

# **Maestría en Ingeniería Civil**

**Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas  
y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.**

**Pedro Julián Gallego Quintana**

**Bogotá, D.C., 5 de Diciembre de 2016**



**Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas  
y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en geotecnia.**

**Sandra Ximena Campagnoli Martinez**

**Directora**

**Bogotá, D.C., 5 de Diciembre de 2016**



La tesis de maestría titulada “Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP”, presentada por Pedro Julián Gallego Quintana, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Sandra Ximena Campagnoli Martinez

Jurado

Fernando Estrada Sanchez

Jurado

Jairo Alberto Espejo

Bogotá, D.C., 09 de diciembre de 2016 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

## **Agradecimientos.**

Quiero agradecer a todas las personas que de alguna manera contribuyeron para la realización de este trabajo, dentro de los cuales destaco:

A Dios por darme salud y motivación para culminar esta etapa de mi vida.

A mi abuela Hilda, el ángel que desde el cielo me cuida, protege y guía mi camino.

A mis padres Pedro y Yamily por la excelente formación, el amor, enseñanzas e incentivos a lo largo de mi vida.

A mi familia por estar ahí siempre en los momentos de mayor dificultad

A los amigos que me acompañaron para el éxito y formación académica, siempre brindando experiencias y conocimientos.

A la Ing. Sandra Campagnoli, directora de este trabajo, por el conocimiento compartido, dedicación, paciencia y disponibilidad cuando lo necesité.

## Resumen

El uso de materiales provenientes del fresado de capas asfálticas de pavimentos (RAP) es una tendencia mundial para elaborar mezclas con características similares a las realizadas con materiales nuevos. Para utilizar el RAP junto con materiales vírgenes, es necesario usar algún componente que permita rejuvenecer las propiedades del asfalto del RAP. Una alternativa es el uso de aceites quemados de motor de carro (WEO – Waste Engine Oil). En Colombia este abordaje ha sido poco explorado, pese a existir las condiciones para la elaboración de este tipo de mezclas. Así, el problema radica en determinar la cantidad óptima de WEO que permita obtener una mezcla asfáltica con características similares a las definidas para mezclas MDC-19 de acuerdo con la normativa de INVIAS, lo cual trae beneficios tanto económicos como ambientales.

En esta investigación se analizan diferentes mezclas asfálticas, preparadas a partir de materiales vírgenes y de materiales reciclados (WEO y RAP), con el fin de evaluar el impacto que genera el uso de WEO en las propiedades físicas y mecánicas de estas mezclas. Cuatro diferentes mezclas asfálticas fueron analizadas diferenciándose entre ellas por la cantidad de WEO usado en la modificación del cemento asfáltico (0%, 5%, 10%, 15% - expresado como porcentaje en peso de la mezcla de asfalto nuevo y envejecido), con proporciones constantes de agregado virgen y RAP del 65% y 35% respectivamente.

Fue calculado el Módulo Resiliente para las mezclas con WEO para varias temperaturas (10°C, 20°C, 30°C) y frecuencias de aplicación de carga (2,5Hz; 5,0Hz; 10Hz). A partir de esa información también fueron calculadas las curvas maestras del Módulo Resiliente. La preparación de las mezclas y los experimentos fueron diseñados de tal forma que cumplieran con lo establecido para mezclas densas en caliente MDC-19 (Art. 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS con categoría de tránsito NT1).

Se determinaron las características granulométricas de los agregados vírgenes (grava 40,5%; arena 55,6% y finos 3,9%) y de los agregados del RAP (grava 29,5%; arena 61,2% y finos 9,3%), las propiedades químicas del WEO (ensayo ASTM) y las características del ligante envejecido, analizando su viscosidad (5.896,5P), penetración (8,9 décimas de mm) y punto de ablandamiento (95,3°C). De la misma forma, las características del ligante

(asfalto nuevo más asfalto del RAP) con cada inclusión de WEO (5%, 10% y 15%), obteniendo los siguientes resultados: una disminución promedio<sup>1</sup> de la viscosidad de un 49.3% ( $2.977P_{(weo_0\%)} \Rightarrow 382,9P_{(weo_{15\%})}$ ), disminución de la temperatura de ablandamiento en promedio de 17,7% ( $72,1^{\circ}C_{(weo_0\%)} \Rightarrow 39,6^{\circ}C_{(weo_{15\%})}$ ) y un aumento en la penetración de 82,6% ( $41_{(1/10mm)(weo_0\%)} \Rightarrow 147_{(1/10mm)(weo_0\%)}$ ).

