneficio que se puede obtener es la disminución de las temperaturas de fabricación y de aplicación de mezclas asfálticas, lo cual conlleva a una menor emisión de contaminantes atmosféricos y menor consumo energético de combustibles fósiles. Cabe anotar que con esta alternativa se busca introducir la mayor cantidad de aceite usado posible a la matriz de mezclas asfálticas, siempre y cuando se cumpla con los requisitos dados por la norma 450-13 de INVIAS.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia el parque automotor ha aumentado de forma significativa, en un lapso de 13 años se ha pasado de 0,09 a 0,25 vehículos por habitante, tal como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1.** Crecimiento vehicular en Colombia, 2001 – 2015



Fuente: (Mintransporte, 2016)

De manera directamente proporcional al crecimiento automotor también se incrementan los residuos de su mantenimiento como los aceites lubricantes de motor usados, que sumado a las pocas iniciativas para el manejo adecuado de estos aceites en comercios informales o talleres automotrices pequeños, ha generado un pasivo ambiental debido al vertimiento de estos residuos al suelo, a las fuentes de agua y a los sistemas de alcantarillado de nuestras ciudades, con el consecuente alto impacto ambiental negativo sobre las fuentes hídricas (Ortiz, 2007). En la figura 2 se presenta el estado de algunos talleres vehiculares que no cumplen con la gestión de residuos de aceites usado.

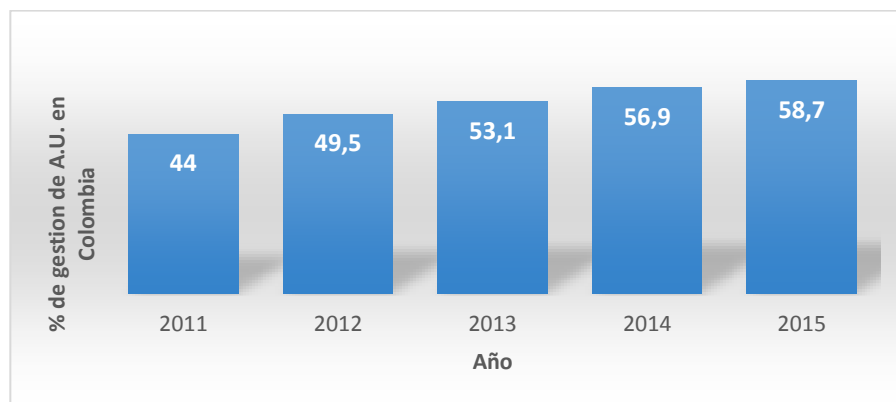
Como iniciativa para la reutilización de los aceites usados en las últimas dos décadas la industria colombiana los utilizó como sustituto al carbón y al petróleo para el uso en calderas y hornos, debido a su alto potencial calorífico y bajo costo (Ojeda, y otros, 2014). Pero su utilización como combustible sin tratamiento previo genera emisiones de metales pesados, por lo que este uso se ha reglamentado y ya no es una alternativa viable.

**Figura 2.** Estado de algunos talleres informales para el mantenimiento vehicular en Colombia



Fuente: (Ortiz, 2007)

En el 2006 se crea el Fondo de Aceites Usados, el cual ha realizado grandes esfuerzos por tener una mayor cobertura en la gestión de este tipo de residuos, pero solo ha logrado llegar al 58,7% en más de una década de funcionamiento (Ramírez, 2016), esto se debe en parte al gran crecimiento del parque automotor de Colombia y a la falta de compromiso con una adecuada gestión por parte de los generadores. En la figura 3. Se presentan el comportamiento en porcentaje de los aceites usados gestionados por el Fondo de Aceites Usados –FAU-.

**Figura 3.** Porcentaje del aceite gestionado en Colombia, 2011 - 2015

Fuente: (Ramírez, 2016)

El Manual Técnico para la gestión de Aceites Usados en su versión N°2 (Ojeda, y otros, 2014) propone nuevas alternativas para el aprovechamiento de los aceites usados entre los que se destaca el uso de éstos en asfaltos modificados para la pavimentación de vías, lo cual permitiría disminuir los impactos ambientales.

La incorporación de los aceites usados en la matriz de las mezclas asfálticas es una de las alternativas para el uso de residuos peligrosos en la construcción de vías, la más desarrollada en Colombia es la utilización del caucho de llantas usadas la cual ya está reglamentado por INVIAS (Invias, 2013); otra alternativa que está en fase de experimentación es el uso de diferentes plásticos como el policloruro de vinilo – PVC, polietileno de alta densidad PEHD y el poliestireno PS (Rodríguez, y otros, 2007), además se están realizando investigaciones con las escorias del sector metalúrgico que se usan como reemplazantes de agregados pétreos y llenantes en las mezclas asfálticas.

En Colombia se han realizado pocas investigaciones de aceites como modificadores de asfaltos; los ensayos realizados con aceite de palma estiman que la concentración máxima de aceite que se puede adicionar está entre el 1 y 2% en peso asfalto (Lopera, 2011).



## OBJETIVOS

### Objetivo General

Evaluar en laboratorio, mediante el ensayo Marshall, el comportamiento de la resistencia mecánica de una mezcla asfáltica en caliente cuando se le adiciona al asfalto aceite lubricante de desecho o usado.

### Objetivos específicos

- Recopilar información sobre experiencias de utilización de aceites en mezclas asfálticas.
- Elaborar la línea base de aceites usados en Caldas y Colombia.
- Establecer las temperaturas óptimas para agregados, mezcla y compactación para las diferentes mezclas de asfaltos modificados con aceite que cumpla con los requisitos de la norma 450 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua usando de base un asfalto 60/70.
- Encontrar el porcentaje máximo de aceite usado que se puede adicionar al asfalto en cumplimiento de la norma 450 de INVIAS 2013.
- Encontrar el porcentaje máximo de asfalto modificado a adicionar en cumplimiento de la norma 450 de INVIAS 2013.

## 1. ANTECEDENTES

Durante los últimos siglos el asfalto ha sido utilizado por sus propiedades ligantes en la fabricación de mezclas asfálticas para la pavimentación de vías tanto a nivel mundial como local; su gran demanda ha llevado a la realización de investigaciones para optimizar los procesos de fabricación y aplicación, la reducción de los costos operativos o la disminución de los impactos ambientales que se generan con su utilización. En la Tabla 1. Se presenta la historia del asfalto en el mundo y en Colombia donde se observa un avance significativo en las últimas décadas tanto en investigación como en la normativa para su uso. (Torres, y otros, 2012).

**Tabla 1.** Historia del asfalto en el mundo y en Colombia

AÑO	DESCRIPCIÓN
625 a.C.	En Babilonia se registra el primer uso de asfalto como material para la construcción de carreteras. Los antiguos griegos también usaron el asfalto. La palabra "asfalto" proviene de la palabra griega "asphaltos" que significa "seguro". Los romanos lo utilizaron para sellar sus famosos baños y acueductos.
1800	El uso de asfalto para construir carreteras creció de manera exponencial durante el siglo XVII. El constructor Thomas Telford, construyó más de 900 millas de carreteras en Escocia, perfeccionó el método de construir carreteras con rocas trituradas unidas con alquitrán caliente.
1870	El químico Belga Edmund J. DeSmedt, produjo el primero y verdadero pavimento asfáltico en New Jersey, Estados Unidos.
1871	La primera patente relacionada con la producción de asfalto fue registrada por Nathan B. Abbot, de Brooklyn, New York.
1880	En Estados Unidos se abre la primera planta de fabricación de asfalto por parte de la empresa The Cummer Company.

AÑO	DESCRIPCIÓN
1890	El primer pavimento en Colombia se construyó en las calles del centro y en la Plaza de Bolívar de Bogotá entre 1890 y 1893, pero la poca técnica empleada en la obtención del asfalto, la falta de fundación del pavimento, el uso de cascajo en lugar de arena, entre otras circunstancias, provocaron inconformidad con la obra.
1905	Se crea el Ministerio de Obras Públicas en Colombia, con la función de establecer los criterios y normas para la construcción y conservación de carreteras.
1907	La producción de asfalto por refinamiento del petróleo sobrepasó el uso de asfalto natural. Además, como consecuencia del crecimiento en la popularidad del automóvil, la demanda de más y mejores carreteras llevaron al surgimiento de innovaciones tanto en la producción de asfalto, como en la mecanización del proceso de su aplicación.
1929	El ministerio de Obras Públicas (MOP) de Colombia, pavimenta 5 km de la carrera 7ª entre San Diego y la Avenida Chile (Bogotá), utilizando concreto asfáltico.
1930	En 1932 se "petrolizan" dos carreteras: la Central desde la Avenida Chile hasta Usaquén y la calle 13. Un año después se inaugura el sistema de valorización para pavimentar dos kilómetros de la Avenida Chile, utilizando la técnica del Macadam.
1949	El primer Plan Vial Nacional se consolida con la Ley 12 de 1949 que decreta la construcción de cuatro troncales: Occidental que une a Tumaco con Cartagena e incluye las transversales La Cruz-San Agustín y Palmira-Chaparral, Oriental que une Tres Esquinas con Santa Marta, Transversal Bogotá-Pizarro con el ramal Espinal-Buenaventura y la Transversal Puerto Carreño – Turbo.
1955	En Estados Unidos se funda la asociación "The National Bituminous Concrete Asociación" (más tarde convertida en the National Asphalt Pavement Association o NAPA). Una de las primeras actividades de esta institución fue la de crear el "Programa de Mejoramiento de Calidad ("Quality Improvement Program"), que patrocinó la ejecución de pruebas de asfalto en laboratorios privados y universidades.
1970s	La crisis de energía que se sufrió en esta década trajo consigo la necesidad de una mayor conservación de los recursos naturales. Desde entonces, una creciente cantidad de asfalto reciclado se ha incorporado a las mezclas utilizadas para la construcción y mantenimiento de carreteras en USA.  Hoy, el pavimento asfáltico es el material más reciclado en USA con más de 70 millones de toneladas métricas de material de pavimento asfáltico reciclado cada año.
1986	La Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico (NAPA, por sus siglas en inglés) creó el National Center for Asphalt Technology (NCAT) o Centro Nacional de Tecnología Asfáltica, como un mecanismo sistemático y centralizado para la investigación del asfalto. La NCAT cuenta con un centro de investigación y se ha convertido en la institución líder del mundo en materia de investigación sobre pavimento asfáltico.
1992	Mediante el decreto 2171 del 30 de diciembre de 1992 se crea el Instituto Nacional de Vías -INVIAS-, que tiene como objetivo la ejecución de las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la infraestructura no concesionada de la Red Vial Nacional de carreteras primaria y terciaria, férrea, fluvial y de la infraestructura marítima, de acuerdo con los lineamientos dados por el Ministerio de Transporte.

AÑO	DESCRIPCIÓN
1995	Shell y Kolo Viedekke, iniciaron un programa en conjunto, para el desarrollo de un producto y del proceso para la fabricación de mezcla agregado - asfalto a temperaturas más bajas; obteniendo mejores propiedades o equivalentes condiciones de desempeño, con relación a las mezclas tradicionales en caliente.
1999-2001	En la Unión Europea se dan los primeros reportes sobre el comportamiento a mediano plazo de mezclas tibias los cuales arrojaron resultados positivos.
2002	<p>La EPA ("Environmental Protection Agency", USA) anunció que las plantas de asfalto ya no hacen parte de su lista de industrias consideradas las mayores fuentes de polución y daños al medio ambiente.</p> <p>La NAPA realiza recorridos de campo en Europa para comprobar el funcionamiento de las tecnologías de la mezcla asfáltica tibia (WMA) y examina la reducción en costos por trabajar a menor temperatura.</p> <p>En Colombia Ecopetrol empieza la comercialización de asfalto homogenizado.</p>
2003	Los estudios sobre mezclas tibias son presentados en la Convención Anual de la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico NAPA.
2003	El Centro Nacional para la Tecnología en Asfalto, continúa con las investigaciones sobre los procesos de las mezclas tibias, Alpha-min (zeolite cristalino) y Sasobit (una cera de Fsher-Tropsch). La investigación es patrocinada por NAPA, Administración Federal de Carreteras FHWA, Eurovia (Asphamin) y Sasol (Sasobit).
2006	En USA se realizan pruebas de campo en para mezclas tibias en: California, con la mezcla de hule asfáltico; Michigan, Missouri, sobre la nueva aplicación para evitar baches causados por temperatura en la carretera.
2007	<p>Se actualiza el manual de normas para asfaltos en Colombia por parte del INVIAS, el cual contiene tanto los requerimientos mínimos exigidos en los procesos constructivos como la metodología de pruebas en laboratorio y campo a realizar para asfaltos y mezclas asfálticas.</p> <p>Se introducen los asfaltos espumados en Europa y se presenta la Tecnología del Asfalto Dispersado (DAT) en su fase experimental.</p>
2012	<p>Se establecen la cuarta generación de concesiones en Colombia mediante la ley 1508 de 2012, impulsando el consumo de asfaltos.</p> <p>La capacidad instalada de asfalto Ecopetrol llega a las 67 mil toneladas mensuales y la demanda promedio alcanza las 31 mil</p>
2013	Se actualizan las normas técnicas para el uso y aplicación de pavimentos asfálticos en Colombia, debido a la implementación de nuevas tecnologías.
2014	La demanda de asfalto en Colombia pasa de 35 mil a 45 mil toneladas promedio mes del 2013 al 2014, debido a los nuevos proyectos de la infraestructura vial del país.
2015	Se establecen los criterios para que todas las licitaciones de obras públicas que implementen mezclas asfálticas tengan un 10% de Grano de Caucho Reciclado de Llantas (GCR).

Fuente: Adaptación a partir (Londoño, 2014), (Ortega, y otros, 2012) y (Invias, 2016).

Desde el punto de vista ambiental la industria del asfalto ha realizado investigaciones con el fin de disminuir los impactos ambientales causados por esta tecnología, uno de ellos es el desarrollo de productos, sustitutos o modificadores para la fabricación de pavimentos asfálticos, como polímeros y zeolitas de fabricación exclusiva, que tienen como fin disminuir el consumo energético en la aplicación de las mezclas asfálticas (Lopera, 2011).

Además, con el fin de contribuir a la disminución de los impactos causados por otros sectores el pavimento asfáltico es visto como un sistema de encapsulamiento para residuos que permitiría dar un aprovechamiento a un sin número de desechos que actualmente se disponen de forma inapropiada y que generan grandes pasivos ambientales. El caso más importante es que después de varios años de investigación el INVIAS autorizó el uso de caucho de llantas trituradas en las vías con mezclas asfálticas y la reutilización de pavimentos asfálticos (Reclaimed Asphalt Pavement –RAP-).

En la tabla 2 se presenta una breve descripción de los estudios realizados a asfaltos modificados con desechos y aceites de diferentes tipos con el fin de disminuir las temperaturas de fabricación y aplicación de las mezclas asfálticas.

**Tabla 2.** Antecedentes de la utilización de modificadores de asfaltos para fabricación de mezclas asfálticas tibias

Año	Tema	Conclusiones	Autor
1992	Utilización de materiales de desecho en mezclas asfálticas calientes	Se debe fomentar el uso de materiales de desecho en la construcción de carreteras, ésto puede ser una solución a los problemas medio ambientales, pero se deben realizar estudios desde el punto de vista ingenieril y debe garantizarse que las características de estas mezclas asfálticas son iguales o superiores a las convencionales.	

Año	Tema	Conclusiones	Autor
2008	Modificación del asfalto con aceite lubricante usado en Superpave	<p>Se concluyó que a bajas temperaturas ambientales la adición de aceite lubricante de motor disminuye la temperatura de aplicación de Superpave en 25°C, pero cuando la aplicación se realiza a altas temperaturas ambientales la reducción de la temperatura de aplicación no es significativa, además se encontró que la aplicación de aceites lubricantes pueden ser perjudicial sobre la calidad del asfalto por la reducción de la adhesión de éste con los agregados, lo que puede ocasionar desprendimientos.</p> <p>El estudio recomendó realizar pruebas en campo.</p>	(Villanueva, y otros, 2008)
2010	<p>Efecto de trabajar a menor temperatura las mezclas asfálticas calientes</p> <p>Comportamiento de mezclas asfálticas tibias elaboradas con aditivos</p>	<p>Cuando se disminuye la temperatura de fabricación de las mezclas asfálticas en caliente, entre 20-25°C, se genera menor cantidad de CO<sub>2</sub>, pero los niveles NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> se mantienen estables.</p> <p>La aplicación de aditivos ha demostrado las mejoras en la elasticidad de los módulos y una menor velocidad de deformación en relación con las mezclas asfálticas convencionales.</p> <p>La reducción de temperatura provoca una disminución en las propiedades mecánicas de las mezclas y cambios en las propiedades cohesivas y/o adherencia, la menor temperatura ocasiona un porcentaje de humedad mayor en la mezcla asfáltica.</p>	<p>(Bolzan, 2010)</p> <p>(Marcozzi, y otros, 2010)</p>
2011	Efecto de la adición de aceite de palma en mezclas asfálticas tibias en Colombia	Con la utilización de aceite de palma en las mezclas asfálticas tibias se logró la reducción en la viscosidad; buena resistencia mecánica y buen desempeño a menor temperatura para aceite en concentraciones inferiores al 1%.	(Lopera, 2011)

Año	Tema	Conclusiones	Autor
	Investigación del uso de aceite usado de motor en RAP, para mejorar la reciclabilidad de estos.	<p>Se realizaron pruebas para conocer el comportamiento del RAP cuando se le adiciona aceite usado de motor, se concluyó que el aceite usado es un posible rejuvenecedor de asfaltos envejecidos ya que aporta maltenos (están constituidos por anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas), que contribuyen a mejorar la capacidad de flujo de la mezcla.</p> <p>Cuando se utilizó tanto RAP como aceite usado en la fabricación de mezclas asfálticas se observó que las fuerzas de cohesión no aumentan lo que puede ocasionar un incremento en las probabilidades de desprendimiento de agregados por pérdida de fuerzas ligantes en terreno.</p> <p>Una de las cualidades del aceite usado fue la capacidad para contrarrestar la capacidad de endurecimiento</p>	(DeDene, 2011)
	Implementación de mezclas asfálticas tibias en Colombia	La principal ventaja que tienen las mezclas tibias sobre las mezclas asfálticas calientes es la reducción en costos operativos, ya que requieren menor consumo energético para su fabricación y aplicación, los que conlleva además a una menor generación de gases de efecto invernadero.	(Ortega, y otros, 2012)
2012	Uso de aceite usado en cementos asfálticos	La Universidad de Queens de Canadá realizó durante 5 años estudios en dos tramos de la autopista Trans-Canadá, que fueron construidos en el año 1999 con asfalto modificado con aceite de motor usado, los resultados encontrados para el pavimento después de 5 años de uso, no fueron satisfactorios debido a los agrietamientos generalizados presentados a lo largo de todo el tramo de vía, según el estudio esta falla en la mezcla asfáltica se debió a la presencia de metales pesados en el aceite usado y la susceptibilidad del asfalto modificado a los cambios de temperatura, lo cual generó oxidación de estos metales, acelerando los procesos de envejecimiento del pavimento por lo que no recomienda el uso de este tipo de productos en cementos asfálticos.	(Shurvell, 2012)

Año	Tema	Conclusiones	Autor
2013	Evaluación en laboratorio del uso de aceite de cocina para fabricación de bioasfaltos como alternativa a HMA	Otra alternativa que se ha evaluado es la adición de aceite de cocina usado en mezclas asfálticas en caliente (HMA), se realizaron ensayos con concentraciones que van del 0% al 60%, demostrando que la adición de este aceite disminuyó la rigidez de la mezcla, se propició la formación de surcos y/o grietas. Además, se observó mejora en la resistencia térmica a las fisuras	(Wen, y otros, 2013)
2013	Aplicación de aceite usado como componente de mezclas asfálticas frías y calientes	<p>La adición de aceites usados en mezclas frías puede ocasionar una disminución de las propiedades de estabilidad y resistencia, generando un debilitamiento en la propiedad aglutinante entre los agregados y el asfalto.</p> <p>Sin embargo, para mezclas en caliente y cuando se mezcla con RAP, se observó una disminución de la rigidez mejorando para este tipo de mezclas la resistencia al agrietamiento.</p>	(Nurul , y otros, 2013)
2013	Efecto de la adición de aceite usado en las características críticas de las carpetas asfálticas	Este estudio indica que el aceite usado es un modificador del comportamiento reológico y térmico de las carpetas asfálticas debido a la reducción de la rigidez, generando un incremento en la relajación del módulo. Los resultados también mostraron que la adición del aceite tiene un efecto positivo sobre la resistencia aglutinante del asfalto en un amplio rango de temperatura.	(Golalipour, 2013)
2014	Evaluación de las propiedades de rigidez de HMA modificadas con aceite de motor usado	<p>Esta evaluación se realizó para asfaltos 80/100 modificados con aceites usados de motor en concentraciones del 0%, 1%, 2% y 3% en peso, se concluyó que la adición de éstos no afecta la fluencia y la recuperación del ligante bajo diferentes cargas de tránsito, además se demostró que en concentraciones de aceite por debajo del 2% no se afectan las propiedades de resistencia de forma significativa.</p> <p>Igualmente se usó un módulo de rigidez (ITSM), encontrando correlaciones lineales para la disminución del parámetro de rigidez de la mezcla una vez se adiciona aceite, así sea en bajas concentraciones, lo cual indica que este puede ser usado como agente ablandador en asfaltos pesados.</p>	(Abdullah, y otros, 2014)

Fuente: Adaptación propia.