Se elaboraron mezclas asfálticas con las proporciones de agregados vírgenes y ARAP (65%-35%) y con un contenido de asfalto de 5,9% con respecto al peso total de la mezcla (definido como óptimo teórico de acuerdo con el método de Duriez), al cual se le incluyeron diferentes porcentajes de WEO (5%, 10% y 15%) con relación al peso del asfalto calculado para la mezcla (70.6g). Se fabricaron 48 briquetas tipo Marshall de diámetro 101,1 mm en promedio, 12 por cada tipo de mezcla ( $12_{(WEO_0\%)}$ ,  $12_{(WEO_5\%)}$ ,  $12_{(WEO_{10\%})}$ ,  $12_{(WEO_{15\%})}$ ), compactadas a 75 golpes por cara, sobre las cuales se determinaron: el porcentaje de vacíos con aire, la estabilidad, el flujo, la relación estabilidad-flujo, la susceptibilidad al agua utilizando el ensayo de tracción indirecta, el módulo resiliente y las curvas maestras.

La inclusión de WEO tuvo cambios en las propiedades de las mezclas finales (ligante + agregados + RAP), en general el efecto fue la disminución en los valores de todas ellas. Los porcentajes de disminución promedio<sup>2</sup> fueron: Vacíos con aire 7,3% ( $4,3\%_{(weo_0\%)} \Rightarrow 3,7\%_{(weo_{15\%})}$ ), estabilidad 34,7% ( $8.427N \Rightarrow 2.348N$ ), Flujo 5,3% ( $3,1mm_{(weo_0\%)} \Rightarrow 2,6mm_{(weo_{15\%})}$ ), Relación estabilidad – flujo 30,7% ( $2.7_{(weo_0\%)} \Rightarrow 0,9P_{(weo_{15\%})}$ ), Tracción indirecta seca 7,3% ( $1,1MPa_{(weo_0\%)} \Rightarrow 0,2MPa_{(weo_{15\%})}$ ), Tracción indirecta húmeda 50% ( $0,9MPa_{(weo_0\%)} \Rightarrow 0,1MPa_{(weo_{15\%})}$ ), Relación Tracción indirecta 3,7% ( $83,1\%_{(weo_0\%)} \Rightarrow 74,0\%_{(weo_{15\%})}$ ).

La inclusión de WEO mejoró las propiedades de las mezclas, teniendo en cuenta que las características de viscosidad, punto de ablandamiento y penetración evaluadas al ligante disminuyeron, obteniéndose unos parámetros cercanos a los que tiene el asfalto nuevo, evidenciado el efecto rejuvenecedor del WEO.

---

<sup>1</sup> Porcentaje promedio por cada inclusión de 5% de WEO.

<sup>2</sup> Idem.

En cuanto a los parámetros [estabilidad y flujo, susceptibilidad al agua y módulo resiliente), se muestra que al incluir WEO estos disminuyeron la rigidez de la mezcla que es finalmente el principal inconveniente que presenta al utilizar mezclas asfálticas con RAP.

Una vez analizados las características físicas y las propiedades mecánicas de las mezclas, se determinó que el porcentaje de inclusión de WEO óptimo (para obtener una mezcla MDC-19 categoría NT1) fue del 5,20% con respecto al peso total de ligante (70,6 g), equivalente a 3.7g para una briqueta de 1.200g ( $0.052 \cdot 70.6g = 3.7g$ ).

Palabras claves: Pavimentos, Reciclaje de Pavimentos, Rejuvenecedor de Ligantes, Aceite usado de motor de carro.

## Índice general

Agradecimientos.....	5
Resumen .....	6
Índice general .....	9
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras .....	13
Índice de anexos.....	15
1 INTRODUCCIÓN.....	16
2 OBJETIVOS .....	19
2.1 Objetivo General.....	19
2.2 Objetivos Específicos .....	19
3 ESTADO DEL ARTE .....	20
3.1 Reciclaje de Pavimentos.....	20
3.2 Uso de WEO en mezclas asfálticas con RAP. ....	23
3.2.1 WEO en el contexto regional .....	27
3.3 Propiedades Reológicas.....	28
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
4.1 Materiales.....	29
4.2 Metodología experimental – Caracterización de materiales y preparación de mezclas asfálticas .....	30
4.2.1 Agregados vírgenes.....	30
4.2.2 RAP.....	31
4.2.3 WEO.....	32