De los estudios anteriormente mencionados, el único que se ha realizado en campo es la autopista Trans-Canadá que presentó agrietamientos después de 5 años de uso como se muestra en la figura 4.

**Figura 4.** Estado del tramo de prueba de la autopista Trans-Canadá en el cual se usaron asfaltos modificados con aceites



Fuente: (Shurvell, 2012)

## 2. ASFALTO Y MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.1 Propiedades del asfalto

La calidad de un asfalto depende de su composición química, la cual puede variar según las condiciones del crudo, el cual depende de factores del yacimiento petrolero o por los procesos de refinación petroquímica, es por ésto que existen diferentes tipos de asfaltos dependiendo de su rango de penetración.

#### 2.1.1 Composición del asfalto

El asfalto es una mezcla de hidrocarburos derivados del petróleo que se puede obtener de forma natural ó como producto de la refinación del petróleo, es usado como aglomerante en la pavimentación de carreteras y cubiertas, presenta un color marrón oscuro a negro. Su composición por elemental se presenta en la tabla 3.

**Tabla 3.** Composición elemental del asfalto

ELEMENTO	COMPOSICIÓN (%)
Carbono	82-88
Hidrogeno	8-11
Azufre	0-6
Oxigeno	0-1,5
Nitrógeno	0-1

Fuente: Adaptación de (Read, y otros, 2003)

Los constituyentes principales del asfalto son:

- **Hidrocarburos saturados:** Son entre el 5-20% de la composición del asfalto, consisten en hidrocarburos alifáticos de cadena lineal y ramificada además de

cicloalcanos, presentan una consistencia viscosa y su peso molecular varia de 470 – 880 g/mol.

- **Resinas:** Son compuestos solubles en n-heptano que contienen elementos como azufre, oxígeno y nitrógeno, su apariencia es de color marrón oscuro en estado sólido ó semisólido de naturaleza polar, se caracteriza por tener una alta fuerza de adhesión. Su peso molecular esta entre 780-1400 g/mol, la concentración de este define la densidad del asfalto
- **Aromáticos:** Son el principal constituyente del asfalto con una composición del 40 al 65%, se caracteriza por su color marrón oscuro y consistencia viscosa, su peso molecular varía entre el 570-980 g/mol, se caracteriza por la capacidad de disolverse en hidrocarburos de peso molecular mayor.
- **Asfáltenos:** Constituyen entre 5-25% del asfalto, son n-heptanos insolubles de color negro ó café con alta polaridad, sus pesos moleculares varían entre 1000-100000 g/mol, con tamaño de partícula entre 5-30nm.

La presencia en mayor o menor concentración de los compuestos anteriormente mencionados, determinan si el asfalto es de alta ó baja densidad.

Además de la presencia de hidrocarburos, el asfalto contiene trazas de metales como el níquel, hierro, manganeso y calcio, que pueden acelerar los procesos de envejecimiento de los pavimentos asfálticos (Read, y otros, 2003).

El asfalto a temperatura ambiente de 25°C presenta un estado sólido quebradizo, una vez se alcanzan los 60-70 °C este empieza a fundirse como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Estado del asfalto a diferentes temperaturas  
Izquierda sólido  $T < 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  y Derecha en estado líquido  $T > 60\text{ }^{\circ}\text{C}$



Fuente: (Incoasfaltos, 2016)

### 2.1.2 Propiedades físicas del asfalto

Las principales características físicas que debe cumplir un asfalto para su uso en pavimentos asfálticos son (Armanta, 2002).

- a) **Durabilidad:** Es la capacidad que posee el asfalto para conservar durante el tiempo sus características originales.
- b) **Adhesión:** Es la facilidad que tiene el asfalto para adherirse a los agregados pétreos.
- c) **Cohesión:** Es la fuerza que permite mantener firme o en su puesto las partículas en los agregados.
- d) **Susceptibilidad a la temperatura:** Los asfaltos son termosensibles, es decir que se vuelven más duros a medida que disminuye su temperatura y más blandos a medida que ésta aumenta.
- e) **Endurecimiento:** Es el aumento en la rigidez de un pavimento causado por el proceso de oxidación; los cuales ocurren con mayor facilidad a altas temperaturas y cuando las películas son delgadas, ésta es la situación que se da durante la fabricación de las mezclas asfálticas; y continúa aun después de la construcción del pavimento asfáltico.

Los asfaltos se clasifican en grado según su dureza ó consistencia por medio de la penetración, así por ejemplo los asfaltos 200-300 son los más blandos, son usados en regiones frías donde la temperatura desciende por debajo de los  $0^{\circ}\text{C}$ , por el

contrario, los asfaltos más duros como el 40-50 son usados para regiones donde las temperaturas son superiores a los 30°C; el asfalto más usado en Colombia es el 60-70.

A continuación, en la tabla 4 se presentan los tipos comerciales de asfaltos de acuerdo con su grado de penetración.

**Tabla 4.** Clasificación de asfaltos según su rango de penetración

TIPO DE ASFALTO	PENETRACIÓN
40-50	Entre 40 y 50 décimas de milímetro
60-70	Entre 60 y 70 décimas de milímetro
85-100	Entre 85 y 100 décimas de milímetro
120-150	Entre 120 y 150 décimas de milímetro
200-300	Entre 200 y 300 décimas de milímetro

Fuente: Adaptación de (Deschamps, y otros, 2005)

En la tabla 5, se presenta el tipo de asfalto que debe usarse en Colombia de acuerdo con la temperatura promedio de la región donde se empleará, así como la capa en la cual se utilizará y el nivel de tránsito para la cual fue diseñada.

**Tabla 5.** Tipo de asfalto a emplear en mezclas asfálticas calientes de gradación continua

TIPO DE CAPA	NT 1			NT 2			NT 3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGIÓN (O <sub>c</sub> )								
	> 24	15 - 24	< 15	> 24	15 - 24	< 15	> 24	15 - 24	< 15
Rodadura e intermedia	60 - 70	60 - 70 u 80 - 100	80 - 100	60 - 70	60 - 70 u 80 - 100	80 - 100	40 - 50 60 - 70 o Tipo II (a ó b) o Tipo III	40 - 50 60 - 70 o Tipo II (a ó b)	60 - 70 u 80 - 100 o Tipo lib
Base	NA			60 - 70 u 80 - 100	60 - 70 u 80 - 100	80 - 100	60 - 70	60 - 70 u 80 - 100	80 - 100
Alto Módulo	NA			NA			NA		

Fuente: (Invias, 2013)

### 2.1.3 Propiedades reológicas del asfalto

Para evaluar las propiedades reológicas de un asfalto se tienen en cuenta los parámetros y límites permisibles dados por el INVIAS en su Manual de pavimentos asfálticos:

#### 2.1.3.1 Penetración (Invias, 2007)

**Objetivo:** Determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto

**Significado y uso:** El ensayo de penetración se usa como una medida de consistencia. Altos valores de penetración indican consistencias más blandas.

#### 2.1.3.2 Punto de ablandamiento (Invias, 2007)

**Objetivo:** determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30° a 157° C (86° a 315° F), utilizando el aparato de anillo y bola, sumergido en agua destilada (30° a 80° C), glicerina USP (encima de 80° a 157° C), o glicol etileno (30° a 110° C).

**Significado y uso:** Los productos bituminosos son materiales visco elásticos y no cambian del estado sólido al estado líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura se eleva. Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario fijo, pero definido que produzca resultados reproducibles y comparables. El punto de ablandamiento es útil para clasificar productos bituminosos y es un valor índice de la tendencia del material a fluir cuando está sometido a temperaturas elevadas, durante su vida de servicio. También, puede servir para establecer la uniformidad de los embarques o fuentes de abastecimiento.

#### 2.1.3.3 Índice de penetración (Invias, 2007)

**Objetivo:** Determinación del índice de penetración, I, de los cementos asfálticos. Este índice, concebido por Pfeiffer y Van Doormal, se calcula a partir de los valores

de la penetración a 25° C y del punto de ablandamiento y proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales.

**Significado y uso:** El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir, primero, que a la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) la penetración de un cemento asfáltico es de  $800 \times 0.1$  mm, segundo, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta. En función del IP, se pueden clasificar los cementos asfálticos, de forma general, en tres grupos:

IP+1: Son cementos asfálticos con poca susceptibilidad a la temperatura, presentando cierta elasticidad y tixotropía. Se les denomina tipo gel o soplado, ya que la mayoría de los asfaltos oxidados pertenecen a este grupo.

IP-1: Cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso.

IP Entre +1 y -1: Características intermedias entre los dos anteriores; pertenecen a este grupo la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras.

#### **2.1.3.4 Viscosidad** (Invias, 2007)

**Objetivo:** procedimiento que se debe seguir para medir la viscosidad aparente del asfalto a elevadas temperaturas, desde 60° a 200°C, usando un viscosímetro rotacional equipado con un sistema termosel.

**Significado y uso:** Este método de ensayo ha sido usado para medir la viscosidad aparente de asfaltos al aplicar temperatura. La medida de viscosidad a altas temperaturas ha sido usada para determinar la manejabilidad y facilidad de bombeo en la refinería, terminal o planta asfáltica. Los valores medidos mediante este procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas de temperatura contra viscosidad, los cuales se utilizan para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar durante el diseño y construcción de mezclas asfálticas en caliente.

#### **2.1.3.5 Ductilidad** (Invias, 2007)

**Objetivo:** Procedimiento que se debe seguir para la determinación de la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida.

**Significado y uso:** Capacidad de elongación del cemento asfáltico. Se utiliza para conocer la maleabilidad de asfalto.

#### **2.1.3.6 Solubilidad** (Invias, 2007)

**Objetivo:** determinación del grado de solubilidad en tricloroetileno o tricloroetano de materiales asfálticos que tengan poco material mineral o que carezcan de él.

**Significado y uso:** Este método es una medida de la solubilidad del asfalto en tricloroetileno o tricloroetano y la parte que sea soluble representa los constituyentes cementantes activos.

#### **2.1.3.7 Contenido de agua** (Invias, 2007).

**Objetivo:** Determinación del contenido de agua en los materiales asfálticos en general, como crudos de petróleo, alquitranes y productos derivados de ambos materiales.

**Significado y uso:** Cantidad de agua presente en el asfalto.

#### **2.1.3.8 Punto de inflamación** (Invias, 2007).

**Objetivo:** determinar los puntos de ignición y de llama.

**Significado y usos:** se deberá emplear para medir y describir las propiedades de materiales, productos o sistemas, en respuesta al calor y a la llama bajo condiciones de laboratorio controladas y no se deberá considerar ni emplear para la descripción o para la apreciación de materiales, productos o sistemas, que presenten riesgo de incendio bajo condiciones reales.

Los parámetros exigidos por INVIAS para asfaltos en Colombia se resumen en la tabla 6.



**Tabla 6.** Especificaciones técnicas que deben cumplir los asfaltos en Colombia

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO	GRADO DE PENETRACION					
		40-50		60 - 70		80 - 100	
		INV	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25oC, 100 g, 5S), 0,1 mm	E - 706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, oC	E - 712	52	58	48	54	45	52
Índice de penetración	E- 724	-1,2	0,6	-1,2	0,6	-1,2	0,6
Viscosidad absoluta (60 oC) , P	E-716 ó E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad 825 oC, 5 cm/min), cm	E - 702	80	-	100	-	100	-
Solubilidad en tricloroetileno, %	E - 713	99	-	99	-	99	-
Contenido de agua, %	E - 704	-	0,2	-	0,2	-	0,2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, oC	E - 709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E - 718	-	3	-	3	-	3
<b>Asfalto residual, luego de la prueba de acondicionamiento en película delgada rotatoria, norma de ensayo INV E - 720</b>							
Pérdida de masa por calentamiento %	E- 720	-	0,8	-	0,8	-	1
Penetración de residuo, en % de la penetración del asfalto original	E - 706	55	-	50	-	46	-
Incremento en el punto de ablandamiento, oC	E - 712	-	8	-	9	-	9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades 860 oC) des asfalto residual y al asfalto original	E-716 ó E-717	-	4	-	4	-	4

Fuente: (Invias, 2013)

## 2.2 Características del asfalto en Colombia

La composición elemental del asfalto de Barrancabermeja, tanto para asfaltos frescos como para asfaltos envejecidos, se muestra en la tabla 7, identificando en su composición cinco elementos químicos principales: Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno, Azufre y Oxígeno; este último representa el estado de oxidación del asfalto, por lo que en un asfalto envejecido tiene una mayor composición de oxígeno. (Romero, y otros, 2002).

**Tabla 7.** Resultados del análisis elemental del asfalto realizado por Ecopetrol

MUESTRA	CARBONO (% p/p)	HIDRÓGENO (% p/p)	NITRÓGENO (% p/p)	AZUFRE (% p/p)	OXÍGENO (% p/p)
Asfalto fresco CIB	87,03	10,24	1,6	1,13	≈ 0
Asfalto envejecido	77,47	7,48	0,96	0,77	13,32

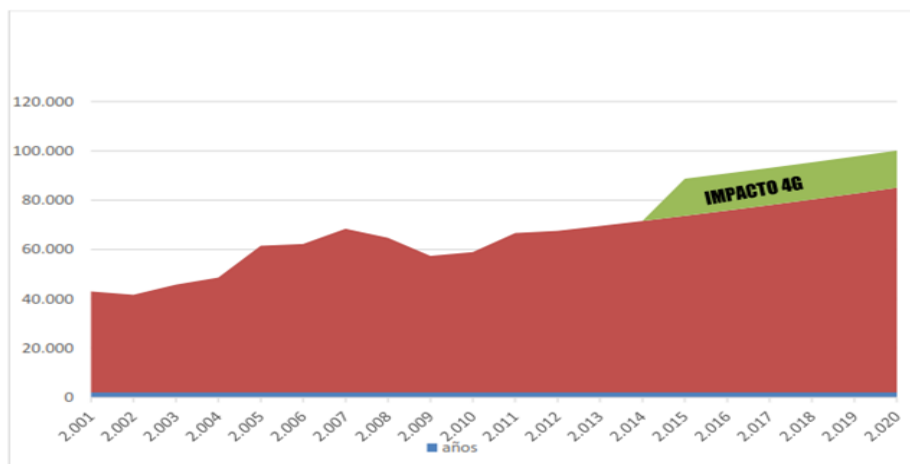
Fuente: (Romero, y otros, 2002)

### 2.3 Producción de asfaltos en Colombia

En Colombia el único productor de asfalto de la refinación del petróleo es ECOPETROL, tiene una capacidad instalada para la producción de asfalto de 67 mil toneladas mensuales en las plantas de Barrancabermeja (60 mil) y Apiay (7 mil). (SIC, 2012).

Para el año 2016 se estimó que el consumo mensual de asfalto estaría en el orden de las 40 mil toneladas mensuales y con un fuerte crecimiento debido a los grandes proyectos viales que se están ejecutando en Colombia, se espera que para el 2020 la demanda de asfalto alcance las 75 mil toneladas mensuales, casi el doble de la cantidad actual tal como se presenta en la tabla 8, esto debido al impacto de la construcción de vías 4G como se muestra en la figura 6., por lo cual Ecopetrol en corto plazo deberá aumentar la producción de asfalto de sus refinerías (Incoasfaltos, 2016).

**Figura 6.** Impacto en la demanda de asfalto en Colombia por la construcción de vías 4G



Fuente: (Mintransporte, 2016)

**Tabla 8.** Producción anual de asfalto Ecopetrol 2010-2020

<b>AÑO</b>	<b>CONSUMO NACIONAL ANUAL (ton)</b>	<b>PROMEDIO MES (ton)</b>
2010	378.762	31.564
2011	384.577	32.048
2012	372.020	31.002
2013	395.828	32.986
2014	454.155	37.846
Proyección 2016	696.000	58.000
Proyección 2020	900.000	75.000

Fuente: Adaptación de (Incoasfaltos, 2016)

## 2.4 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas están constituidas por agregados pétreos y un ligante (asfalto), de tal forma que este cree una película sobre los agregados. Generalmente las mezclas son fabricadas en centrales fijas o móviles, desde donde se transportan hasta la obra, allí se deben extender y compactar a temperaturas y viscosidades óptimas, por lo que para garantizar estas condiciones, en algunos casos se utilizan aditivos químicos o modificadores como zeolitas, caucho o incluso diferentes tipos de aceites, (Kreamer , y otros, 2004), para corroborar que están acordes con las especificaciones y requerimientos de INVIAS a cada lote se le debe realizar las pruebas de diseño Marshall.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente en un 90 % por agregados pétreos gruesos y finos; los gruesos deben proceder de la trituración y clasificación de la roca y/o grava, con fragmentos limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, y los finos que están constituidos por arena de trituración y una mezcla de ella con arena natural, con granos duros, de superficie rugosa y angular, deben estar limpios para evitar cualquier sustancia que impida la adhesión con el asfalto. También tienen un

5% en material rellenable ó polvo mineral el cual puede provenir de proceso de trituración y clasificación de agregados pétreos o ser aportado por cal hidratada o cemento hidráulico. Por último, está el ligante asfáltico, que ocupa el 5% restante, que puede en algunos casos estar mezclado con aditivos químicos (zeolitas, caucho o aceite usado) (Invias, 2013).

En la tabla 9 se presentan las condiciones que deben cumplir los agregados pétreos en Colombia.

**Tabla 9.** Descripción de los agregados minerales para mezclas asfálticas

DENOMINACION	DESCRIPCION
Agregado grueso	Porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No. 4)
Agregado fino	Porción del agregado comprendida entre los tamices de 4,75 mm y 75 $\mu$ m (No.4 y No.200)
Llenante mineral	Porción que pasa el tamiz de 75 $\mu$ m (No.200)
- Llenante mineral de aporte	- Fracción del llenante que se incorpora a la mezcla por separado

Fuente: (Invias, 2013)

#### 2.4.1 Propiedades de las mezclas asfálticas.

Las propiedades requeridas para la mezcla asfáltica que se diseña son:

- **Contenido de asfalto en la mezcla:** Tiene como fin garantizar la integración y estabilidad de la mezcla. (Torres, y otros, 2012)
- **Contenido de vacíos:** Es una variable crítica en el diseño de la mezcla, ya que estos proveen el espacio que necesita el cemento asfáltico para expandirse, ante los cambios de temperatura del ambiente. (Arias, y otros, 2016)
- **Estabilidad:** Capacidad de un pavimento para resistirse a la deformación ante las cargas de tráfico. (Deschamps, y otros, 2005)
- **Durabilidad:** Habilidad de la mezcla a resistirse a la desintegración por efecto del desgaste y las cargas de tráfico. (Laboratorio Vialidad, 2016)
- **Flexibilidad:** Capacidad de la mezcla para ajustar su densidad en la carpeta asfáltica sin quebrarse ante las cargas del tráfico. (Arias, y otros, 2016)

- **Resistencia a la fatiga:** Habilidad del pavimento para resistir flexiones, ligeras dislocaciones o fracturas causadas por las cargas del tráfico. (Celis , y otros, 2008)
- **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad de la mezcla compactada para permitir el agarre de los neumáticos a la superficie del pavimento, evitando los deslizamientos especialmente cuando la superficie está húmeda. (Arias, y otros, 2016)
- **Impermeabilidad:** Resistencia que presenta la mezcla asfáltica compactada a ser infiltrada por el agua o el aire. (Paris, 2016)
- **Maniobrabilidad:** facilidad para esparcir y compactar la mezcla en la vía. (Laboratorio Vialidad, 2016)
- **Economía:** la calidad de los materiales para producir la mezcla debe estar en equilibrio con el costo de los mismos” (Celis , y otros, 2008).