4.2.4	Asfalto nuevo.....	32
4.2.5	Ligantes.....	32
4.2.6	Mezclas finales.....	33
4.2.6.1	Elaboración de Mezclas con WEO.....	34
4.3	Metodología estadística.....	37
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
5.1	Caracterización de Agregados Vírgenes.....	39
5.2	Caracterización de RAP.....	40
5.3	Caracterización de agregados en la mezcla asfáltica.....	42
5.4	Caracterización de WEO.....	42
5.5	Caracterización del asfalto del RAP.....	43
5.5.1	Modelos de regresión.....	44
5.6	Caracterización de Asfalto Nuevo.....	45
5.7	Caracterización de Ligantes.....	46
5.7.1	Viscosidad.....	47
5.7.2	Penetración.....	49
5.7.3	Punto de ablandamiento.....	51
5.8	Caracterización de Mezclas Finales (Propiedades físicas y mecánicas).....	52
5.8.1	Vacíos con aire.....	52
5.8.2	Estabilidad y Flujo.....	54
5.8.3	Susceptibilidad al agua utilizando la prueba de Tracción indirecta.....	58
5.8.4	Módulo resiliente.....	60
5.9	Resultados Consolidados.....	63
5.9.1	Incidencia del asfalto envejecido en el asfalto nuevo.....	63
5.9.2	Incidencia del WEO en las mezclas de ligante.....	63
5.9.3	Incidencia del WEO en las mezclas finales.....	64

6	Conclusiones .....	67
7	Recomendaciones .....	69
8	BIBLIOGRAFÍA.....	70
9	Anexos .....	75

## Índice de tablas

Tabla 1 – Proporciones de WEO usadas para los ensayos de Ligantes .....	33
Tabla 2 - Resultados del análisis de granulometría de agregados vírgenes.....	39
Tabla 3 - Resultados del análisis de granulometría de agregados del RAP .....	41
Tabla 4 – Valores reportados para WEO usado para los experimentos .....	43
Tabla 5 – Caracterización del asfalto nuevo utilizado en los experimentos .....	45
Tabla 6 – Proporciones de asfalto envejecido, asfalto virgen y WEO para la preparación de las mezclas de ligante.....	46
Tabla 7 – Viscosidad para ligantes con inclusiones de WEO y temperatura de 60°C.....	47
Tabla 8 – Valores de penetración en (1/10 mm) para las mezclas de ligantes .....	49
Tabla 9 – Comparación de valores encontrados para penetración contra Especificaciones del cemento asfáltico. ....	50
Tabla 10 –Puntos de ablandamiento para mezclas de ligante con diferentes cantidades de WEO.....	51
Tabla 11 – Comparación de valores encontrados de punto de ablandamiento con respecto a las Especificaciones de cemento asfáltico. Artículo 410-13 de INVIAS .....	52
Tabla 12 Valores de estabilidad y flujo para diferentes inclusiones de WEO en mezclas asfálticas con RAP.....	54
Tabla 13 – Relación Resistencia a la Tensión de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de WEO.....	59

## Índice de figuras

Figura 1 – Beneficios ambientales del uso de RAP en la construcción de nuevas estructuras de pavimentos .....	22
Figura 2 – Etapas de caracterización de materiales.....	30
Figura 3 – Etapas de caracterización de RAP .....	31
Figura 4 – Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 0%.....	35
Figura 5 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 5%.....	36
Figura 6 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 10%.....	36
Figura 7 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 15%.....	36
Figura 8 – Curva granulométrica – Agregados vírgenes .....	40
Figura 9 – Curva granulométrica – Agregados del RAP .....	41
Figura 10 – Curva granulométrica para Agregados de la Mezcla 65%-35%.....	42
Figura 11- Viscosidad del asfalto envejecido. ....	44
Figura 12 – Comparativo de modelos de regresión para la variable Viscosidad de Asfalto envejecido. ....	45
Figura 13 – Comportamiento de la variable Viscosidad de acuerdo con el porcentaje de WEO adicionado a cada mezcla. ....	48
Figura 14 –Viscosidad absoluta. Vs. Porcentaje de inclusión de WEO para una mezcla (asfalto nuevo y asfalto envejecido) a 60°C con grado de penetración 60-70 .....	49
Figura 15 – Comparación de los valores encontrados de penetración con valores reportados en (Zaumanis, Mallick, Poulikakos, et al., 2014) .....	51
Figura 16- Porcentajes de vacíos de aire presentes en las diferentes mezclas asfálticas con RAP y WEO .....	53
Figura 17 – Estabilidad Marshall para mezclas con RAP + WEO.....	55
Figura 18 – Flujo para mezclas con RAP + WEO .....	56
Figura 19 – Relación estabilidad y flujo para mezclas con RAP + WEO .....	57
Figura 20 – Tracción indirecta (húmeda y seca) y relación tracción indirecta (RRT) para mezclas con RAP + WEO. ....	58
Figura 21 – Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta (RRT). ....	59
Figura 22 – Módulos resilientes para la Mezcla con diferentes porcentajes de inclusión de WEO.....	61

Figura 24 – Efectos de la inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen para cada uno de los parámetros analizados. ....	63
Figura 25 – Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas de ligantes (Asfalto envejecido más Asfalto Virgen).....	64
Figura 26 – Porcentajes de WEO óptimo para adicionar a mezclas con RAP, de acuerdo con cada parámetro evaluado.....	66