#### 2.4.2 Clasificación de las mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se clasifican de acuerdo con su composición y homogeneidad de los agregados pétreos, la relación de espacios vacíos y la temperatura de aplicación en campo.

##### 2.4.2.1 Fracción de agregado pétreo usado (Paris, 2016)

- **Masilla Asfáltica:** Polvo mineral más el ligante.
- **Mortero Asfáltico:** Agregado fino más masilla.
- **Concreto Asfáltico:** Agregado grueso más mortero.
- **Macadam Asfáltico:** Agregado grueso más ligante asfáltico.

##### 2.4.2.2 Proporción de vacíos en la mezcla (Paris, 2016)

Las mezclas se clasifican de acuerdo con el porcentaje de espacios vacíos como se presenta en la tabla. 10.

**Tabla 10.** Clasificación de mezclas asfálticas por espacios vacíos

TIPO DE MEZCLA POR ESPACIOS VACÍOS	% DE ESPACIOS VACÍOS
Mezcla Cerrada o densas	<6%
Semidensas o semicerradas	6-10%
Abiertas	12%
Porosas o drenantes	20%

Fuente: Adaptación de (Laboratorio Vialidad, 2016)

#### 2.4.2.3 Tamaño máximo de agregado pétreo (Deschamps, y otros, 2005)

- **Gruesas:** El tamaño máximo del agregado pétreo excede los 10 mm.
- **Finas o microaglomerados:** Formadas básicamente por agregado fino, polvo mineral y ligante asfáltico.

#### 2.4.2.4 Estructura del agregado pétreo (Laboratorio Vialidad, 2016)

- **Mezclas con esqueleto mineral:** Provistas de un esqueleto mineral resistente, su componente de resistencia debida al rozamiento interno de los agregados es notable. Ejemplo, las mezclas abiertas y los que genéricamente se denominan concretos asfálticos, aunque también una parte de la resistencia de estos últimos se debe a la masilla.
- **Mezclas sin esqueleto mineral:** No poseen un esqueleto mineral resistente, la resistencia es debida exclusivamente a la cohesión de la masilla. Ejemplo, los diferentes tipos de masillas asfálticas.

#### 2.4.2.5 Granulometría (Deschamps, y otros, 2005)

- **Mezclas continuas:** Cantidad bien distribuida de agregados pétreos en la granulometría.
- **Mezclas discontinuas:** Cantidad limitada de tamaños de agregado pétreo en la granulometría (Paris, 2016)

### 2.4.2.6 Por tipo de Granulometría (Deschamps, y otros, 2005)

Para el INVIAS la clasificación de acuerdo con la granulometría se presenta en la tabla 11.

**Tabla 11.** Denominación de agregados minerales para mezclas asfálticas

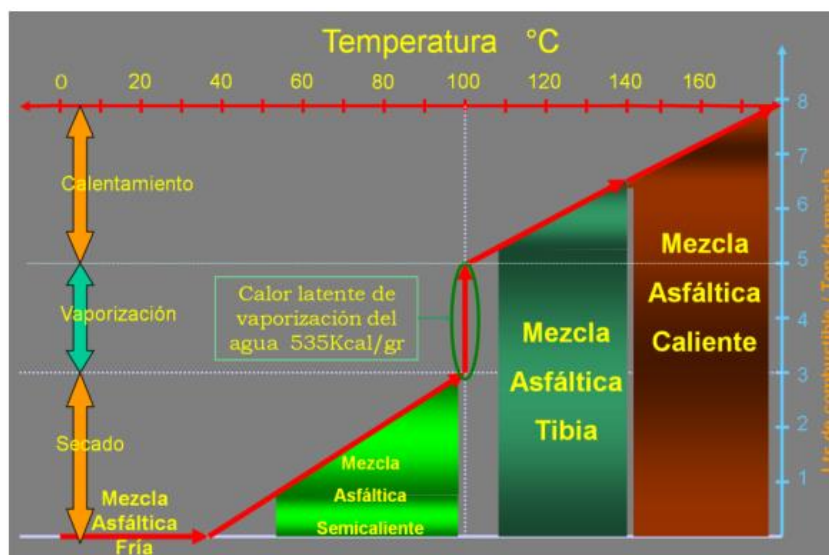
TIPO DE GRADUACIÓN	% QUE PASA POR EL TAMIZ N°8	DENOMINACIÓN
Densa	35-50	MDC
Semidensa	28-42	MSC
Gruesas	20-35	MGC
Mezclas de alto módulo	>50	MAM

Fuente: Adaptación de (Invias, 2013)

### 2.4.2.7 Por temperatura

Cabe anotar que en este documento sólo se desarrollarán las mezclas asfálticas clasificadas por temperatura, ya que son el objeto del presente estudio. En la figura 7 se pueden apreciar los cuatro rangos de temperatura en los cuales están clasificadas las mezclas asfálticas y la relación combustible – tonelada mezcla asfáltica para las mezclas.

**Figura 7.** Clasificación de las mezclas asfálticas según la temperatura



Fuente: (Lopera, 2011)

- **Mezclas asfálticas en frío (Cold Mixes –CM-).**

Las mezclas asfálticas en frío son las fabricadas a temperaturas entre los 0 y 40°C, para éstas se utilizan emulsiones asfálticas o asfaltos rebajados, su principal campo de aplicación es la construcción y conservación de carreteras de tráfico bajo o moderado. Son más propensas al envejecimiento por lo que se recomienda sellarlas con lechadas asfálticas (Gamboa, 2012)

- **Mezclas asfálticas semicalientes (Half-Warm Mix Asphalts –HWMA-)**

Este tipo de mezclas se caracteriza porque su temperatura de producción no supera en ningún momento la temperatura de ebullición del agua (100°C), la cual se controla en la mayoría de casos la humedad de los agregados (Gamboa, 2012).

- **Mezclas asfálticas tibias (Warm Mix Asphalts -WMA-)**

Son las mezclas que se producen a temperaturas entre los 100°C y los 135°C, involucra nuevas técnicas y productos en su fabricación, que tienen como fin disminuir el consumo energético y por lo tanto los costos de producción asociados, además permiten incrementar las distancias de transporte de la mezcla de la fábrica a la obra y mejoras en la trabajabilidad y compactabilidad. El uso de estas mezclas requiere un mayor cuidado en su preparación, debido a los efectos negativos que pueden ocasionar la adición de productos en la mezcla (Lopera, 2011).

- **Mezclas asfálticas en caliente (Hot Mix Asphalt –HMA-)**

Una mezcla de asfalto en caliente es aquella que la temperatura de fabricación está por encima de los 145°C. Se utiliza como material ligante un cemento asfáltico que no es fluido a temperatura ambiente, por tanto, requiere ser calentado a altas temperaturas hasta lograr disminuir su viscosidad a un valor requerido. En el proceso de elaboración es necesario calentar el agregado a temperaturas similares a las del ligante a fin de mantener la viscosidad y en ningún caso, la diferencia de temperatura entre el asfalto y los agregados debe ser mayor a 10 °C. (Celis , y otros, 2008).



Se utilizan para asfaltos rígidos y para carreteras de alto tránsito. Las mezclas en caliente son las que generan mayor impacto ambiental, debido en gran parte a su consumo energético y a la generación de COVs.

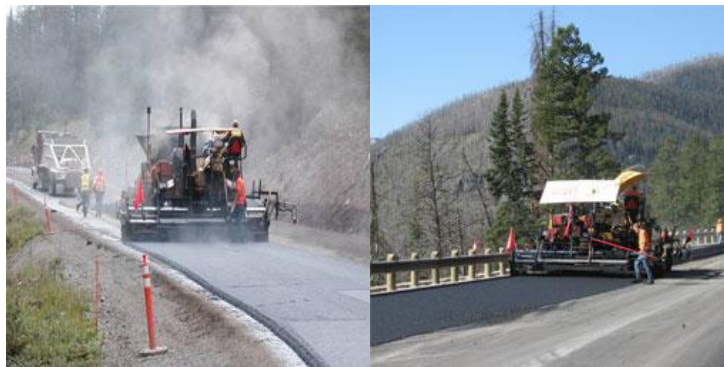
En las figuras 8 y 9 se presentan las diferencias visuales en la fabricación y colocación entre las mezclas tibias y las mezclas en caliente, se observa una mayor emisión de gases de efecto invernadero y COVs a la atmósfera.

**Figura 8.** Comparación de la descarga de mezclas asfálticas calientes y tibias



Mezcla caliente	Mezcla tibia
Temp 160 °C	Temp 121 °C
Fuente: (Corrigan, 2012)	

**Figura 9.** Efectos ambientales durante extendido mezclas asfálticas



Extendido de mezcla caliente.	Extendido de mezcla tibia.
-------------------------------	----------------------------

Fuente: (Torres y Noreña, 2012).

### **3 ACEITES USADOS**

Desde la invención de la rueda el hombre ha necesitado de sustancias lubricantes para facilitar el movimiento de ésta disminuyendo la fricción entre las partes componentes del sistema. Con la revolución industrial se aumentó el requerimiento de sustancias no solo con funciones lubricantes sino también térmicas, que permitieran mejorar la transferencia de calor entre fluidos ó disminuir la fricción entre piezas mecánicas. Con el uso de combustibles fósiles como fuente de energía de los motores de combustión interna, la demanda de aceites lubricantes ha aumentado de forma exponencial en los últimos siglos, creando una serie de pasivos ambientales por todo el planeta, debido en gran parte al desconocimiento de los efectos nocivos del aceite usado sobre los cuerpos de agua, suelo y salud humana. Es por ésto se deben plantear alternativas sostenibles y sustentables para el aprovechamiento ó reuso de estos aceites.

#### **3.1 Definición de aceite usado**

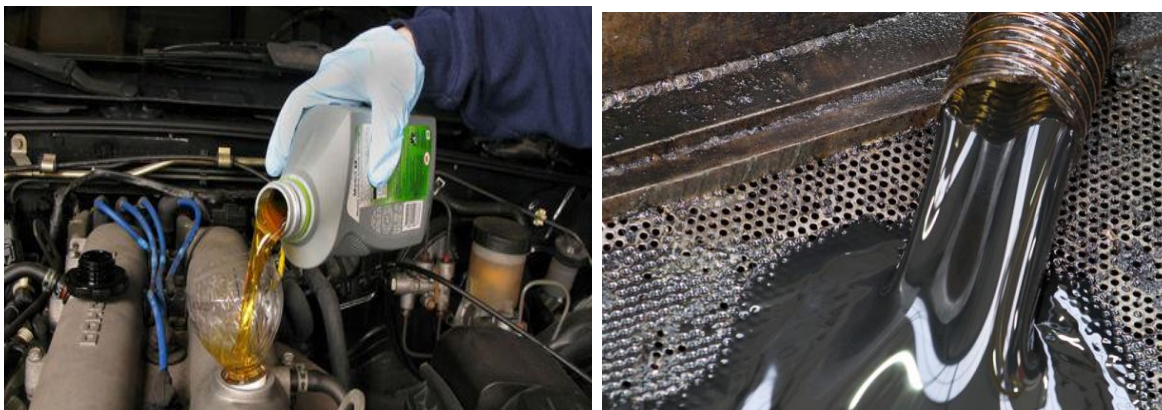
Según la legislación colombiana un aceite de desecho o usado es todo aceite lubricante, de motor, de transmisión o hidráulico con base mineral (cuando se obtiene del petróleo) o sintética (se obtiene por síntesis química) de desecho que, por efectos de su utilización, se haya vuelto inadecuado para el uso asignado inicialmente. (Ortiz, 2007)

Por sus características de inflamabilidad y toxicidad estos aceites son clasificados como residuo peligroso por el anexo I, numerales 8 y 9 del Convenio de Basilea, el cual fue ratificado por Colombia mediante la Ley 253 de enero 9 de 1996; por lo

anterior se les debe hacer un correcto tratamiento o disposición final que garantice la desactivación de su peligrosidad. (Ojeda, y otros, 2014)

Durante su utilización los aceites se contaminan con diferentes productos y materiales, además pierden parte de sus propiedades lubricantes o de transferencia de calor por las altas temperaturas a las cuales son sometidos; cuando ésto ocurre, tienen que ser reemplazados generando un residuo que denominamos aceite usado; el cual es un líquido viscoso de color negro que puede contener numerosas sustancias peligrosas disueltas en él como metales. En la figura 10 se muestra las características visuales del aceite nuevo y el aceite usado.

**Figura 10.** Apariencia del aceite de motor  
Izquierda: aceite de motor nuevo. Derecha: aceite de motor usado



Fuente: (MAPFRE, 2016)

### **3.2 Historia del arte de la gestión de aceites usados en Colombia.**

En los últimos 20 años la legislación ambiental en Colombia en materia de gestión de aceites usados ha evolucionado de forma acelerada con el fin de reducir los impactos generados por éstos sobre los cuerpos de agua y suelos. En la tabla 12 se presenta la cronología de esta evolución.

**Tabla 12.** Evolución en la gestión de aceites usados en Colombia

AÑO	DESCRIPCIÓN
1996	Se adopta el Convenio de Basilea por medio de la Ley 253 de 1996 para el manejo de residuos peligrosos y sustancias peligrosas, entre los que se incluyen los aceites minerales usados, catalogados así por la presencia de metales y metaloides como: plomo, cloro, bario, magnesio, fósforo, cromo, níquel, aluminio, cobre, estaño, azufre y los hidrocarburos aromáticos y polinucleares entre otros; éstos pueden causar impactos ambientales negativos al medio ambiente por bioacumulación y efectos tóxicos a los sistemas bióticos que pueden afectar los recursos naturales y la salud humana
2002	La Asociación Colombiana del Petróleo (ACP) crea el Fondo Voluntario para Aceites Usados (FAU), con el fin de promover e incentivar esquemas organizados de autogestión empresarial, con altos estándares ambientales para el adecuado manejo, aprovechamiento y disposición del aceite usado.
2005	Se establece el Decreto 4741 del 2005 para la gestión integral de residuos peligrosos desechos generados, en éste se clasifican los residuos de aceites usados mediante corrientes y actividades por medio de la siguiente nomenclatura: Y8/A3020: Desechos de aceites minerales no aptos para el reuso que estaban destinados Y9/A4060: Mezclas y emulsiones de desechos de aceites y agua con hidrocarburos.
2006	El Ministerio de Medio Ambiente divulga el Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados versión 1, en las diferentes etapas de manejo (acopio, empaque, embalaje, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final).
2007	Con el fin de establecer los lineamientos dados en el Decreto 4741 del 2005, el Ministerio de Medio Ambiente establece mediante la Resolución 1362 del 2007 los requisitos y el procedimiento para el registro de generadores de residuos o desechos peligrosos
2008	El FAU publica el primer informe de gestión de aceites del país. En Caldas la Corporación Autónoma de Caldas - Corpocaldas registra los primeros datos de gestión de aceites usados en el Departamento de Caldas.
2010	En la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín se realizan investigaciones del comportamiento del asfalto modificado con aceite de palma, donde se concluye que la máxima cantidad de aceite que se puede adicionar al asfalto es del 2%, para que no pierda las propiedades de resistencia. El Ministerio de Medio Ambiente regula los vertimientos alcantarillado y cuerpos de aguas superficiales mediante el decreto 3930 de 2015, limitando el uso de éstos como receptor de aceites y grasas.
2014	El Ministerio de Medio Ambiente actualiza el Manual Técnico para el Manejo de Aceites Lubricantes Usados versión 2 en las diferentes etapas de manejo (acopio, empaque, embalaje, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final). Se inaugura la mayor planta de recuperación de aceites de Colombia en el municipio de Girardota-Antioquia con una capacidad de procesamiento entre 15-20 mil galones/mes. Y en la cual se puede recuperar hasta un 70% del aceite. (Ecologista, 2016)

AÑO	DESCRIPCIÓN
2015	El Ministerio de Medio Ambiente mediante la resolución 631 de 2015 da los límites permisibles de hidrocarburos, grasas y aceites que pueden llegar a los alcantarillados y aguas superficiales tras previo tratamiento.

Fuente: Construcción propia

### 3.3 Propiedades y clasificación de los aceites usados en Colombia

#### 3.3.1 Composición de los aceites usados

Los aceites usados son una mezcla de hidrocarburos, se destacan los alcanos que son compuestos orgánicos de cadena lineal, los cicloalcanos que tienen los extremos de la cadena lineal unidos, formando un ciclo y los aromáticos que son hidrocarburos cíclicos con anillo conjugado. En la tabla 13. Se presenta la composición de hidrocarburos presentes en los aceites usados.

**Tabla 13.** Composición promedio de aceites base

TIPO DE SUSTANCIA	HIDROCARBURO	COMPOSICIÓN
Parafinas	Alcanos	45-75%
Naftalenos	Cicloalcanos	13-45%
Aromáticos	Aromáticos	10-30%

Fuente: (Ojeda, y otros, 2014)

#### 3.3.2 Elementos presentes en los aceites usados

Debido a que los aceites lubricantes y térmicos tienen contacto con piezas mecánicas (metales) y otras sustancias químicas, éstas se van incorporando lentamente en el fluido, por lo que las caracterizaciones de aceites usados presentan trazas de elementos que pueden ser nocivos para el medio ambiente y la salud humana como se observa en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Elementos contaminantes presentes en los aceites usados en Colombia

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (ppm)
Cloro, % en peso	0.17 - 0.47
S, % en peso	0.17 - 1.09
Zn, ppm	260 - 1787
Ca, ppm	211 - 2291
Ba, ppm	9 - 3906
P, ppm	319 - 1550
Pb, ppm	85 - 21676
Al, ppm	0.6 - 758
Fe, ppm	97 - 2411

Fuente: (UPME, 2001)

### 3.4 Clasificación del aceite usado de acuerdo con su procedencia

Las características fisicoquímicas del aceite usado varían considerablemente de acuerdo con su procedencia, se clasifican en dos grupos principales como se muestra en la tabla 15.

**Tabla 15.** Características de los aceites usados según su procedencia en Colombia



CARACTERÍSTICA	ACEITE USADO AUTOMOTOR	ACEITE USADO INDUSTRIAL
Viscosidad a 40°C, SSU	97-120	143-330
Gravedad a 15,6°C, °API	19-22	25,7-26.2
Peso específico a 15, 6°C	0.9396-0.8692	0.9002-0.8972
Agua % Vol	0,2-33.8	0.1-4.6
Sedimentos %Volumen	0.1-4.2	0
Insolubles en Benceno, % peso	0.56-33.3	0
Solubles en Gasolina %Vol	2.0-9.7	0
Punto de ignición	78-220 °C	157-179
Poder Calorífico, MJ/kg	31.560-44.880	40.120-41.840

Fuente: (UPME, 2001)

### 3.5 Clasificación de los aceites usados de acuerdo al decreto 4741 de 2005

Según el Decreto 4741 de 2005 los aceites usados se identifican como peligrosos de acuerdo con los anexos I (por proceso actividad) y II (por corriente de residuos), en la tabla 16 se detallan los aspectos relacionados con la identificación y características de peligrosidad de los aceites usados.

**Tabla 16.** Codificación de los aceites usados

CODIFICACION ANEXOS		DESCRIPCION	CARACTERISTICA CRETIB* PRCTOGRAMA DE IDENTIFICACIÓN
ANEXO I	ANEXO II		
Y8	A3020	Desechos de aceites minarales no aptos para el uso a que fueron destinados	
Y9	A4060	Mezclas y emulsiones de desechos de aceite y agua o de hidrocarburos y agua	

De acuerdo con el decreto 4741 de 2005 y la resolución 1609 de 2002  
Fuente: (Ojeda, y otros, 2014)

### 3.6 Clasificación de los aceites usados de acuerdo al mercado en Colombia

Debido a la falta de homogeneidad en las características fisicoquímicas de los aceites usados, los gestores se basan en tres ítems para su clasificación:

- Porcentaje de agua presente en el aceite. (Si requiere decantación).
- Cantidad de sedimentos. (Si presenta impurezas).
- Actividad de donde proviene el aceite. (Si tiene aditivos de difícil remoción)

Una vez se han analizado estos 3 parámetros, se procede a dar una calificación cualitativa al aceite usado.

**Tipo A.** Son los aceites usados de mayor valor comercial, contienen pocos sedimentos, agua y son homogéneos; éstos se obtienen cuando el generador del residuo tiene una corriente segregada de aceites y condiciones técnicas de almacenamiento. Para su reuso son re-refinados con el fin de tener bases de aceite con lo cual tienen un producto de mayor valor agregado. Para la comercialización estas bases recuperadas o recicladas se mezclan con productos vírgenes, en una proporción entre un 15% y 25% en volumen, con el fin de cumplir con los estándares de calidad exigidos por las productoras. (Juanchito, 2016)

**Tipo B.** Estos aceites tienen agua y material flotante, se da por malas condiciones de almacenamiento en el centro de acopio y las corrientes no están del todo definidas. Son usados como combustibles de calderas con sistemas de depuración de gases de media o de baja complejidad, se utilizan sistemas de filtración mecánica como pretratamiento para retirar los sólidos presentes. (Juanchito, 2016)

**Tipo C.** Son los aceites de menor valor comercial, son conformados por una mezcla de corrientes de hidrocarburos (pinturas, solventes, aceites de motor, grasas), no hay homogeneidad. Los gestores por lo general los usan en actividades de co-procesamiento, debido a que es más difícil su re-refinación. Se pueden usar como combustible en hornos cementeros con sistemas de depuración de gases complejos. (Juanchito, 2016).

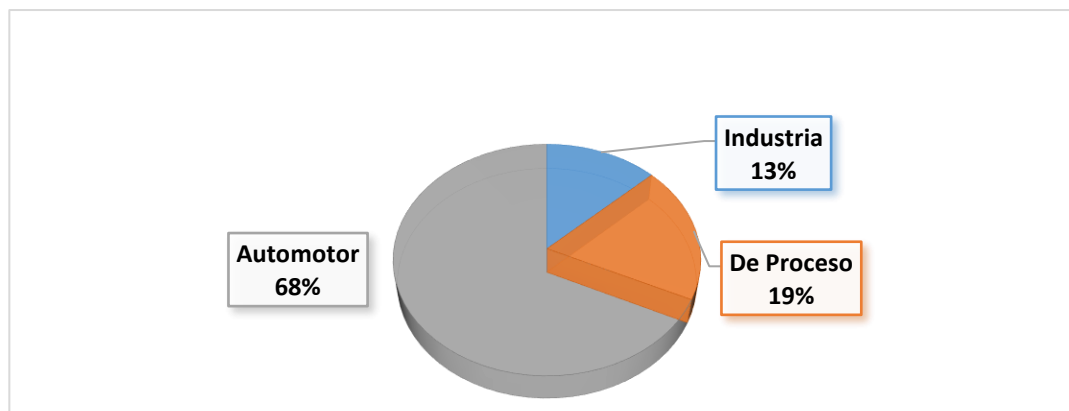
### **3.7 Generación de aceite usado en Colombia y su gestión**

En Colombia los aceites usados son uno de los principales pasivos ambientales en materia de residuos peligrosos (Respel), esto se debe a su gran volumen, a la alta distribución en todo el territorio Nacional, la falta de infraestructura para su correcto aprovechamiento, tratamiento o disposición final y el desconocimiento de empresas y particulares sobre los impactos ambientales negativos. En la figura 11 se presenta



la participación de los tres principales generadores de aceites usados, donde se observa que el sector automotor es el de mayor participación.

**Figura 11.** Aporte de los principales sectores económicos a la generación de aceites usados en Colombia



Fuente: (Ojeda, y otros, 2014)

Con la creación del Fondo Voluntario de Aceites Usados (FAU) se empieza una fuerte campaña a nivel industrial para el aprovechamiento, tratamiento y disposición final de aceites usados. A partir del año 2004 se obtienen los primeros indicadores de gestión del FAU con un aprovechamiento de aceites de 0,612 millones de galones, en el período 2005 a 2007 se presentó un incremento continuo en este indicador (Ramírez, 2016).

Para el año 2008 se evidenció un aumento considerable en la gestión debido en gran parte a la implementación del registro de generadores de Respel en cumplimiento de la Resolución 1362 de 2007 y al seguimiento del mismo por las Corporaciones Autónomas Regionales; otro factor que influyó en el aumento de la gestión de aceites usados fue el alto precio del petróleo durante el período 2008 a 2010, lo que incentivó el uso de combustibles alternativos.

En los últimos 5 años la gestión de aceites usados ha tenido un incremento gradual de aproximadamente 1 millón de galones al año, esto debido a la entrada en el mercado de nuevos gestores de residuos que han permitido que el aceite usado no

sea solo empleado como combustible en actividades de co-procesamiento, sino que se puedan recuperar los aceites bases para el reciclaje del mismo mediante la aplicación de tecnologías de re-refinación.

En los 13 años de la gestión del FAU se ha pasado de 0,6 millones de galones tratados o dispuestos correctamente a 15,08 millones, su evolución año a año se muestra en la figura 12, esto significa que en Colombia se recupera el 56,9% de los 26,5 millones susceptibles de aprovechamiento, con lo cual hay 11,42 millones de galones que pueden ser gestionados en procesos como el uso de aceites en mezclas asfálticas tibias (Ramírez, 2016).

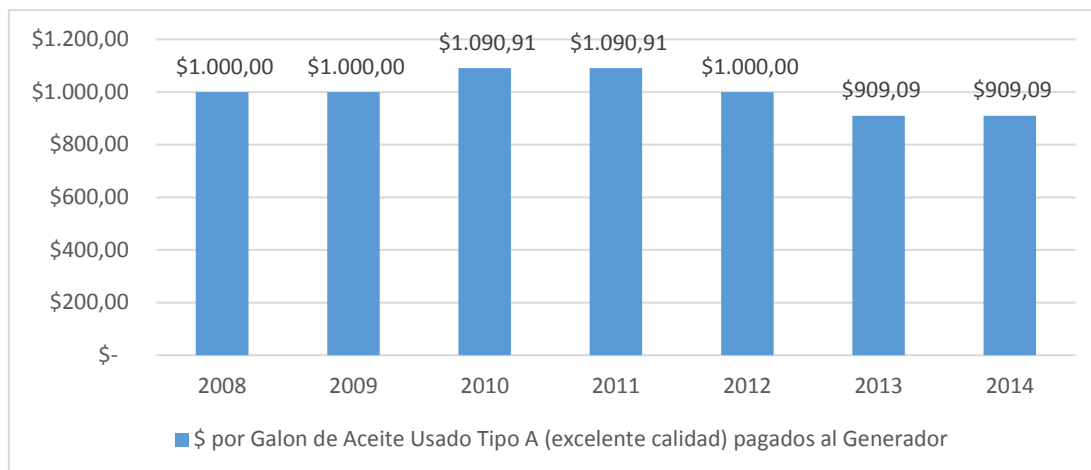
**Figura 12.** Volumen de aceite usado gestionado por operadores avalados



Fuente: Adaptado de (Ojeda, y otros, 2014) y (Ramírez, 2016)

Cabe anotar que en los últimos años el precio del aceite usado ha presentado un descenso, ésto se debe en gran medida a la sobreoferta del producto y al bajo precio del petróleo de los últimos años (Juanchito, 2016), tal como se aprecia en la figura 13.

**Figura 13.** Variación de precios de compra en Manizales del aceite usado tipo A en el período 2008 a 2014

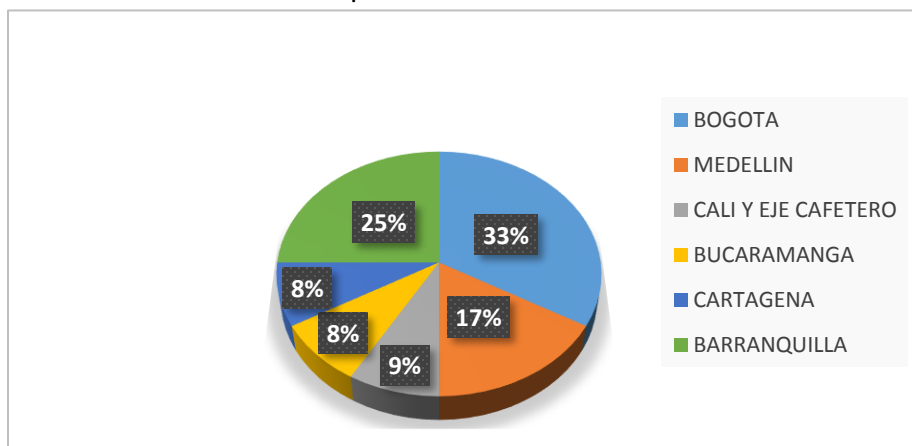


Fuente: Adaptado de (Juanchito, 2016)

Con el fin de garantizar una correcta Gestión Ambiental de los aceites usados, el FAU cuenta con gestores distribuidos en el territorio Nacional, todos con licencias ambientales o planes de manejo ambiental para el aprovechamiento de este tipo de residuos, certificados en normas internacionales como las ISO, OSHAS y RUC y con credibilidad ante las Corporaciones Autónomas Regionales y el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El gestor autorizado para el eje cafetero es Combustibles Juanchito Ltda., que realiza procesos de re-refinación. En la figura 14 se presenta la distribución de gestores avalados por la FAU por ciudades o regiones y su participación en la gestión en el mercado nacional.

**Figura 14.** Distribución por ciudad de los gestores de aceite usados avalados por la FAU-2015



Fuente: Adaptado de (Ramírez, 2016)

### 3.8 Gestión de aceites usados en Caldas

En principal gestor de aceites usados en Caldas es la empresa Combustibles Juanchito con sede en el Valle del Cauca, cuenta con la autorización de Corpocaldas en el expediente N°477; para el aprovechamiento de estos residuos utiliza los procesos de re-refinación. En la tabla 17 se presenta la gestión 2007-2015 de Combustible Juanchito en el departamento de Caldas.

Además, existen otros pequeños gestores de aceites usados de vehículos como es el caso de TECNIAMSA S.A. E.SP. El cual usa este tipo de residuos por co-procesamiento en su horno de incineración ubicado en el relleno sanitario de la ciudad de Manizales.

**Tabla 17.** Resumen de aceites usados gestionados en Caldas período 2007 – 2014

Año	Período	Nº de Tambores Gestionados	Galones Gestionados	Nº de Generadores recogidos	Total Galones Gestionados/año	Promedio Galones Gestionados Mensual
2007	Nov. a Enero	302	16.610	62	66.440	5.537
2008	Febrero – Abril	370	20.367	73	106.390	6.788
	Mayo – Julio	470	25.850	77		8.617
	Agosto a Oct.	545	29.983	104		9.994
	Nov. -Enero	549	30.195	107		10.065
2009	Febrero – Abril	653	35.917	112	137.162	11.972
	Mayo – Julio	580	31.930	120		10.643
	Agosto a Oct.	651	35.811	123		11.937
	Nov. -Enero	609	33.505	134		11.168
.2010	Febrero – Abril	no se reportó	no se reportó	no se reportó	156.673	no se reportó
	Mayo – Julio	664	36.561	156		12.187
	Agosto a Oct.	723	39.750	266		13.250
	Nov. -Enero	749	41.195	269		13.731
2011	Febrero – Abril	708	38.930	174	169.106	12.977
	Mayo – Julio	775	42.649	291		14.216
	Agosto a Oct.	775	42.649	316		14.216
	Nov. -Enero	816	44.880	334		14.960
2012	Febrero – Abril	788	43.344	232	163.939	14.448
	Mayo – Julio	790	43.452	216		14.484
	Agosto a Oct.	699	38.447	219		12.816
	Nov. -Enero	704	38.696	179		12.899
2013	Febrero – Abril	649	35.693	190	144.742	11.898
	Mayo – Julio	no se reportó	no se reportó	no se reportó		no se reportó
	Agosto a Oct.	638	35.074	173		11.691
	Nov. -Enero	687	37.789	164		12.596
2014	Febrero – Abril	612	33.679	160	147.801	11.226
	Mayo – Julio	641	35.257	154		11.752
	Agosto a Oct.	708	38.917	186		12.972
	Nov. -Enero	726	39.948	173		13.316
2015	Febrero a Abril	700	38.519	188	154.077 (*)	12.840

Fuente: Adaptado de (Corpocaldas, 2015)

(\*) Proyección

Según este reporte la gestión de aceites usados en el Departamento de Caldas no presenta un incremento considerable desde el año 2009 y su participación en la gestión nacional ha ido decreciendo considerablemente tal como se aprecia en la

Tabla 18; esta situación lleva a plantearse que está pasando en el Departamento con la gestión de estos residuos y concluir que esto puede suceder por deficientes controles por parte de la Corporación Autónoma Regional hacia los generadores y al mercado negro del aceite para su uso como combustible en trapiches de panela ubicados en el municipio de Supía. (Cadavid, 2016).

**Tabla 18.** Gestión de aceites usados en Caldas con respecto a Colombia

Período	Aceite usado gestionado en Colombia (Millones de galones)	Aceite usado gestionado en Caldas (Millones de galones)	% Participación Caldas en la gestión nacional
2007	0,86	0,066	3.57
2008	5,99	0,106	1.78
2009	7,84	0,137	1.75
2010	11,12	0,157	1.41
2011	11,66	0,169	1.45
2012	13,10	0,164	1.25
2013	14,07	0,145	1.03
2014	15,08	0,148	0.98

Fuente: Adaptado de (Ramírez, 2016) y (Corpocaldas, 2015)

### 3.9 Alternativas para el aprovechamiento de aceites usados

#### 3.9.1 Combustión

Los aceites usados pueden usarse como combustible, mediante aprovechamiento energético en procesos productivos de cemento y en el cual se garantice tanto la destrucción de los componentes orgánicos presentes en el aceite lubricante y la disposición de sus cenizas debe hacerse garantizando el encapsulamiento de metales y metaloides.

#### 3.9.2 Incineración

Consiste en someter el aceite usado a un proceso de combustión completa en instalaciones adecuadas, para convertir los distintos componentes contenidos como gases y residuos inertes (cenizas y escorias). Las ventajas y desventajas de este proceso se presentan en la tabla 19.

**Tabla 19.** Ventajas y desventajas de la incineración de aceites usados

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Máxima reducción de volumen.	- Es una tecnología costosa.
- Reducción de compuestos orgánicos tóxicos.	- Requiere dispositivos especiales para control de gases para cumplir regulaciones sobre emisiones.
- Posible recuperación de energía.	- Requiere un procedimiento para la disposición final de las escorias.

Fuente: (Minambiente, 2006)

### 3.9.3 Encapsulamiento en el Clinker

Consiste en incinerar el aceite en hornos cementeros y lograr que los metales volátiles se precipiten y se incorporen en la matriz del cemento en condiciones normales. En la tabla 20 se presentan las ventajas y desventajas de la tecnología Clinker

**Tabla 20.** Ventajas y desventajas del encapsulamiento en Clinker del aceite usado

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Existen antecedentes de utilización de esta tecnología en la quema de residuos peligrosos similares.	- Los metales pesados no se destruyen, sino que se incorporan en la matriz del cemento.
- Permite el aprovechamiento del residuo.	

Fuente: (Minambiente, 2006)

### 3.9.4 Vitrificación, ceramización y encapsulación

Las tecnologías actuales para la disposición final de residuos peligrosos consideran la vitrificación o ceramización como el método más seguro para el logro de este objetivo.

Consiste en la confinación de un residuo en un medio receptor. Si el residuo entra a formar parte íntima del nuevo compuesto se llama ceramización ó vitrificación y es la verdadera inertización del residuo. Pero si el residuo solo es retenido físicamente, sin cambio de morfológico o químico, se habla de encapsulamiento y

dependerá de la estabilidad propia del residuo en el medio y resistencia. Las ventajas y desventajas se presentan en la tabla 21.

**Tabla 21.** Ventajas y desventajas del encapsulamiento y vitrificación

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Es la tecnología universalmente más segura para la inertización de residuos peligrosos.	- Hasta ahora no se conocen antecedentes de implementación de esta tecnología en Colombia.
- La posibilidad de lixiviados es relativamente nula.	- Es costosa.

Fuente: (Minambiente, 2006)

### 3.9.5 Re-refinación

Se realiza el aprovechamiento del aceite usado mediante su re-refinación a través de tratamientos fisicoquímicos para obtener combustible, como dato importante se ha de considerar que en promedio en Europa más del 70% de los aceites usados recuperables es recolectado para su aprovechamiento en uso energético.

La regeneración de aceites usados es la operación mediante la cual se obtienen de los aceites usados un nuevo aceite base comercializable. Como el aceite usado sigue siendo en esencia un conjunto de hidrocarburos con una serie de agentes contaminantes, se podrá volver a refinar y obtener un aceite base de igual o superior calidad que la del aceite virgen procedente del refinado original. Actualmente existen diferentes tecnologías para la producción de aceite base a partir de aceites usados y aunque todas ellas tienen unos objetivos comunes, cada una solventa técnicamente el problema de forma diferente. Un proceso de regeneración puede dividirse en cuatro fases: • Pretratamiento • Limpieza • Fraccionamiento • Acabado

### 3.9.6 Recuperación de bases lubricantes

Las bases lubricantes que tienen los aceites usados se pueden recuperar y luego ser utilizadas para la fabricación de aceites lubricantes.



Existen varios métodos de re-refinación de los aceites usados que buscan obtener una base lubricante mediante procesos fisicoquímicos:

- Proceso convencional ácido – arcilla
- Proceso Meinken
- Extracción por solvente
- Proceso KTI (Kinetics Technology International)
- Proceso BERK

### 3.9.7 Adición a mezclas asfálticas

Consiste en la adición de aceite usado como material llenante. Los metales pesados presentes en el aceite se incorporan a los poros de los agregados finos de la mezcla logrando un encapsulamiento de los contaminantes. La cantidad de aceite depende de la subrasante presente y del tipo de obra a realizar, el aceite puede ser incorporado para mezclas tibias ó calientes. Tiene como desventaja que los factores ambientales externos (agua, lluvia, condensación, etc.) pueden producir una lixiviación de metales y las fisuras en la mezcla pueden llevar a un envejecimiento acelerado de la mezcla asfáltica. Actualmente no hay una posición clara al respecto y se desarrollan investigaciones sobre posible lixiviación de estos compuestos metálicos, especialmente en mezclas asfálticas ya envejecidas. Las ventajas y desventajas se presentan en la tabla 22.

**Tabla 22.** Ventajas y desventajas del uso de aceites usados en mezclas asfálticas

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Es una alternativa muy sencilla y su utilización no implica costos adicionales.	- Es una técnica poco conocida debido a que su utilización no ha sido muy difundida.
- No requiere de mano de obra calificada para su implementación.	- Existe posible riesgo de lixiviación.
- Los metales pesados quedan encapsulados dentro de la mezcla asfáltica, reduciendo sustancialmente su peligrosidad.	

Fuente: (Minambiente, 2006)

## 4 METODOLOGIA

Con el fin de conocer el comportamiento en laboratorio de las mezclas asfálticas fabricadas con asfalto modificado con aceite usado se realizaron los siguientes ensayos:

- Preparación de asfaltos modificados con diferentes concentraciones aceites usados.
- Realización de ensayos de viscosidad para construir las curvas reológicas.
- Realización de pruebas Marshall para con el fin de encontrar el contenido óptimo de asfalto modificado y espacios vacíos en las mezclas asfálticas que cumplan con la norma INVIAS.

### 4.1 Preparación de asfaltos a diferentes concentraciones de aceite usado

Se prepararon 9 muestras de asfaltos modificados con aceite usado en los porcentajes en peso que se muestran a continuación:

- Asfalto 100% en peso
- Asfalto 99,5% y Aceite Usado 0.5% en peso
- Asfalto 99,0% y Aceite Usado 1.0% en peso
- Asfalto 98,5% y Aceite Usado 1.5% en peso
- Asfalto 98,0% y Aceite Usado 2.0% en peso
- Asfalto 97,5% y Aceite Usado 2.5% en peso
- Asfalto 97,0% y Aceite Usado 3.0% en peso
- Asfalto 96,0% y Aceite Usado 4.0% en peso
- Asfalto 94,0% y Aceite Usado 6.0% en peso

Estas composiciones se establecieron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en estudios similares, como el citado en la bibliografía (Abdullah, y otros, 2014) donde se realizaron ensayos con asfaltos 80/100 modificados con aceites usados de motor en concentraciones del 0%, 1%, 2% y 3% en peso.

Se tomó como base para los ensayos el asfalto 60/70 suministrado por la empresa Incoasfaltos, el cual posee las siguientes características (Incoasfaltos, 2016):

- Temperatura de mezcla: 153-149°C
- Temperatura de compactación: 145-141°C
- Expresión de la curva reológica:

$$\log \gamma = -0,0305 * T + 3,8326$$

$$\gamma = 10^{-0,0305 * T + 3,8326}$$

donde:

$\gamma = \text{viscosidad (Pa * s)}$

$T = \text{temperatura (}^{\circ}\text{C)}$ .