## Índice de anexos

Anexo 1–Granulometría agregados vírgenes.....	76
Anexo 2– Porcentaje de asfalto envejecido contenido en el RAP .....	77
Anexo 3 – Análisis químico WEO.....	78
Anexo 4– Granulometria ARAP .....	79
Anexo 5– Anova y test de Duncan para variable Viscosidad.....	80
Anexo 6- Análisis de viscosidad de muestras de asfalto .....	82
Anexo 7- Análisis de medias para Penetración de los materiales bituminosos .....	95
Anexo 8 - Penetración de los materiales bituminosos Norma de ensayo INV E 706 –	13.96
Anexo 9– Análisis de medias para la variable Punto de ablandamiento.....	100
Anexo 10 - Resultados Ensayos Puntos de Ablandamiento Norma de ensayo INV E 712 –	13. ....
13. ....	102
Anexo 11 – Análisis de media para estabilidad y flujo.....	106
Anexo 12 - Resultados ensayos para estabilidad y flujo. ....	110
Anexo 13 – Susceptibilidad al agua .....	114
Anexo 14 – Valores encontrados de módulo resiliente para las cuatro mezclas de RAP con	inclusión de WEO .....
118	
Anexo 15 - Tensión indirecta. Módulo resiliente.....	119
Anexo 16 - Análisis de medias para la variable resiliencia. ....	123

# 1 INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es un elemento de vital importancia para el desarrollo económico de un país. En Colombia la relevancia de las vías es mayor, ya que el principal modo de transporte tanto de carga (71% de la carga transportada al interior del país<sup>3</sup>) como de pasajeros es el terrestre. A pesar de esto y de acuerdo con el informe de indicadores del sector del transporte en Colombia (Fedesarrollo, 2013), existe un atraso importante de la infraestructura vial (y de otros medios de transporte), el cual es debido en parte a las características geográficas particulares del país (topografía andina y carreteras sinuosas que la recorren) que imponen restricciones que dificultan la construcción y mantenimiento de la malla vial existente.

En el mismo informe se estima que Colombia cuenta con aproximadamente 165.403<sup>4</sup> kilómetros de malla vial, siendo la red terciaria la que posee la mayor extensión con un 76%, seguida por la secundaria con 14% y la primaria con sólo un 10%, resaltando que solo el 83% de la red primaria se encuentra pavimentada, mientras que para la red secundaria el porcentaje pavimentado es del 26%, y de la red terciaria no se tienen datos oficiales. Los anteriores indicadores permiten observar un claro rezago de la infraestructura vial en los últimos años.

Las operaciones de desarrollo y mantenimiento de las redes viales secundaria y terciaria están a cargo de los departamentos y municipios respectivamente, esto debido al proceso de descentralización del país (Fedesarrollo, 2013). Sin embargo, en los casos de ausencia de recursos y capacidades de mantenimiento, es el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) quien se hace cargo del mantenimiento de la red terciaria.

---

<sup>3</sup> (Fedesarrollo, 2013)

<sup>4</sup> La información primaria proviene de INVÍAS y la ANI. (Ver Nota original en Página 97)

Las dificultades en desarrollo y mantenimiento de las redes viales, sumado al creciente uso de la infraestructura vial, la cual pasó de 99.516 toneladas de carga transportada al interior en 1994 a 279.760 en el 2012 (Fedesarrollo, 2013), han hecho de la infraestructura vial y de transporte un eje importante dentro de las políticas nacionales de desarrollo.

La cantidad y calidad de las vías nacionales, dejan en evidencia la necesidad de avanzar en los procesos de construcción y mantenimiento de la infraestructura vial existente, mediante proyectos que hagan uso eficiente de los recursos disponibles de forma amigable con el medio ambiente, es decir, prácticas que contribuyan a la conservación de los recursos naturales y favorezcan el desarrollo sostenible.

En ese sentido, una alternativa que se ha mostrado viable para la construcción y mantenimiento de vías, presentando además contribuciones significativas tanto en costos de operación como en conservación de recursos naturales es el reciclaje.

El reciclaje de pavimentos asfálticos no es una idea nueva, las primeras experiencias de su uso, de acuerdo con la *Asphalt Recycling and Reclaiming Association* (ARRA, 2013), datan de inicio de los años 1900 (reciclaje en frío), siendo que el primer caso documentado en la literatura se da en 1930 (reciclaje en caliente). No obstante, es en la década de los 70s que el reciclaje empieza a ser una alternativa en construcción y mantenimiento de vías, esto debido a la crisis mundial de petróleo y a la evolución de maquinaria y equipos especializados para tal fin (ARRA, 2013).

El reciclaje de pavimentos, sea en frío o en caliente, con adición de pavimento asfáltico recuperado (RAP), emulsiones rejuvenecedoras, cemento asfáltico, espuma de asfalto, o aglomerantes hidráulicos, ha mostrado ser un método eficaz e innovador (Bernucci et al., 2008). Con relación a los agentes rejuvenecedores, la utilización de aceite de automóvil usado (*Waste Engine Oil - WEO*) es una línea de investigación reciente que ha venido despertando un gran interés por parte de algunos investigadores en los últimos años. En esas investigaciones el WEO se presenta como alternativa viable para la fabricación de mezclas con RAP aptas para uso en labores de mantenimiento (Dedene, 2011a, 2011b; DeDene & You, 2014; Jia et al., 2014; Kamaruddin, Hainin, Hassan, Abdullah, et al., 2014; Zaumanis, Mallick, Poulidakos, et al., 2014).

Desde el punto de vista normativo, en Colombia es permitido preparar mezclas asfálticas hasta un determinado contenido de RAP, lo cual es reglamentado por el INVIAS en su ARTICULO 462 -13 (Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente), donde se define un contenido máximo de 40% de RAP con un 60% de agregados vírgenes y asfalto nuevo.

Pese a la existencia de normatividad en el país para la preparación de mezclas asfálticas, el uso de materiales y tecnologías de reciclaje en la rehabilitación y mantenimiento vial, específicamente de RAP es aún incipiente. Lo anterior se debe en parte a la falta de materiales o aditivos comprobados que actúen como agente rejuvenecedor para el asfalto, de tal forma que permitan recuperar en cierto grado, sus propiedades ligantes y por ende la mejora de las propiedades mecánicas de la mezcla.

En este contexto, el presente proyecto explora para las condiciones propias de materiales – agregados pétreos, RAP y cemento asfáltico - el uso de WEO en diferentes proporciones, como agente rejuvenecedor para la restauración del asfalto envejecido en mezclas con RAP, de tal forma que la mezcla obtenida sea apta para labores de mantenimiento o construcción de capas asfálticas en vías secundarias y/o terciarias.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar el efecto del aceite quemado de motor en las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente que contienen material recuperado de pavimento asfáltico (RAP).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar los aceites quemados que más se generan en la industria automotriz de la ciudad de Ibagué.
- Implementar una metodología para el empleo de aceite quemado de motor de carro en mezclas asfálticas que contienen RAP.
- Determinar el contenido de aceite quemado con el cual se mejoren las propiedades mecánicas.
- Evaluar los cambios en las propiedades del ligante (penetración, viscosidad, punto de ablandamiento) con la introducción del aceite quemado.
- Evaluar la susceptibilidad al agua y la rigidez de las mezclas obtenidas.

## 3 ESTADO DEL ARTE

### 3.1 Reciclaje de Pavimentos

En las mallas viales, el deterioro es un proceso que ocurre de forma paulatina, el cual induce una disminución en la calidad del servicio que presta a lo largo del tiempo. Ese proceso es causado por la acción repetitiva de las cargas de servicio, por fenómenos naturales propios de la exposición a la intemperie y por las alteraciones físicas y químicas naturales de los materiales usados. El ciclo de vida útil de este tipo de infraestructura así como el control de su degradación, están asociados a la calidad de los materiales usados para su construcción, al diseño estructural, a la calidad de los procesos constructivos y a su mantenimiento (Reis, 2013).

El mantenimiento de vías pavimentadas a nivel mundial fue realizado durante muchos años aplicando capas sucesivas de concreto asfáltico sobre las capas existentes de cemento Portland o concreto asfáltico. La idea era prolongar al máximo la vida útil de la malla vial con recubrimientos sucesivos (Suzuki et al., 2005). Sin embargo, este tipo de mantenimiento a largo plazo produce otro tipo de problemas, asociados todos ellos con las estructuras solidarias a este, como son la altura útil en túneles, cotas de trabajo en drenajes y tapas de alcantarillado, el incremento de carga en puentes, así como la formación de declives en los costados de las mismas, aumentando de forma directa los riesgos para los usuarios de las vías.

Para la restauración de vías con pavimentos asfálticos, los métodos comúnmente empleados son o la aplicación de una capa asfáltica adicional sobre la ya existente, o el fresado y posterior recubrimiento con una capa asfáltica nueva. Como alternativa a esos dos métodos, surge la técnica de reciclaje, la cual consiste en el reaprovechamiento de los materiales recuperados del pavimento.