Para la preparación de los asfaltos modificados se pesó la cantidad requerida del asfalto 60-70 en una balanza digital, posteriormente se sometió a calentamiento hasta los 110°C en un Erlenmeyer de 250 ml, garantizando que todo el asfalto esté totalmente fluidizado; luego usando la balanza se pesó la cantidad de aceite usado requerido para la composición a elaborar y se agregó al asfalto caliente, se procedió a la agitación periódicamente de 1 minuto cada 5 minutos hasta alcanzar los 20 minutos manteniendo el asfalto modificado a 110°C. Con el fin de lograr una homogeneidad en el asfalto modificado en los intervalos de no agitación se tapó el Erlenmeyer con el fin de evitar el escape de COVs. Por último, el asfalto modificado se dejó de un día para otro a temperatura ambiente. En la figura 15 se presenta esta actividad realizada.

**Figura 15.** Preparación de los asfaltos modificados con aceite usado



Fuente: propia

## 4.2 Viscosidad de asfaltos modificados

Con el fin de determinar el estado de fluidez de los asfaltos modificados a las temperaturas a las cuales se van a fabricar y compactar las mezclas asfálticas en campo, se utilizaron los equipos y procedimientos descritos en las normas ASTM E102 Viscosidad Saybolt-Furol y I.N.V. E-714-07 Viscosidad Saybolt de asfaltos como referencias.

### 4.2.1 Metodología para el cálculo de la viscosidad

Se coloca un tubo normalizado cerrado con un tapón de corcho con una cantidad de específica de asfalto, como las temperaturas a las cuales se fluidiza el asfalto son superiores a 100°C, se utiliza un baño de temperatura constante en el viscosímetro utilizando como medio para la transferencia de calor aceite térmico multigrado.

Cuando el asfalto ha alcanzado la temperatura establecida se quita el tapón y se mide el tiempo en segundos requerido para hacer que 60 ml de asfalto pasen a través del orificio Furol (1/8").

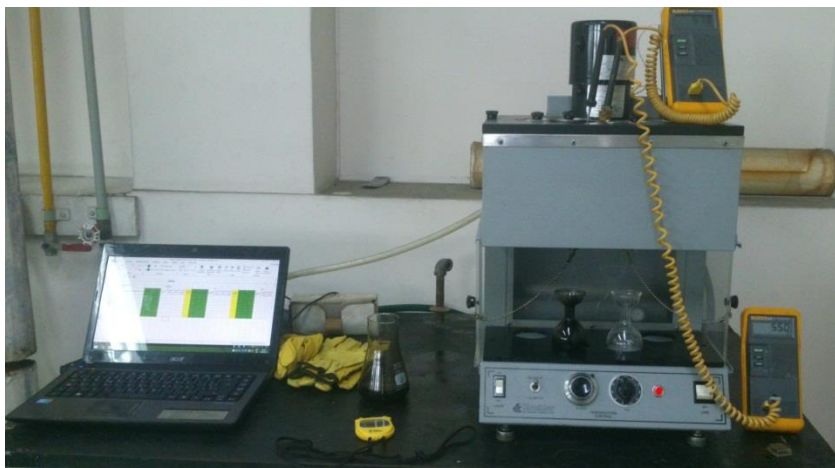
Una vez se tienen el dato de los *Segundos Universal Saybolt-Furol* (SSF), se procede a su conversión a viscosidad cinemática, mediante la expresión (INVIAS, 2007).

$$v = SSF/0.4717$$

Donde: la viscosidad cinemática en cSt y SSF esta dado en segundos

Las pruebas se realizaron en un intervalo de temperaturas entre 80 y 130 °C para cada uno de los asfaltos modificados mencionados anteriormente. En la figura 16 se presenta el montaje realizado para la toma de datos de viscosidad.

**Figura 16.** Montaje para la toma de muestras a diferentes concentraciones



Fuente: Propia

### 4.3 Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas en caliente

La metodología Marshall fue desarrollada por Bruce Marshall, con el fin de permitir el diseño de mezclas asfálticas en laboratorio y el control de calidad en campo, es un método empírico que requiere que se respete en su totalidad su procedimiento para no perder su significado. (Vásquez Varela, 2015)

#### **4.3.1 Objetivo del método Marshall.**

Establecer el contenido óptimo de asfalto por medio de la experiencia, formulación ó por la relación polvo-asfalto.

#### **4.3.2 Metodología para encontrar el porcentaje de asfalto óptimo.**

Para cada uno de los asfaltos modificados se elaboraron 5 muestras con diferentes contenidos de asfalto así: una en el valor estimado, 2 por encima y 2 por debajo de éste, con incrementos del 0,5% de asfalto, para cada muestra se elaboran 3 especímenes. Los agregados deben secarse a 105°C y 110°C y las temperaturas de mezclado deben corresponder a 170+20 cSt y la de compactación a 280+30 cSt. (Vásquez Varela, 2015)

#### **4.3.3 Características del método Marshall.**

Permite el análisis del peso unitario y vacíos de los especímenes una vez compactados, la estabilidad de resistencia máxima a 60 °C (libras) y la deformación total (flujo) en el espécimen dada en pulgadas.

#### **4.3.4 Preparación de especímenes.**

Una vez obtenidas las curvas reológicas, se seleccionaron 5 de las 9 muestras analizadas inicialmente:

- Asfalto 100% en peso
- Asfalto 98,5% y Aceite Usado 1.5% en peso
- Asfalto 98,0% y Aceite Usado 2.0% en peso
- Asfalto 97,5% y Aceite Usado 2.5% en peso
- Asfalto 94,0% y Aceite Usado 6.0% en peso

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de pavimentos de la empresa Proyectos de Infraestructura S.A. en la ciudad de Bogotá, con ésto se garantizó la imparcialidad y exactitud en los resultados de estas pruebas. En la figura 17 se

presenta la preparación y rotulación de los asfaltos modificados seleccionados para la realización de los ensayos Marshall.

**Figura 17.** Preparación de asfaltos modificados para las realizacion de pruebas Marshall



Fuente: Propia

#### **4.4 Criterios de INVIAS para la aceptación de mezclas asfálticas calientes de degradación continua bajo la metodología Marshall.**

Todos los componentes de la mezcla asfáltica deben cumplir con las especificaciones dadas por INVIAS en la norma 450-2013 como se muestra en la tabla 23. De lo contrario el lote no podrá ser usado en la construcción de carreteras.

**Tabla 23.** Criterios de diseño de mezclas de gradación continua por el método Marshall para Colombia.

CARACTERÍSTICA	NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO	
		CATEGORÍA DE TRANSITO				
		NT1	NT2	NT3		
Compactación (golpes/cara)	E - 748 (E-800)	50	75 (112)	75 (112)	75	
Estabilidad mínima (N)		5.000	7.500 (16.875)	9.000 (33.750)	15.000	
Flujo (mm)		2,0 a 4,0	2,0 a 4,0 (3,0 a 6,0)	2,0 a 3,5 (3,0 a 5,3)	2,0 a 3,0	
Relación Estabilidad/flujo (kN7mm)		2,0 a 4,0	3,0 a 5,0 (4,5 a 7,5)	3,0 a 6,0 (4,5 a 9,0)	-	
Vacios con aire	Rodadura	E - 736	3,0 a 6,0	3,0 a 5,0	4,0 a 6,0	NA
(Va) %	Intermedia	ó	4,0 a 8,0	4,0 a 7,0	4,0 a 7,0	4,0 a 6,0
(Nota 3)	Base	E - 799	NA	5,0 a 8,0	5,0 a 8,0	4,0 a 6,0
Vacios en los agregados	T.Máx 38 mm	E - 799	13,0			
minerales	T.Máx 25 mm		14,0			14,0
(VAM),% mínimo	T.Máx 19 mm		15,0			
	T.Máx 10 mm		16,0			
Vacios llenos de asfalto (VFA)%		E - 799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75
Relación Llenante/ligante efectivo, en peso		E - 799	0,8 a 1,2			1,2 a 1,4
Concentración del llenante, valor máximo		E - 745	Valor crítico			
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey		-	Reportar			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo		E -741	7,5			

Fuente: (Invias, 2013).



## **5 ANALISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

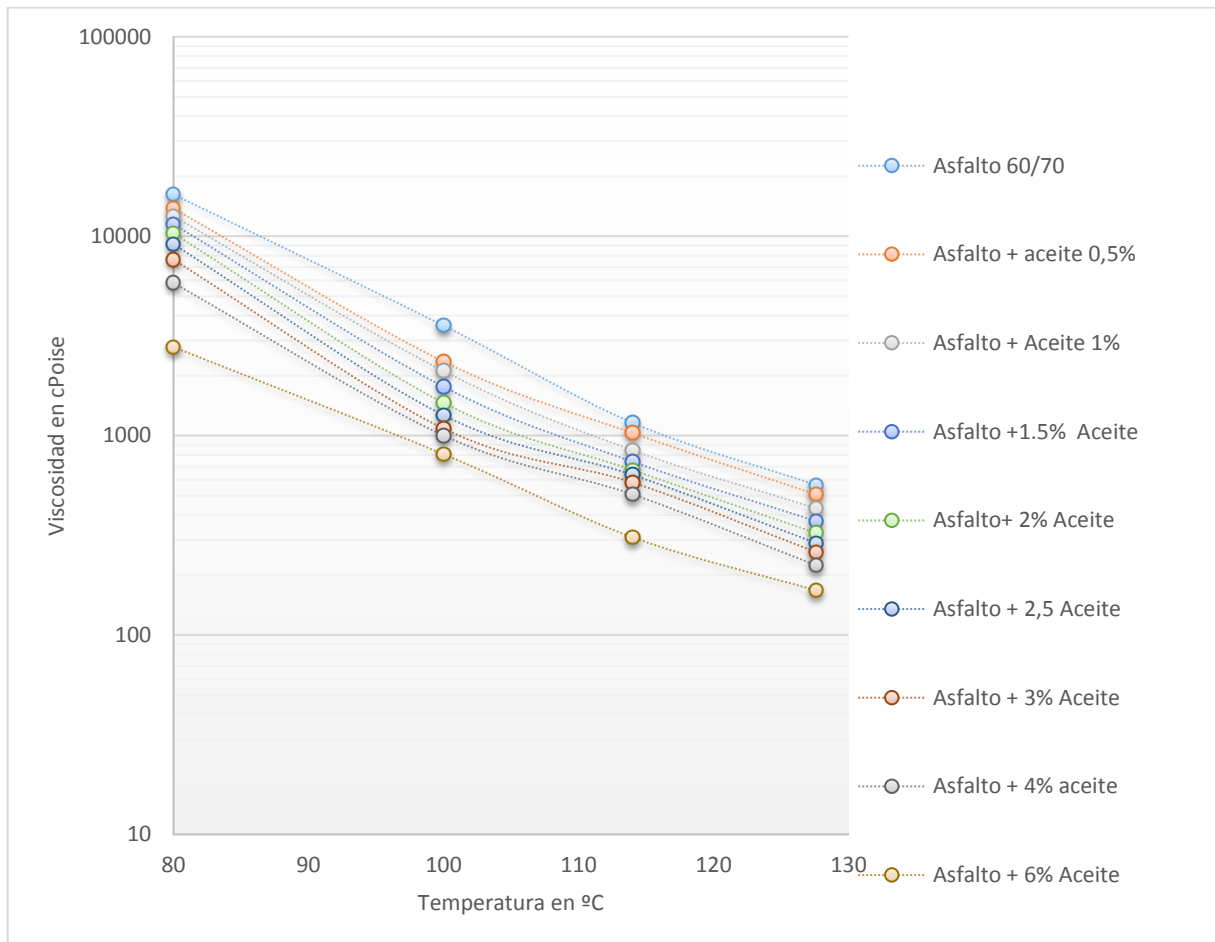
### **5.1 Análisis de resultados de asfaltos modificados**

#### **5.1.1 Curva reológica**

Para determinar el comportamiento de la viscosidad de las diferentes mezclas de asfalto aceite, así como de los materiales puros, se realizaron 9 ensayos con el viscosímetro de Saybolt-Furol en un rango de temperaturas de 80°C a 127.6°C; el rango de temperatura fue la principal limitante para el ensayo, ya que el equipo alcanzó como temperatura máxima esta última, y a temperaturas menores a 80°C el fluido no circula por el orificio de Furol (1/8”).

Como era de esperarse a medida que se incrementa la cantidad de aceite en el asfalto esté se vuelve más fluido y por lo tanto su viscosidad disminuye, si comparamos el asfalto 60-70 puro con los otros asfaltos. Tal como se muestra en la figura 18.

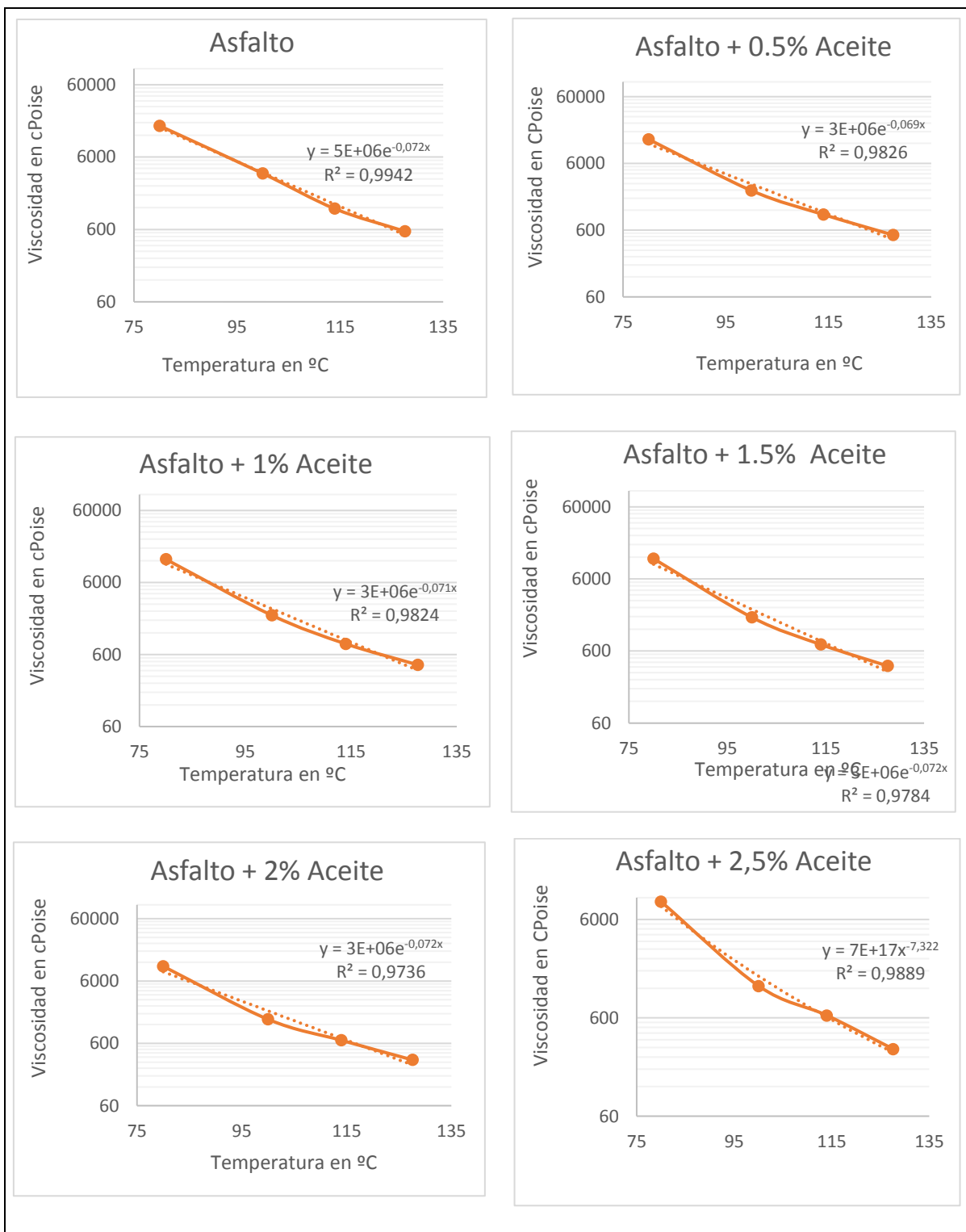
**Figura 18.** Curvas reológicas de los asfaltos modificados en el laboratorio

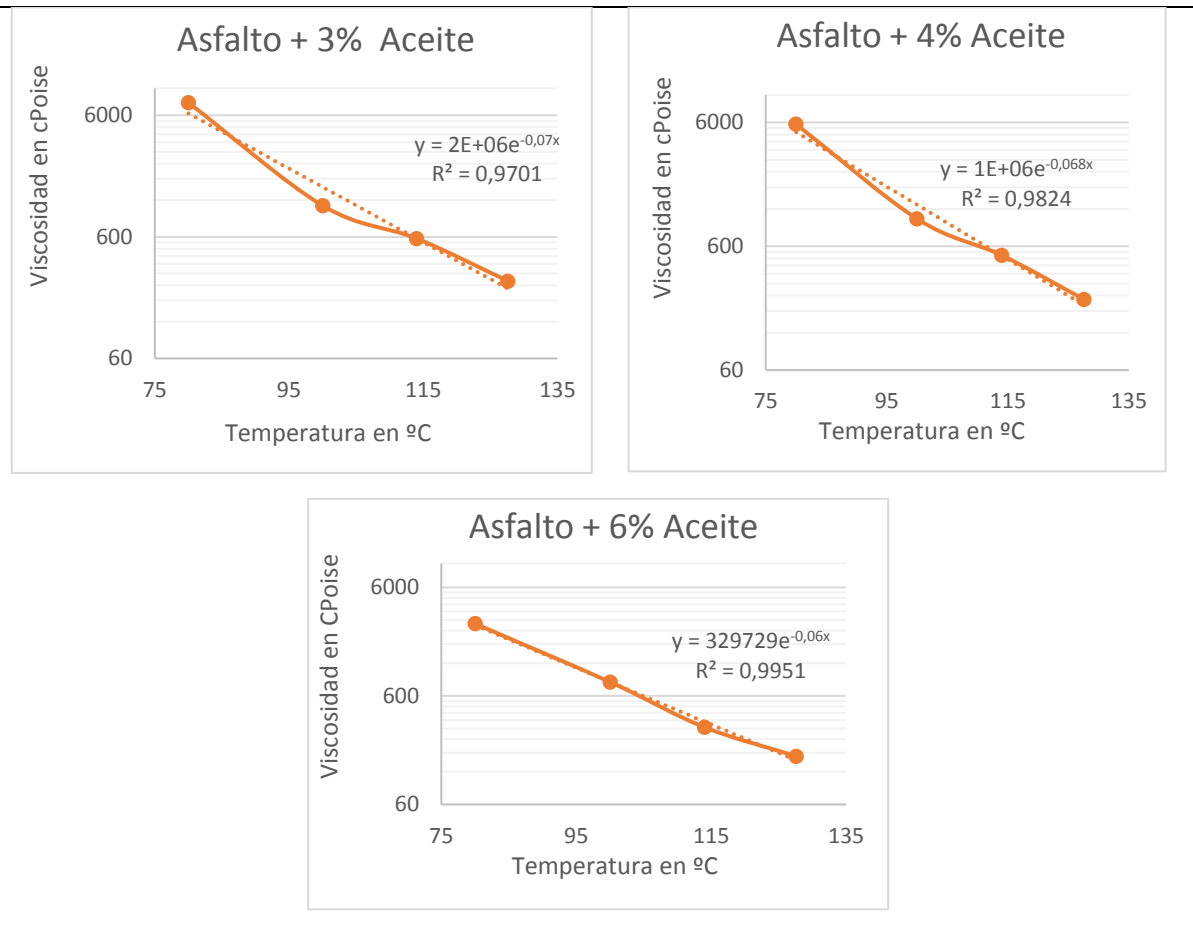


Fuente: Propia

Estas limitaciones no permitieron calcular de forma directa las viscosidades para cada uno de los tipos de asfaltos modificados con aceite usado para temperaturas superiores a 130°C, por lo que se extrapolaron usando las correlaciones exponenciales de cada uno de los especímenes, en la figura 19 se muestran las ecuaciones encontradas.

**Figura 19.** Correlaciones para la construcción del modelo predictivo de viscosidad para asfalto 60-70 puro y asfaltos modificados



Continuación **Figura 19**

Fuente: Propia

Utilizando estas ecuaciones se realizó la predicción del comportamiento de la viscosidad a temperaturas superiores a los 130°C. La cual se resume en la tabla 24.

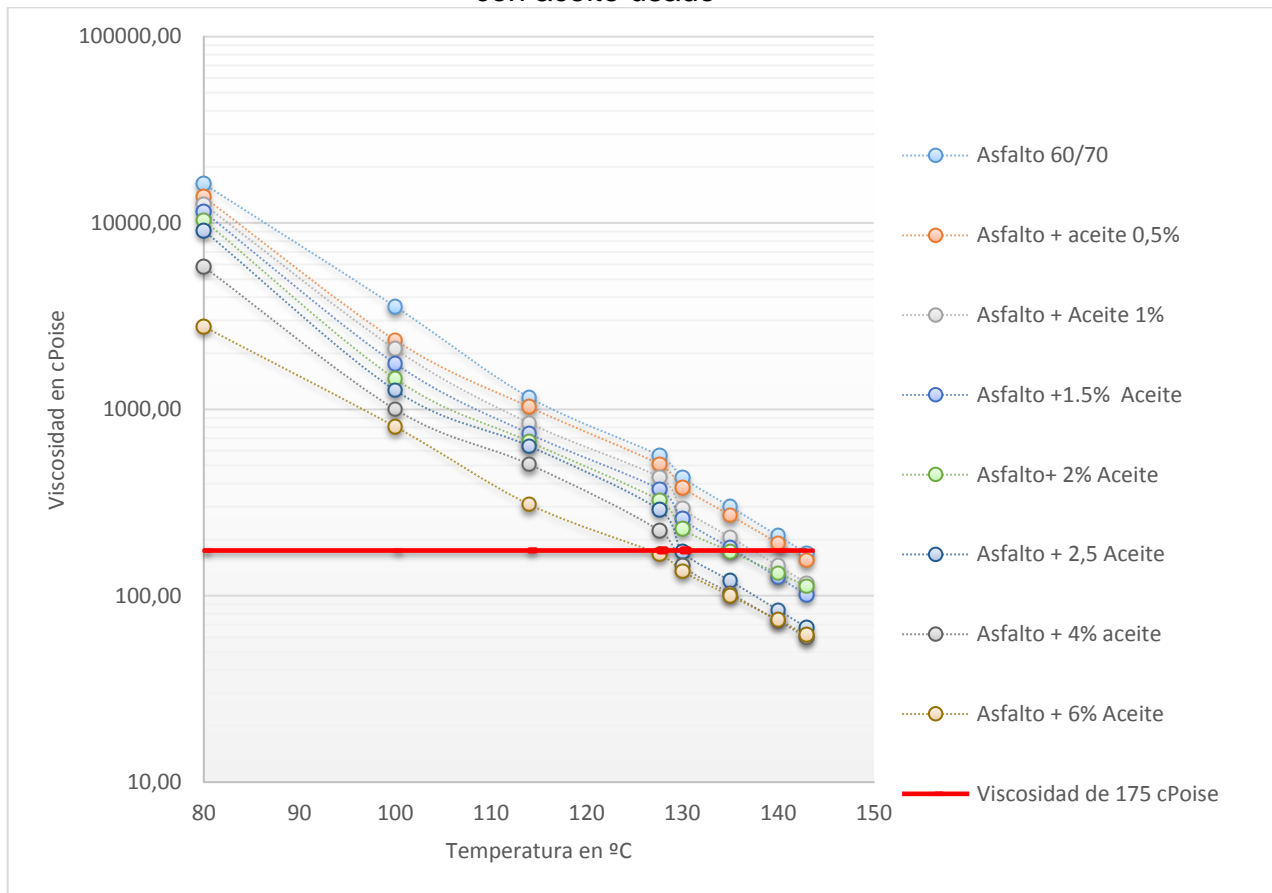
**Tabla 24.** Cálculo de la viscosidad para los asfaltos modificados

		Temperatura (°C)								
		60	80	100	114	127,6	130	135	140	143
<b>Porcentaje de aceite</b>	<b>0</b>	189583,0	16206,0	3562,0	1159,4	564,9	430,5	300,4	209,6	168,8
	<b>0,5</b>	No Fluye	13779,2	2350,5	1030,1	507,3	381,5	270,2	191,4	155,6
	<b>1</b>	No Fluye	12592,8	2107,2	844,2	432,0	294,2	206,3	144,6	116,9
	<b>1,5</b>	No Fluye	11483,8	1759,7	740,3	372,3	258,3	180,2	125,7	101,3
	<b>2</b>	No Fluye	10330,2	1458,6	671,5	324,8	228,5	172,9	132,1	112,9
	<b>2,5</b>	No Fluye	9108,9	1265,6	635,4	289,2	172,2	120,1	83,8	67,5
	<b>4</b>	No Fluye	5825,4	1000,6	507,3	223,6	144,8	103,1	73,4	59,8
	<b>6</b>	No Fluye	2779,0	806,9	309,1	167,1	135,1	100,1	74,2	61,9
	<b>100</b>		51,8	28,0	22,6	21,9	19,8	19,2	18,6	17,9

Fuente: Propia

De la figura 20 se concluye que en la medida que se adiciona aceite usado al asfalto, la viscosidad óptima para la fabricación de mezclas asfálticas se alcanza a menor temperatura.

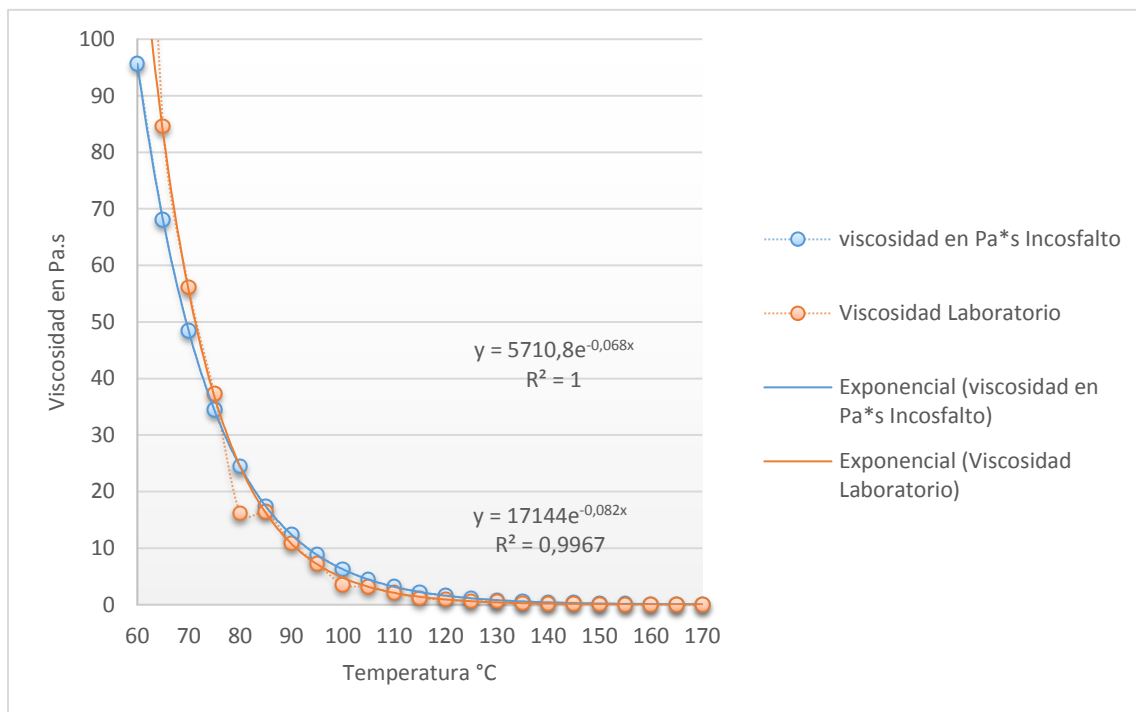
**Figura 20.** Curvas reológicas extrapoladas para asfaltos modificados con aceite usado



Fuente: Propia

Con el fin de comprobar si el método usado en el laboratorio para determinar la viscosidad de los asfaltos es apropiado, se compararon las curvas reológicas del asfalto 60-70 reportada por Incoasfaltos (viscosidad teórica) y los datos hallados en el laboratorio para este estudio para la muestra del asfalto 60-70. Con base en la información teórica y los datos de laboratorio se construyeron las curvas de viscosidad vs temperatura, comprobando la similitud entre ambas como se muestra en la figura 21.

**Figura 21.** Comportamiento reológico del asfalto 60-70  
Verificación datos laboratorio vs ficha técnica Incoasfaltos.



Fuente: Propia

### 5.1.2 Temperaturas de agregados, fabricación y compactación

La disminución en la viscosidad por la adición de aceite usado muestra una reducción en las temperaturas requeridas para la fabricación en laboratorio de mezclas asfálticas, generando una disminución en la temperatura óptima para agregados, mezcla y compactación como se presenta en la tabla 15.

**Tabla 25.** Temperatura óptima para agregados, mezcla y compactación de mezclas asfálticas modificadas con aceite usado

Temperatura °C	Tipo de asfalto modificado con aceite				
	60/70 convencional	1,5%	2,0%	2,5%	6,0%
<b>Agregados</b>	160	150	145	140	135
<b>Mezcla</b>	150	140	135	130	125
<b>Compactación</b>	137	130	127	123	118

Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.1.3 Caracterización del asfalto

La caracterización del asfalto convencional y modificado permitió determinar que a mayor cantidad de aceite adicionado mayor es la susceptibilidad térmica de éstos. Al comparar los resultados de la tabla 26 se observó que la penetración de los asfaltos modificados va aumentando en la medida que se adiciona aceite, comportándose como asfaltos blandos en el caso del 6%, situación similar ocurre con el punto de ablandamiento el cual está dentro del rango 42 – 52 característico del asfalto 80/100; el índice de penetración está por fuera del rango permitido para cualquier tipo de asfalto.

**Tabla 26.** Caracterización del asfalto 60 – 70 y asfaltos modificados con aceite

ENSAYO	Asfalto	Asfalto modificado con aceite usado				Especificación 60/70	
	60-70	1,50%	2,00%	2,50%	6%	MÍN	MÁX
Penetración	64	43	50	57	95	60	70
Punto de ablandamiento	49,5	47,5	45,0	44,5	40,0	45	55
Índice de penetración	-0,70	-2,16	-2,53	-2,40	-2,67	-1,00	1,00
Gravedad Especifica del Asfalto (Gb)	1,018	1,023	1,020	0,995	0,984		

Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.2 Caracterización de agregados

Siguiendo con las especificaciones dadas por la norma INVIAS 450 de 2013 para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua que incluye el tipo MDC-19 del 2013, se realizaron las pruebas granulométricas para la caracterización de los agregados gruesos y finos. Obteniéndose un 44% de agregados gruesos y un 56% de finos tal como se muestra en la tabla 27.



**Tabla 27.** Granulometría de los agregados utilizados

FORMULA DE TRABAJO										
Peso Inicial (g)		2435,7	Peso Final (g)				2313,5			
Tamiz		Peso		% retenido	% Acum	% pasa	HUSO	Norma		
Pulgadas	Milímetros	Retenido (g)						MDC-19 (2013)		
3/4"	19,00	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
1/2"	12,50	243,5	10,0	10,0	90,0	86,0	94,0	80,0	95,0	
3/8"	9,50	194,6	8,0	18,0	82,0	78,0	86,0	70,0	88,0	
N° 4	4,75	633,3	26,0	44,0	56,0	52,0	60,0	49,0	65,0	
N° 10	2,00	535,8	22,0	66,0	34,0	31,0	37,0	29,0	45,0	
N° 40	0,425	389,7	16,0	82,0	18,0	15,0	21,0	14,0	25,0	
N° 80	0,180	170,5	7,0	89,0	11,0	8,0	14,0	8,0	17,0	
N° 200	0,075	146,1	6,0	95,0	5,0	4,0	6,0	4,0	8,0	

Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.3 Resultados pruebas Marshall

Con el fin de conocer el comportamiento mediante la metodología Marshall se seleccionaron de 5 tipos de asfaltos, el asfalto puro 60-70 y las composiciones cercanas al 2%, ésto porque según la bibliografía consultada éstas tienen comportamiento aceptable, y la del 6% con el fin de conocer el comportamiento extremo cuando se aplica aceite en exceso.

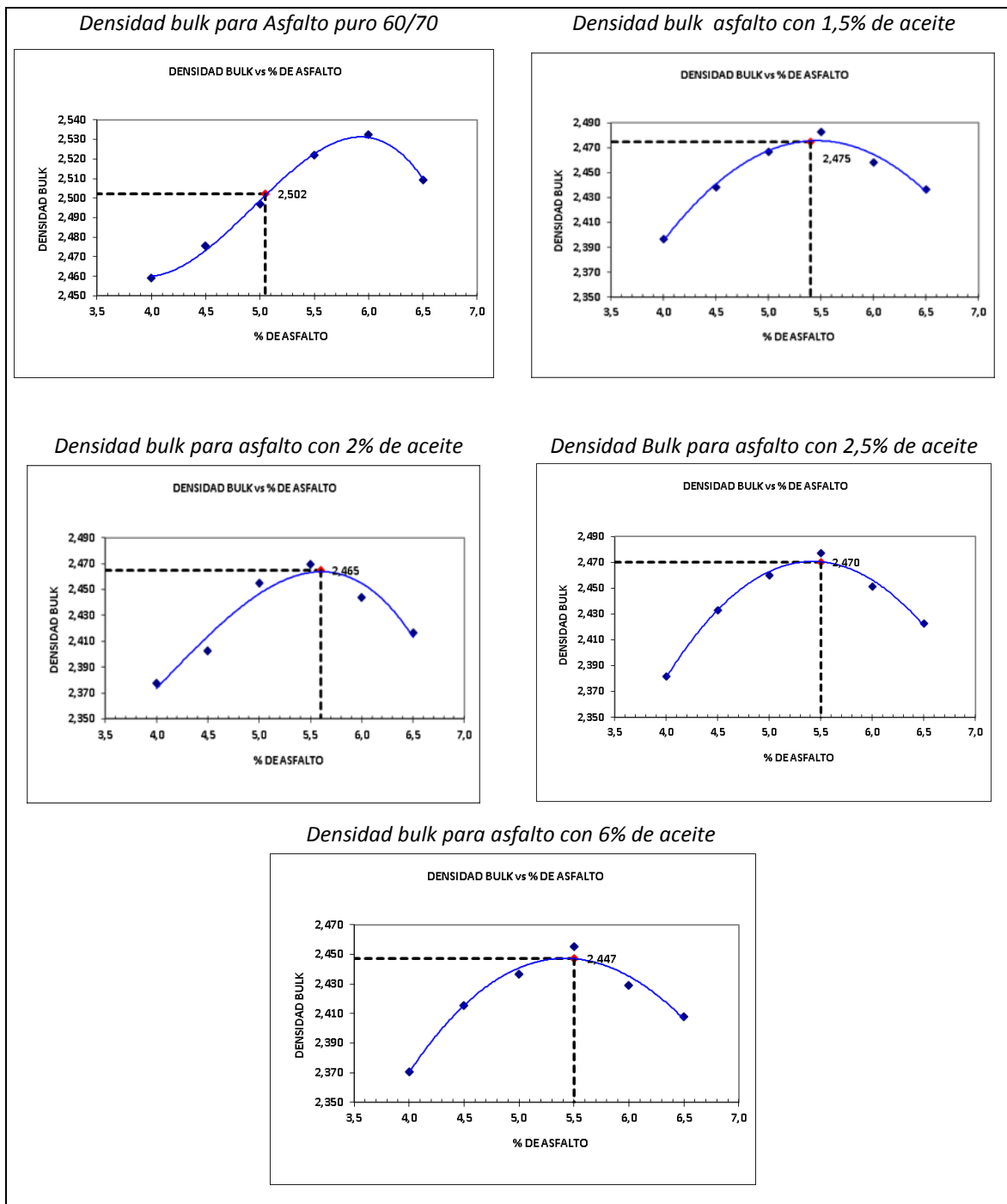
#### 5.3.1 Densidad Bulk

La densidad Bulk tiene como fin conocer la concentración óptima de asfalto en una mezcla asfáltica; para tener un mejor rango de trabajabilidad en campo se recomienda que la cantidad de asfalto este dada por el primer punto de inflexión de la curva de densidad Bulk. (Kreamer, y otros, 2004)

Según la figura 22, el porcentaje óptimo de asfalto para un asfalto 60/70 es del 5%, mientras que para los asfaltos modificados con aceite usado hasta el 2,5% este valor aumenta en 0,5%, ésto se debe a fenómenos de fluidización de asfalto que hacen que los espacios vacíos se llenen a menor presión. Cuando se sobrepasa la densidad máxima de Bulk, se presentan fenómenos negativos como ahuellamiento,

ondulaciones y fragilidad, que disminuyen las características mecánicas de la mezcla asfáltica.

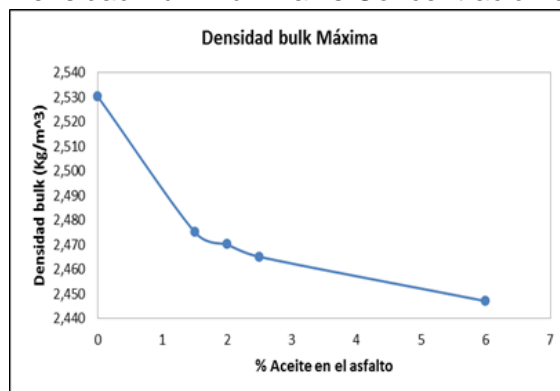
**Figura 22.** Gráficas para cálculo de la Densidad Bulk del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso



Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

En la figura 23 se describe el comportamiento global de la densidad de bulk a medida que aumenta la concentración de aceite en el asfalto.

**Figura 23.** Densidad Bulk Máxima vs Concentración de aceite



Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

En el anexo 3 Resultados ensayos Marshall se presentan los resultados de análisis volumétrico, estabilidad de flujo de cada uno los especímenes evaluados.

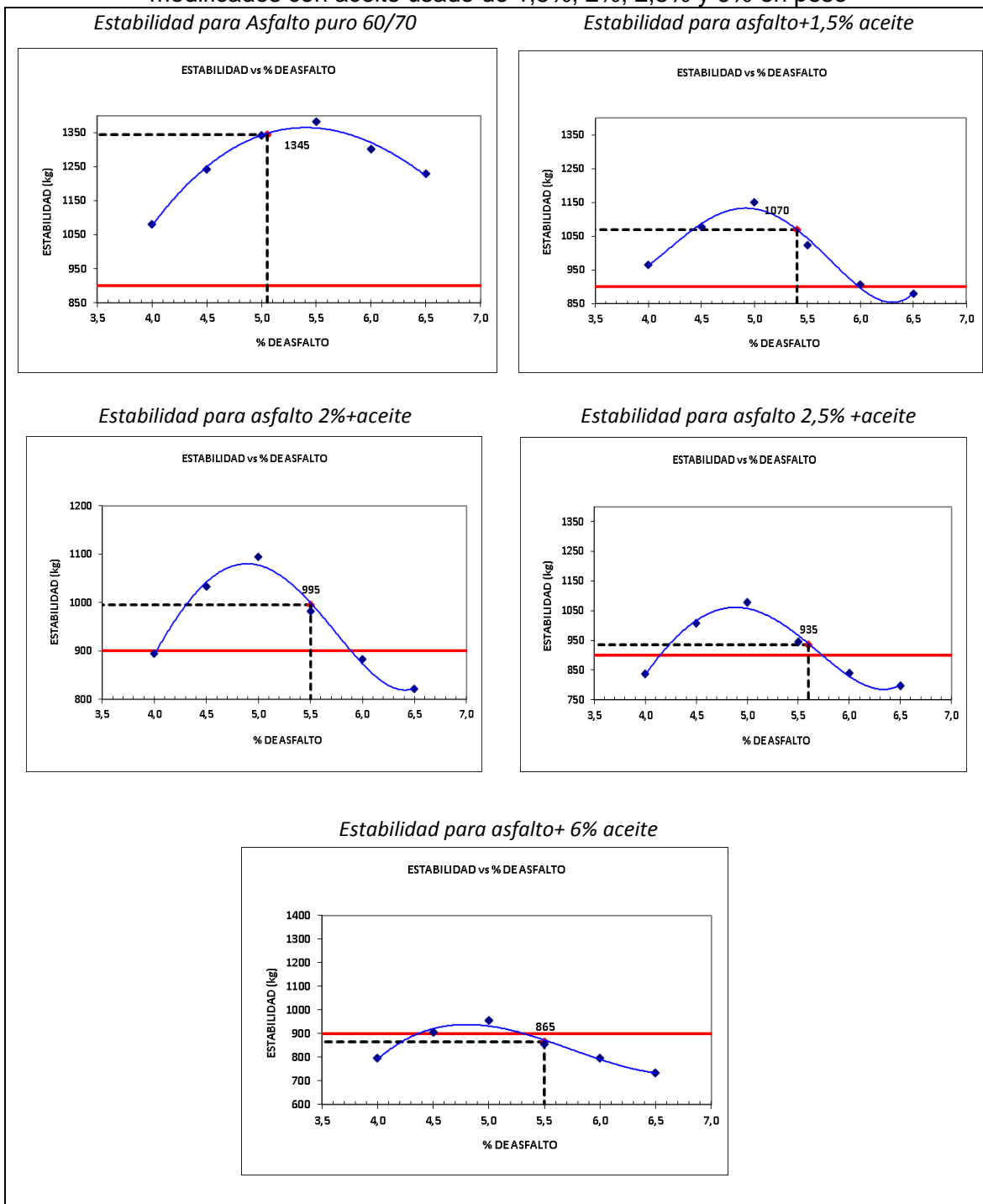
### 5.3.2 Estabilidad

La estabilidad es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir la deformación bajo las cargas de tránsito. Durante los ensayos se observó que a medida que aumenta la concentración de aceite usado en el asfalto, disminuyen los valores de estabilidad, debido a la disminución en la capacidad ligante del asfalto por el factor lubricante del aceite como se observa en la figura 24.