El reciclaje de pavimentos consiste básicamente en la reutilización de la capa de pavimento existente en la vía, o parte de ella, mezclado o no con nuevos materiales y agentes

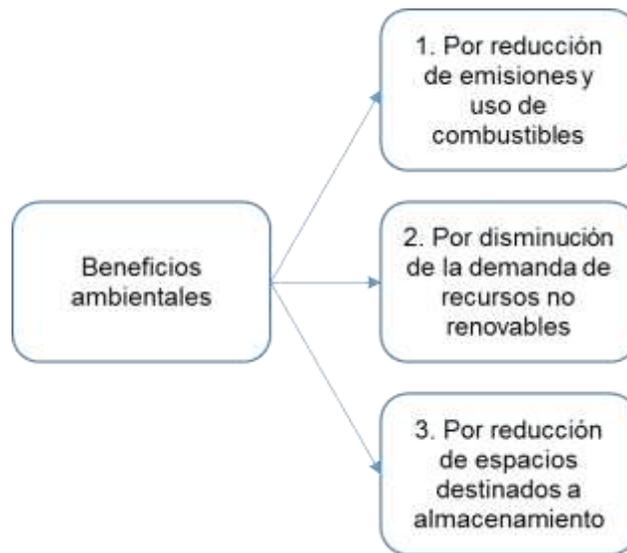
rejuvenecedores y/o ligantes asfálticos como asfaltos espumados, emulsiones asfálticas u otros materiales como cemento Portland, aditivos químicos (Bernucci et al., 2008). Todo lo anterior con el fin de obtener un pavimento con el cual reparar la vía existente, el cual debe poseer características similares o superiores a las del pavimento antiguo (Souza, 2009), evitando de esta forma la adición de capas nuevas, manteniendo la geometría y espesor original de la vía, evitando los problemas relacionados anteriormente.

El material removido de la capa asfáltica de las vías, mediante operaciones de fresado y triturado o RAP puede ser modificado y habilitado para su re-aprovechamiento en la construcción y/o reparación de vías.

El primer registro del uso de RAP se remonta al año 1915, empleado en la construcción de nuevas vías (Taylor, 1997). Sin embargo, el uso masivo de RAP se dio en los años 1970s debido a los altos precios del ligante asfáltico impulsados por la crisis energética vivida en esos años (Carpenter et al., 2012). Desde aquella época el uso de RAP se ha ido incrementado, debido en gran parte a los avances de las tecnologías de construcción de vías. Actualmente, el RAP es uno de los materiales más reciclados en el mundo (Chen et al., 2009) y, dependiendo de las mezclas realizadas, puede ser reciclado en un 100% (K. Hansen et al., 2011).

Desde el punto de vista económico, el uso de RAP tiene efectos directos en la disminución de costos, debido a una demanda menor de materiales vírgenes (Dedene, 2011b), energía y transportes entre otros (El-hmrawey et al., 2015; Thanaya & Arya, 2003). El reciclaje también genera impactos positivos en el ambiente, los cuales son expuestos en la Figura 1.

Figura 1 – Beneficios ambientales del uso de RAP en la construcción de nuevas estructuras de pavimentos



Fuente: (Baghaee Moghaddam & Baaj, 2016)

En el contexto nacional, y pese al gran interés a nivel mundial por las investigaciones en esta área, son pocas las experiencias de uso de RAP, destacándose la realizada por la Universidad Militar Nueva Granada (Ostos-Ascencio et al., 2011), en la cual se estudió el comportamiento mecánico de diferentes mezclas asfálticas y RAP proveniente de reciclaje de pavimentos flexibles. Como resultado de dicha investigación, se determinó que es posible usar RAP en altas tasas para mezclas asfálticas, además, se observó que la Resistencia a la Tracción Indirecta (RTI) no se ve afectada por las condiciones de humedad durante las pruebas, ni por el nivel de envejecimiento del asfalto en las mezclas.

La investigación más reciente en el ámbito nacional analiza los efectos en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas por sustitución parcial o total de sus agregados con aquellos contenidos en el RAP pero sin el uso de agentes rejuvenecedores. Fueron evaluadas la resistencia a la tracción indirecta y el módulo resiliente (Reyes-Ortiz et al., 2012). Los resultados sugieren que el uso de RAP en las mezclas tiene efecto en la rigidez del ligante (con relación a ligante virgen), con relación a los fallas por humedad ninguna de las mezclas presentó susceptibilidad a esta, es decir, la relación RTI fue superior al 80% en todos los casos.

### 3.2 Uso de WEO en mezclas asfálticas con RAP.

A pesar de no existir un límite definido en porcentaje de RAP para la preparación de HMA, si hay valores recomendados, los cuales dependen del diseño de las mezclas y de las normas establecidas en cada país. En algunos casos, el máximo porcentaje aceptable recomendado es hasta un 20% (K. R. Hansen & Copeland, 2014; Zaumanis & Mallick, 2015) y en la práctica han sido reportados usos de hasta el 50% (Copeland, 2011). En Colombia el procedimiento establece que el porcentaje de RAP debe ser aquel que garantice lo exigido por la especificación del proyecto, citando los límites definidos por el Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de América que son entre 20% y 50% (Art. 7.1.4 de INV E-812-13). Según (Zaumanis, Mallick, Poulidakos, et al., 2014), la variabilidad en las cantidad y calidad de ligante y agregados contenidos en el RAP (Al-Qadi et al., 2007) tienen un efecto directo en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, por esta razón, las agencias de control (en el caso americano) establezcan un valor máximo para el uso de RAP (Mogawer et al., 2012; Willis et al., 2012).

Una alternativa para aliviar los citados problemas del uso de RAP en grandes proporciones para mezclas asfálticas, es el uso de agentes rejuvenecedores, lo que permite que el RAP sea mezclado de forma efectiva con materiales vírgenes. Esos agentes tienen la capacidad de restaurar las propiedades reológicas y químicas de los componentes envejecidos presentes en el RAP (Zaumanis, Mallick, Poulidakos, et al., 2014).

Existen investigaciones enfocadas a la utilización de diversos compuestos como agentes rejuvenecedores para uso con RAP, entre ellos varios tipos de aceites de origen mineral y biológico. En la investigación más reciente, fue usado aceite derivado de residuos de *bio-diesel*, denominado *bio-oil*, como agente rejuvenecedor (Gong et al., 2016), se evaluaron las propiedades reológicas incluyendo viscosidad, resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas, resistencia a la fractura a bajas temperaturas del asfalto virgen, el envejecido y el rejuvenecido con *bio-oil*. Los resultados se mostraron que el *bio-oil* puede rejuvenecer el asfalto envejecido y mejorar su resistencia a la fractura a bajas temperaturas. Sin embargo y según el mismo autor, aún son necesarias más investigaciones debido a la presencia de grupos funcionales hidrofílicos en este tipo de aceite que comprometen su desempeño.

Otros tipos de bio-oil como el aceite de canola y aceite de pescado ya habían sido empleados para rejuvenecer el ligante usado en construcción de vías, sin embargo, estos aceites presentaron problemas de solubilidad con el asfalto, debido a esto, el aceite cubría los agregados previniendo la unión de los agregados y el asfalto, manifestándose en fallas como escurrimiento del ligante y exudación (el ligante y el fondo de la superficie se soltaron como una emulsión y se bombearon por la carga de tráfico a través de los poros en la capa superficial, pegándose a los llantas de los vehículos que pasaban por el área). (Guarin et al., 2016).

En el trabajo desarrollado por Zamuanis et al. (2014), seis tipos de aceites fueron evaluados, entre orgánicos y derivados del petróleo (incluyendo WEO). El patrón de referencia fue ligante virgen PG 64-22<sup>5</sup>, el cual fue comparado con las mezclas de ligante envejecido y los aceites, siguiendo la norma para ensayos AASHTO 320 (Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder). En esa prueba se buscó estimar las temperaturas máxima y mínima que permitan “eliminar o controlar” los tipos de fallas asociadas a ellas como son el ahuellamiento (altas temperaturas), agrietamiento en temperaturas intermedias (definida por el valor del módulo complejo de viscosidad  $G^*$ ) y agrietamiento a bajas temperaturas. El mejor desempeño fue obtenido por los aceites de tipo orgánico (PG 72-33), seguido del WEO (PG 78-19) comparados con el ligante virgen (PG 67-26). Con respecto a  $G^*$ , todas los seis rejuvenecedores consiguieron valores compatibles con las especificación dada en la norma AASHTO 320 ( $G^* \leq 5.000$  kPa). En el contexto nacional, el PG a baja temperatura para el WEO (-19°C) no es relevante ya que la gran mayoría de las vías no están sometidas a temperaturas de trabajo inferiores a cero grados.

En investigación posterior los mismos autores (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014), desarrollaron un procedimiento para determinar la dosis optima de rejuvenecedor (fueron evaluados los mismos tipos de aceites) a ser aplicado a mezclas asfálticas con RAP, con

---

<sup>5</sup> Un PG 64-22 indica que el asfalto tendrá la capacidad de resistir al ahuellamiento hasta 64°C, y tendrá una rigidez máxima hasta -22°C para que el asfalto pueda resistir el agrietamiento térmico a esa temperatura.

Disponible en:

<http://www.themartincompanies.com/martin-product-sales-hot-mix-asphalt> (28/11/2016)

el objetivo de cumplir con las especificaciones del diseño de mezclas tipo *superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavement*). En este es evaluado el grado de desempeño del asfalto envejecido en altas y bajas temperaturas de acuerdo con la metodología *superpave*, a través del análisis de penetración, el módulo de corte dinámico y el ángulo de fase. De forma sucinta, el procedimiento es el siguiente:

- Estimar la penetración del asfalto envejecido, antes y después de aplicación de agente rejuvenecedor.
- Probar el asfalto envejecido para los parámetros *superpave* alto, medio y bajo antes y después de aplicar el rejuvenecedor.
- Estimar la máxima cantidad de rejuvenecedor que satisfaga el valor de desempeño máximo requerido para mezcla *superpave*.
- Estimar la mínima cantidad de rejuvenecedor que satisfaga el valor de desempeño medio y mínimo requerido para mezclas *superpave* y seleccionar el mayor de ellos como el valor mínimo.
- Seleccionar la cantidad óptima como un valor comprendido entre el máximo y mínimo calculado anteriormente

Las mezclas con aceites de tipo orgánico requieren menores cantidades del mismo, en comparación con aceites derivados del petróleo, sin embargo, y de acuerdo con los mismos autores, una investigación más amplia, que incluya RAP de diferentes fuentes, así como un análisis estadístico más profundo, es necesaria para validar los resultados obtenidos.