Comparando los resultados de estabilidad para porcentajes óptimos de ligante asfáltico con la norma 450 de INVIAS 2013, se dedujo que para asfaltos modificados con concentraciones superiores al 2% de aceite usado, la estabilidad presenta valores inferiores a 917,7 Kg (9000 N); por lo tanto, no deberían ser usados.

La teoría indica que el pavimento desarrollará ahuellamientos y ondulaciones por efecto de esta menor estabilidad, por lo cual será un pavimento blando.

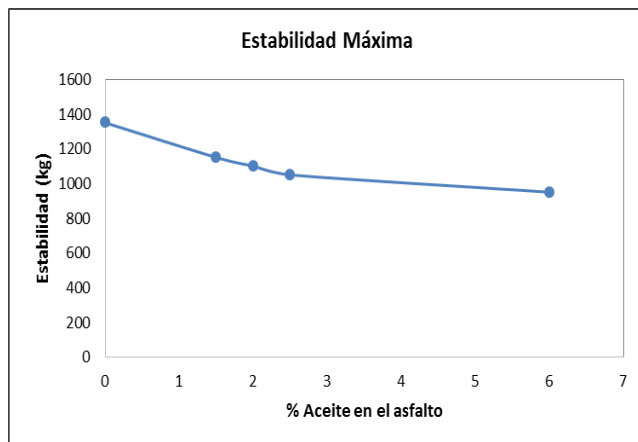
**Figura 24.** Gráficas para cálculo de la Estabilidad del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso



Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

En la figura 25 se describe el comportamiento global de la estabilidad a medida que aumenta la concentración de aceite en el asfalto.

**Figura 25.** Estabilidad máxima vs porcentaje de aceite

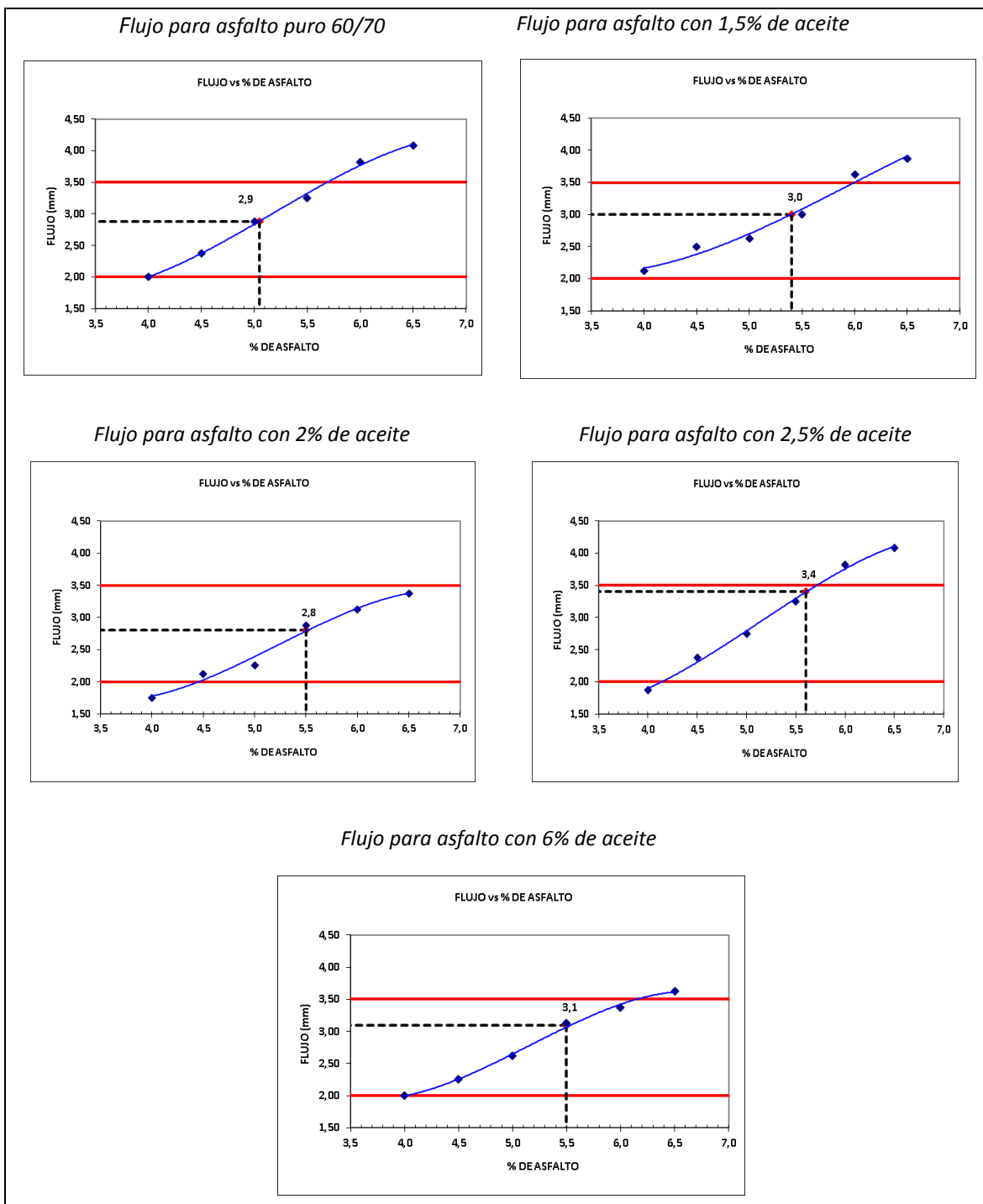


Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.3.3 Flujo

El flujo representa la deformación de una mezcla asfáltica por efectos del tránsito. Los resultados de las pruebas realizadas se muestran en la figura 26, donde se observa un aumento en las “fluencias” a medida que se adiciona aceite usado al asfalto, debido a que el lubricante plastifica el asfalto hasta un punto donde genera fragilidad y alta deformación. Esta fragilidad se da por la pérdida de las fuerzas de cohesión entre el agregado y el asfalto. Los resultados de flujo para los diferentes asfaltos modificados analizados cumplen con la norma INVIAS 450 de 2013.

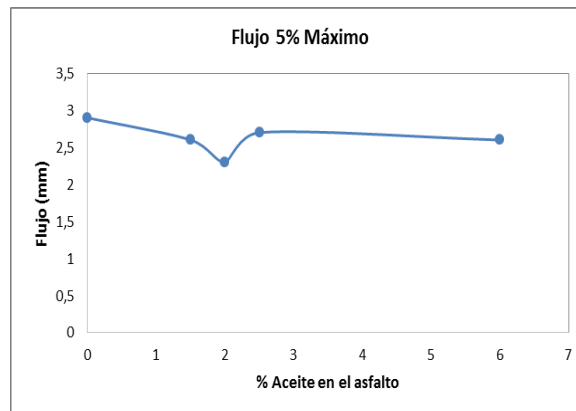
**Figura 26.** Gráficas para cálculo del Flujo del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso



Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

En la figura 27 se muestra el comportamiento global del flujo a medida que aumenta la concentración de aceite en el asfalto.

**Figura 27.** Flujo vs concentración de aceite

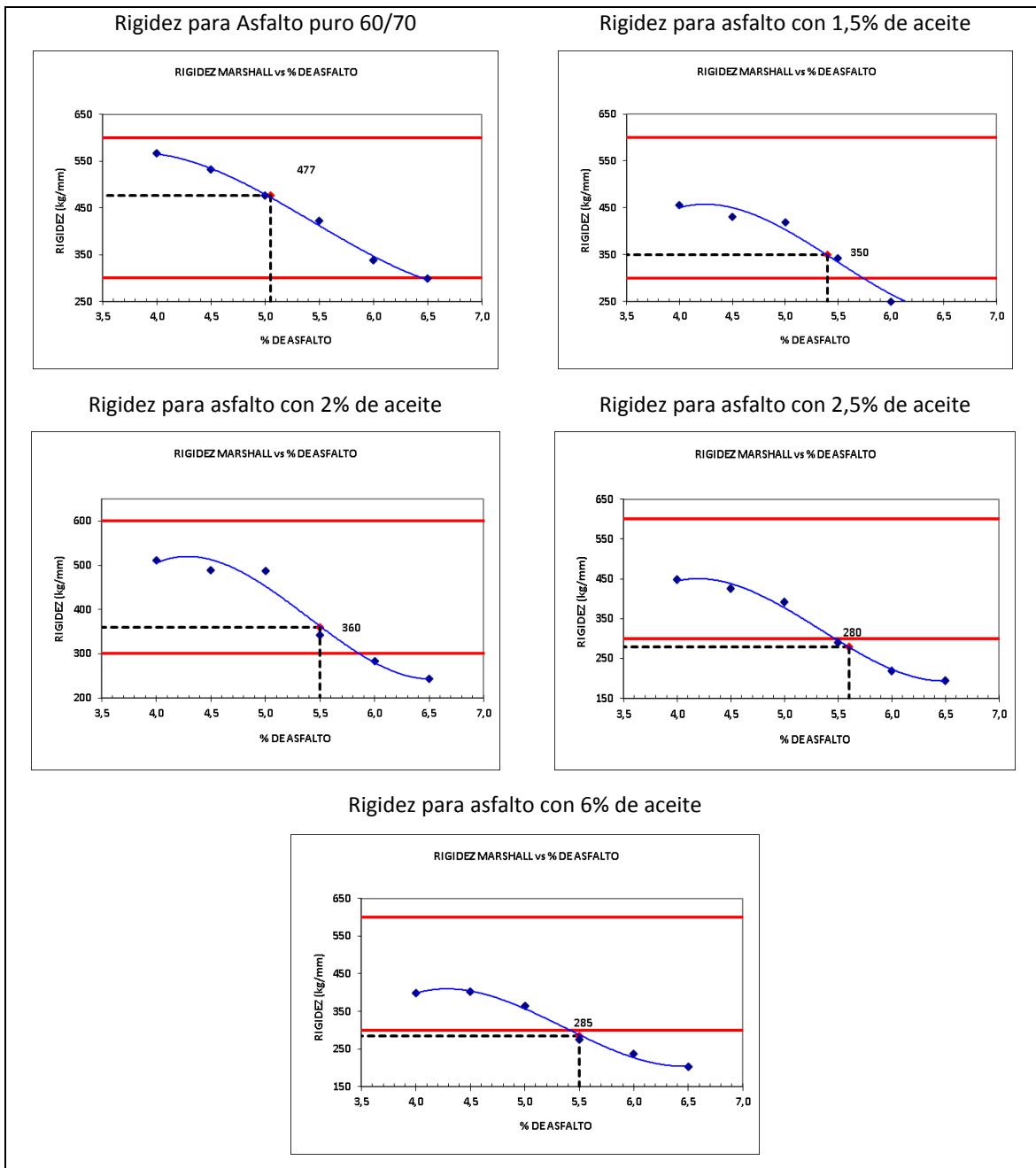


Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.3.4 Rigidez Marshall (Stiffness)

La rigidez es la capacidad de carga para que exista una deformación uniforme. A medida que se adiciona aceite usado al asfalto disminuye la rigidez Marshall por un aumento en la elasticidad de la mezcla, como se observa en la figura 28. El porcentaje máximo de aceite que se puede adicionar al asfalto es del 2%, para evitar que se tenga una rigidez por debajo de los 300 kg/mm que es lo exigido por la norma INVIAS 450 de 2013. Por lo tanto los pavimentos con este tipo de asfaltos modificados pueden desarrollar en un menor tiempo deformaciones, ahuellamientos o fracturas.

**Figura 28.** Gráficas para cálculo de la Rigidez Marshall del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso

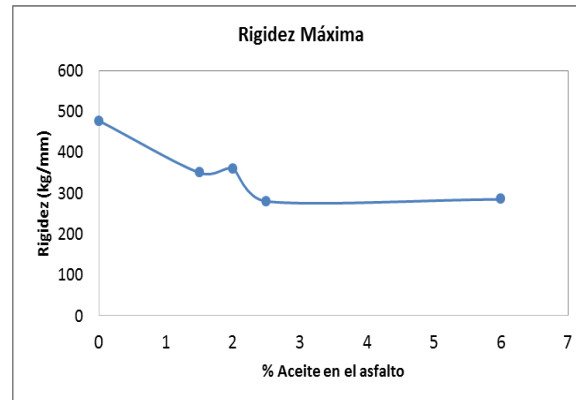


Fuente: Laboratorio PISA para este estudio



En la figura 29 se muestra el comportamiento global de rigidez a medida que aumenta la concentración de aceite en el asfalto.

**Figura 29.** *Rigidez Máxima de las mezclas asfálticas modificadas*



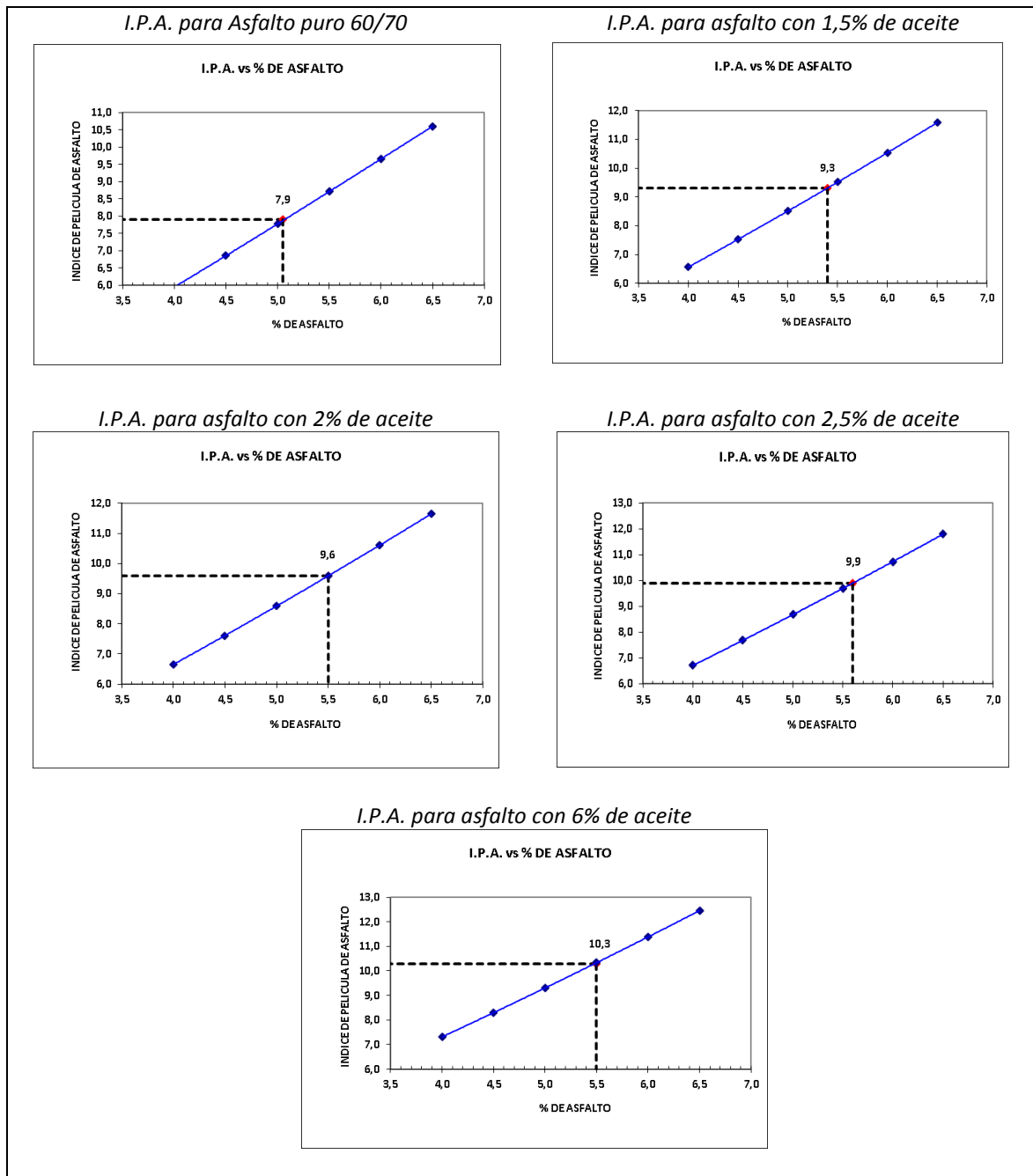
Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.3.5 Índice de película asfáltica (I.P.A.)

Proporciona la medida de la capa ligante que cubre los agregados cuando son mezclados con el asfalto.

Se observó durante la medición de este patrón, un aumento proporcional en la capa ligante a medida que se incrementa la concentración del aceite en el asfalto como se puede observar en la figura 30, esto debido a la capacidad que tiene el asfalto modificado para llenar de manera más eficiente los espacios vacíos y al efecto lubricante del aceite que afecta las fuerzas de cohesión entre los agregados y el asfalto en la mezcla, generando un aumento en la cantidad de ligante asfáltico requerido.

**Figura 30.** Gráficas para cálculo del I.P.A. del asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso



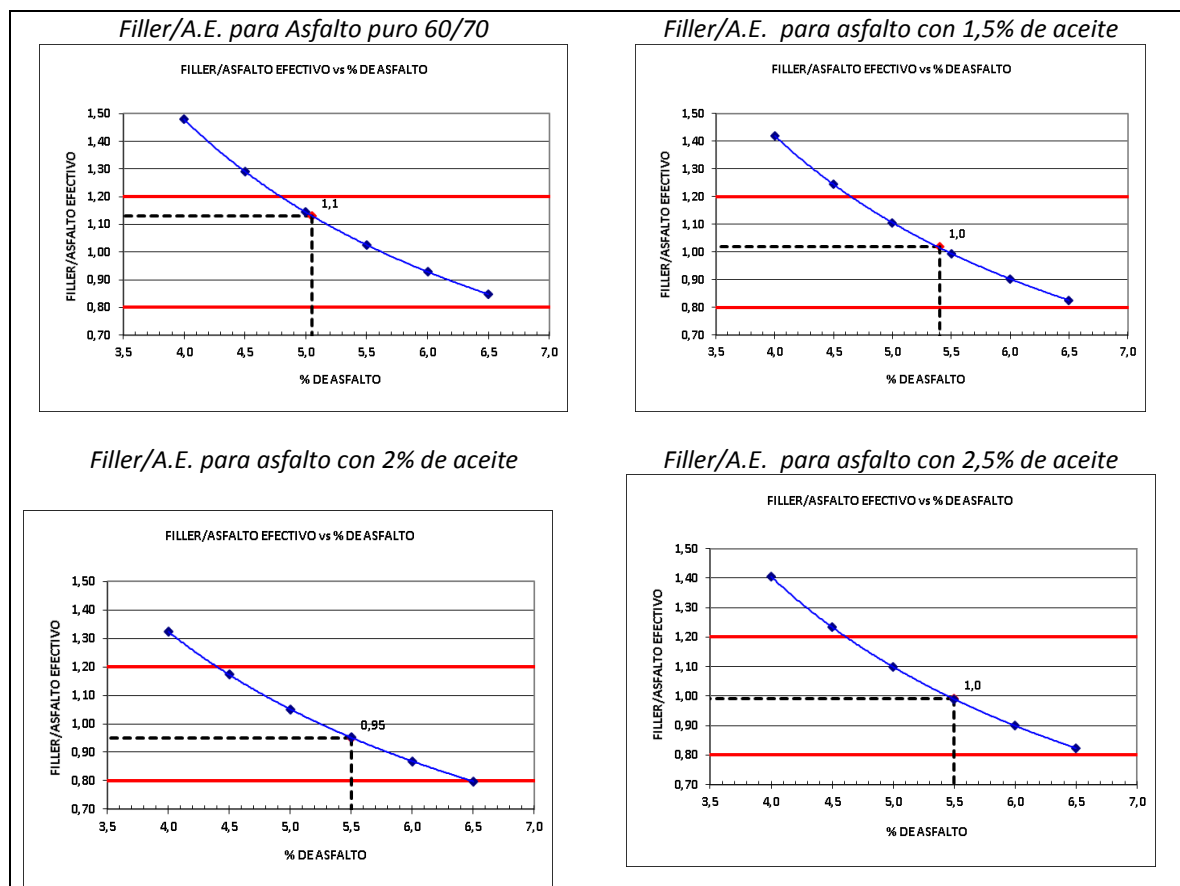
Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

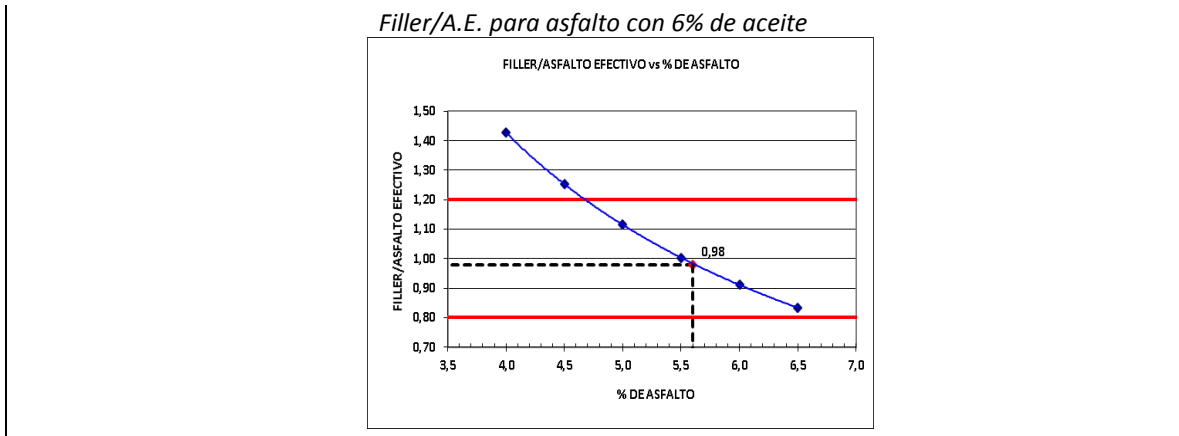
### 5.3.6 Filler / asfalto efectivo

Esta es la relación entre la fracción de material que pasa por un tamiz malla 200 (fino) y la película de asfalto que rodea a los agregados (asfalto efectivo), con el fin de reducir los espacios vacíos de una mezcla asfáltica.

El empleo de asfaltos modificados con aceites usados en mezclas asfálticas disminuye la relación del llenante con respecto al asfalto efectivo, debido a la disminución de espacios vacíos como se observa en la figura 31. Generando un mayor consumo de asfalto debido a que el asfalto modificado tiene una viscosidad menor, logrando de esta manera permear aquellos poros que no logra permear un asfalto puro.

**Figura 31.** Gráficas para cálculo del Filler/Asfalto Efectivo para asfalto 60-70 y los asfaltos modificados con aceite usado de 1,5%, 2%; 2,5% y 6% en peso

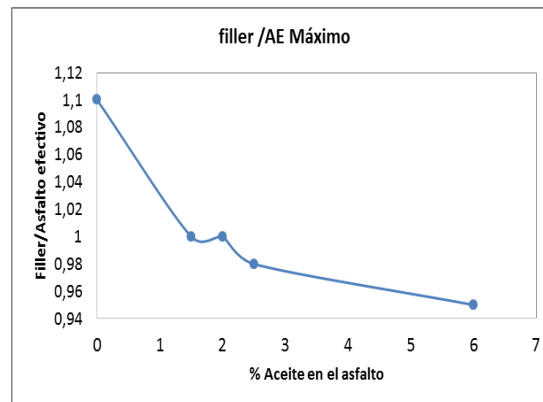




Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

En la figura 32 se muestra el comportamiento global de rigidez a medida que aumenta la concentración de aceite en el asfalto.

**Figura 32.** Filler/Asfalto Efectivo Máximo



Fuente: Laboratorio PISA para este estudio

### 5.3.7 Resumen de resultados de los diferentes ensayos frente la norma 450 INVIAS 2013

Se encontró que el porcentaje óptimo de asfalto para el asfalto 60/70 sin modificar está alrededor del 5% y para los asfaltos modificados con aceite usado se incrementa en un 0,5%, causando incrementó en el costo de producción.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que las mezclas asfálticas pueden elaborarse concentración máxima recomendada de aceite usado en asfalto para una mezcla asfáltica es del 2%. Por encima de esta concentración, no se cumplen con los rangos establecidos por INVIAS para su aplicación en Colombia, como se muestra en la tabla 28.

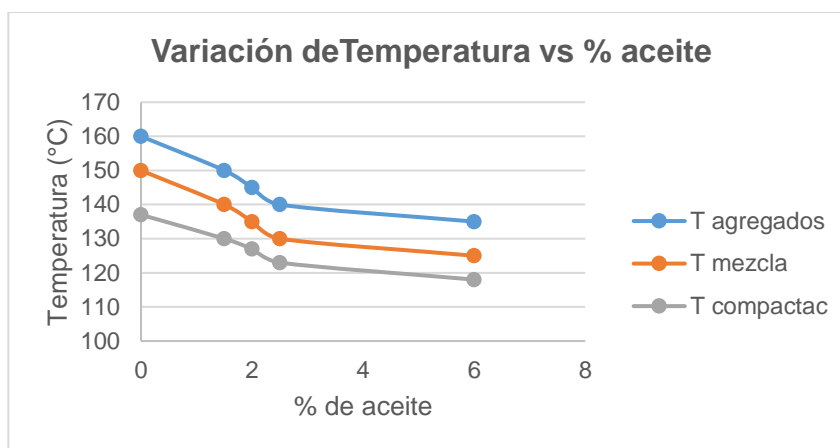
**Tabla 28.** Comparación de los resultados con la Norma 450-13 INVIAS para Mezcla Nivel de Tránsito 3

Especificación	Límites permisibles		Asfalto 60-70	Asfalto + aceite			
	mínimo	máximo		1,5%	2,0%	2,5%	6,0%
% de asfalto	-	-	5,05	5,4	5,50	5,60	5,50
Densidad Bulk	-	-	2,502	2,475	2,470	2,465	2,447
Estabilidad (kg)	>=900		1345	1070	995	935	865
Flujo (mm)	2	4	2,88	3	2,8	3,4	3,1
Rigidez Marshall (kg/mm)	300	600	477	350	360	280	285
Vacios con Aire (%)	4	6	5	5	5	5	5
Vacios llenos de asfalto (%)	65	75	69,3	70	71,0	71,5	73,0
Vacios agregado mineral (%)	>=15		15,9	17	17,2	17,4	17,9
Filler/asfalto efectivo	0,8	1,2	1,13	1,02	0,99	0,98	1,0
Indice de película de asfalto (µm)	-		7,9	9,3	9,6	9,9	10,3

Fuente: Propia

## 6. CONCLUSIONES

- Las temperaturas óptimas de mezcla y compactación de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con aceite usado disminuyen a medida que se va adicionando aceite al asfalto, por lo que se pueden catalogar como mezclas tibias, lo cual puede disminuir los costos energéticos para la fabricación de pavimentos y aumentar las distancias a las que se pueden transportar.
- En la siguiente figura se observa que para concentraciones del 2% en peso de aceite la temperatura de mezcla es de 135 °C, por lo que



Fuente: Propia

- Las emisiones atmosféricas, en especial CO<sub>2</sub>, disminuyen durante todo el proceso, ya que se consumen menos combustibles fósiles debido a las menores temperaturas con las que se efectúa el proceso.
- El proceso de fabricación realizado a menores temperaturas favorece la reducción de emisiones de COVs (compuestos orgánicos volátiles) a la atmósfera, reduciendo las emisiones fugitivas en el proceso durante la operación.

- El aceite transmite sus características lubricantes al asfalto, expresado ésto en función de la disminución de la viscosidad.
- Para el conjunto de pruebas Marshall realizadas (Densidad Bulk, estabilidad, Flujo, rigidez, I.P.A, relación Filler/AE), se encontró como límite máximo permisible 2% de adición de aceite usado, para que las mezclas asfálticas cumplan con la norma MDC-19-2013.
- La preparación de mezclas asfálticas modificadas con aceite usado requiere un mayor cuidado, debido a que se trabaja más cerca de los límites máximos permisibles en los parámetros Marshall.
- Las mezclas tibias pueden contener mayor humedad de los agregados, y en la medida que el agua es liberada puede reaccionar con los metales pesados presentes en los aceites usados.
- Las mezclas modificadas con aceite tienen menor rigidez, por lo que se espera que tengan mejor comportamiento frente a los procesos de fatiga, aunque pueden presentarse ahuellamientos.
- El asfalto modificado con aceite usado presenta características de mayor susceptibilidad térmica lo que puede causar deformaciones y ahuellamiento, cuando se aplica en zonas donde la temperatura es alta.
- Con el uso de aceites usados en pavimentos asfálticos, se podría gestionar alrededor 4,5 millones de galones de los aceites usados generados en el país, disminuyendo el impacto ambiental de los mismos por su mala disposición.

- El uso de aceites lubricantes de desecho en la fabricación de mezclas asfálticas para la construcción de carreteras no genera gastos adicionales en el proceso de producción y de control ambiental (permisos y licencias ambientales), como ocurre con los procesos de re-refinación y co-procesamiento.

### **Recomendaciones**

- Se requiere realizar pruebas de campo, con el fin de evaluar el efecto del aceite usado en las mezclas asfálticas a largo plazo, verificar si el asfalto reacciona con el aceite generando desprendimiento de los agregados.
- Se debería realizar un estudio de la posibilidad de lixiviación de los metales pesados encapsulados en la matriz de la mezcla asfáltica, ya que está expuesta a agentes meteorológicos que pueden arrastrarlos.
- Los asfaltos modificados con aceite podrían usarse en vías con tránsito bajo.
- La adición de aceites debería enfocarse a asfaltos pesados y mezclas rígidas, ya que se mejora la trabajabilidad. Se sugiere realizar pruebas con asfaltos duros 40/50 y comparar los resultados con la norma para asfaltos 60/70.



## REFERENCIAS

- Abdullah, Mohd Ezree , y otros. 2014.** *Stiffness Modulus Properties Of Hot Mix Asphalt Containing Waste Engine Oil.* Malasia : Universiti Tun Hussein Onn Malaysia & Universiti Teknologi Malaysia.
- Arias, Geoge, y otros. 2016.** Mezcla Asfálticas. [En línea]. <http://es.slideshare.net/leonel321/mezclas-asfalticas-2>.
- Armanta, A. 2002.** *Propiedades y estudios de los materiales asfálticos y pétreos.* Sonora-Mexico : Universidad de Sonora. Capítulo 2.
- Benitez, A; Zapata, K; Araujo, E;. 2015.** *Evaluación de la resistencia de una mezcla asfáltica tibia, sustituyendo en su fabricación, parte del agregado pétreo, por escoria de alto horno.* Bogotá-Colombia : Universidad Católica de Colombia.
- Bolzan, Pablo. 2010.** *Mezclas asfálticas en caliente, elaboradas y compactadas a menores temperaturas.* Buenos Aires: Comisión permanente del asfalto. págs. 234-253.
- Cadavid, Gabriel. 2016.** *Respel en Caldas.* [entrev.] Luis Helmer Orozco.
- Celi, Lida y Serrano, Carlos Gerardo. 2008.** *Mezclas asfálticas tibias.* Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander.
- Company Koehler Instrument. 1980.** *Saybolt Viscometer Bath, Operating and technical, refence manual k21410 and k21420.* Alemania : Koehler Instrument Company.
- Corpocaldas. 2015.** *Expediente N°477 Combustible Juanchito.* Manizales-Caldas : Corpocaldas.
- Corrigan, Mattew. 2012.** Buenos Aires Argentina : XVI Argentine Congress of road. Administration and Trafic. Expovial. WMA. págs. 1- 44.

**DeDene, Christopher Daniel . 2011.** *Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed.* Michigan : Michigan Technological University.

**Deschamps, Julio, y otros. 2005.** *Preparación y evaluación de una mezcla en caliente para la obtención de un pavimento ferromagnético que mejore la adhesión entre la superficie pavimento y llanta magnética.* Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander.

**Ecologista. 2016.** <http://www.ecologista.com.co>. [En línea]. <http://www.ecologista.com.co/noticias/biochemical-y-ecologista-recuperan-aceite-usado-con-tecnologia-alemana>.

**Gamboa, Jhon Jairo. 2012.** *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas modificadas vs mezcla tradicional.* Bucaramanga, Colombia : Universidad Pontificia Bolivariana.

**Golalipour, Amir. 2013.** *Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical.* Madison : University of Wisconsin.

**Incoasfaltos. 2016.** [En línea]. <http://www.incoasfaltos.com/>.

—. **2016.** *Ficha técnica asfalto 60-70.* Colombia : Incoasfalto.

**Institute, The Asphalt. 1962.** *Manual del Asfalto.* Bilba : URMO S.A. De Editores.

**Invias. 2013.** *400 Disposiciones generales mezclas asfálticas.* Colombia : Invias.

—. **2013.** *410 Suministro de cemento asfáltico.* Colombia : Invias.

—. **2013.** *413 Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado.* págs. 1-19.

—. **2013.** *450 Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua.* págs. 1-47.

—. **2007.** INV E-714-07 viscosidad. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia : Invias, págs. 1-12.

—. **2016.** Invias. [En línea]. <http://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/objetivos-y-funciones>.

**Invias. 2007.** Norma INV E-719-07 Método para convertir viscosidad cinemática a saybolt universal y saybolt furol. Colombia : s.n.

**Invias. 2007.** Norma INV E-702-07 Ductilidad. *Manual de pavimentos asfálticos.* Bogotá, págs. 1-5.

—. **2007.** Norma INV E-704-07 Contenido de agua. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-8.

—. **2007.** Norma INV E-706-07 Penetración. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-8.

—. **2007.** Norma INV E-709-07 Punto de inflamación. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-13.

—. **2007.** Norma INV E-712-07 Punto de ablandamiento. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-7.

—. **2007.** Norma INV E-713-07 Solubilidad. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-5.

—. **2007.** Norma INV E-717-07 Viscosidad. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-5.

—. **2007.** Norma INV E-724-07 Índice de Penetración. *Manual de pavimentos asfálticos.* Colombia, págs. 1-2.

**Juanchito, Combustible. 2016.** <http://combustiblesjuanchito.com/>. [En línea] [http://combustiblesjuanchito.com/?page\\_id=65](http://combustiblesjuanchito.com/?page_id=65).

**Kandhal, Prithvi S. 1992.** *Waste Materials in hot mix asphalt.* USA : National Center for Asphalt Technology.

**Kreamer , C, y otros. 2004.** *Ingeniería de Carreteras.* Madrid-España : McGraw-Hill.

**Kreamer, C, y otros. 2004.** *Ingeniería de Carreteras.* Madrid-España : McGraw Hill.

- Laboratorio Vialidad, Chile. 2016.** <http://www.vialidad.cl/>. [En línea]. <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>.
- Londoño, Cirpiano. 2014.** 360° en concreto. [En línea] 10 de 1 de 2014. <http://blog.360gradosenconcreto.com/historia-y-origen-de-los-pavimentos-de-concreto-en-colombia/>.
- Lopera, Hernando. 2011.** *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (Elaeis quineensis)*. Medellín-Colombia : Universida Nacional de Colombia.
- MAPFRE, Seguros. 2016.** <http://www.motor.mapfre.es>. [En línea] 6 de 12 de 2016. <http://www.motor.mapfre.es/coches/noticias/2746/como-y-cuando-cambiar-el-aceite-a-tu-coche>.
- Marcozzi, Rosana, Morea, Francisco y Castaño, Gonzalo. 2010.** *Evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas tibias elaboradas con aditivos*. Buenos Aires : Comisión Permanente del Asfalto. págs. 335-355.
- Minambiente. 2006.** *Convenio de cooperación científica, tecnológica y financiera para el diseño de las estrategias y lineamientos técnicos requeridos para la*. Medellín, Antioquia.
- Mintransporte. 2016.** *Transporte en cifras, estadísticas 2015*. Bogotá : Ministerio de Transporte de Colombia.
- Nurul , Hidayah, y otros. 2013.** *A short review of waste oil application in pavement*. Malasia : Universiti Teknologi Malaysia & Universiti Teknologi Malaysia.
- Ojeda, E y Robayo, MC. 2014.** *Manual técnico para el manejo de aceites lubricantes usados de origen automotor e industrial*. Bogotá : Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ortega, Osvaldo y Paternina, Luis Alfredo. 2012.** *Propuesta para implementación de mezclas asfálticas*. págs. 1-83.
- Ortega, Vanesa. 2016.** Proponen utilizar la escoria de la siderurgia para construir caminos y estabilizar suelos. [En línea] 2016. <http://noticiasdelaciencia.com/not/3059/proponen-utilizar-la-escoria-de-la-siderurgia-para-construir-caminos-y-estabilizar-suelos/>.

- Ortiz, Oscar Leonardo. 2007.** *Evaluación de la gestión integral del manejo de aceite usado en Bogotá.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de estudios ambientales y rurales.
- Paris, Ingenieros. 2016.** Diseño de pavimentos III: Clasificación Mezclas Asfálticas. [En línea] 6 de 12 de 2016. <http://parisingenieros.blogspot.com.co/2015/04/disenodepavimentos-iii-clasificacion.html>.
- Petroperú. 2016.** Petroperú. [En línea] 15 de 12 de 2016. <http://www2.petroperu.com.pe/asfaltos/descripcion-asfaltos.php>.
- Romero, María Carmen y Gómez, Alberto. 2002.** *Propiedades físicas y químicas de asfaltos colombianos tipo Barrancabermeja y sus respectivas fracciones de asfaltos.* Revista Academia Colombiana de Ciencia , págs. Volumen XXVI, Numero 98 pag 128-132.
- Ramírez, José Luis. 2016.** *Panorama General del Aceite Usado.* Bogotá : Fondo de Aceites Usados -FAU. pág. 15.
- Read, Jhon y Whireoak, David. 2003.** *Shell Bitumen Handbook.* U.K. : Publishing Thomas Ferford.
- Rodríguez, Edgar y Rondón, Hugo. 2007.** *Resistencia mecánica evaluada en el ensayo marshall de mezclas densas en caliente, elaboradas con asfaltos modificados con desechos de PVC, PEHD y PS.* págs. 91-104.
- Shurvell, S.A.M. Hesp & H.F. 2012.** *Waste engine oil residue in asphalt cement.* Kingston-Canada : Queen's University.
- SIC. 2012.** *Res 36858 Superintendencia de Industria y Comercio. Tecnologías de mezclas tibias de asfalto (WMA): La perspectiva de los Estados Unidos.*
- Torres y Noreña. 2012.** *Mezclas tibias: una nueva tecnología para el mejoramiento de las mezclas asfálticas convencionales.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana.
- UPME. 2001.** *Transformación de los aceites usados para su utilización como energéticos en procesos de combustión.* Bogotá -Colombia : Unidad de planeación minero energética -UPME- y Ministerio de Minas y Energía.

**Vásquez Varela, Luis Ricardo. 2015.** *Método Marshall para el diseño de mezclas asfálticas calientes.* Manizales-Colombia: Universidad Nacional de Colombia. págs. 1-26.

**Villanueva, Aaron, Ho, Susanna y Zanzotto, Ludo. 2008.** *Asphalt modification with used lubricating oil.* págs. 148-157.

**Wen, Haifang, Bhusal, Sushanta y Wen, Ben. 2013.** *Laboratory Evaluation of Waste Cooking Oil-Based, Bioasphalt as an Alternative Binder for Hot Mix Asphalt.* págs. 1432-1437.