A pesar que el desempeño de WEO como agente rejuvenecedor es menor comparado con aceites de origen orgánico (mayores valores de módulo resiliente, menor tolerancia a bajas temperaturas y pérdida de masa por evaporación de compuestos volátiles), el hecho que sea de origen reciclado lo convierte en una opción interesante para su uso en mezclas con RAP.

Actualmente existen dos revisiones con respecto al uso del RAP y WEO (además de otros agentes rejuvenecedores) en mezclas asfálticas, discutiendo por una parte usos de RAP y su capacidad para usar en reciclaje junto con WEO como agente rejuvenecedor (Dhananjay et al., 2016) obteniendo los siguientes resultados:

- Al aumentar el porcentaje de asfalto envejecido hay un aumento significativo en la rigidez, viscosidad y temperatura crítica de la mezcla.
- El uso de RAP produce aproximadamente un 78% de reducción en el contenido óptimo del ligante utilizado en los proyectos de carreteras.

- El uso de WEO como agente de reciclaje con RAP ayuda a mejorar sus propiedades a baja temperatura y propiedades físicas (Ductilidad, Punto de Ablandamiento, Viscosidad, rigidez, etc.)
- El uso del RAP reduce los costos de construcción ya que su adición a mezclas asfálticas muestra mejores resultados que el de las mezclas con material virgen.
- Según la Administración Federal de Carreteras (EEUU), 73 millones de toneladas de pavimento de asfalto recuperado se reutilizan cada año. Esto es casi el doble que el papel, el vidrio, el aluminio y los plásticos combinados.
- El reciclaje de asfalto beneficia al medio ambiente de muchas maneras. En particular, reduce la explotación de canteras, la minería y el consumo de petróleo.
- El reciclaje de asfalto también reduce drásticamente el consumo de recursos tales como combustible, maquinaria, transporte y mano de obra en comparación con la producción de materiales de asfalto virgen.

Por otra parte, en la segunda es una revisión sistemática de varios compuestos que han sido ensayados como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP, incluyendo el WEO (Baghaee Moghaddam & Baaj, 2016). En total fue documentado la existencia de 42 combinaciones entre agentes rejuvenecedores y dosificaciones, así como su efecto en aspectos tales como ahuellamiento, fatiga, susceptibilidad a la humedad, y propiedades a bajas temperaturas. Solo tres de los compuestos analizados obtuvieron resultado positivo en cada una de las variables analizadas (calificación 4/4), dichos compuestos fueron aceite vegetal usado (WVO – Waste Vegetable Oil), aceite orgánico y extractos aromáticos. El WEO presentó resultado por debajo de lo esperado en la susceptibilidad a fallas por agrietamiento (calificación 3/4). El porcentaje de WEO usado en este caso fue de 12% con relación al contenido total de asfalto de la mezcla.

En ensayo realizado en Michigan-Estados Unidos sobre el uso de WEO (Dedene, 2011a), donde fueron analizados los resultados de la Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier en muestras de asfalto envejecido con asfalto virgen y WEO, este último en porcentajes de 0%, 4% y 8%, en mezclas con 25% de RAP, se encontró que la adición de RAP produce un aumento en el desempeño de la mezcla a altas temperaturas (pasando de 70oC a 76°C), al ser adicionado 4% de WEO, el desempeño se reduce a niveles comparables con una mezcla con materiales vírgenes (70°C), mientras que al ser usado

8% de WEO, el desempeño en altas temperaturas se reduce a 64°C. Se concluye que el WEO posee la capacidad de disminuir la rigidez de la mezcla de RAP en el pavimento, además de la restauración del grado de desempeño del ligante a niveles similares al virgen.

### **3.2.1 WEO en el contexto regional**

En la ciudad de Ibagué, el WEO se ha convertido en un residuo sin ningún uso masivo para reutilización como insumo o materia prima de otros procesos, convirtiéndose en un agente contaminante cuando es dispuesto de forma inadecuada.

En el año 2007 CORTOLIMA realizó las primeras visitas de control y seguimiento dirigidas a los generadores de aceites usados (estaciones de servicio, servitecas, industrias, talleres de mecánica, cargue y descargue de hidrocarburos), exigiendo la presentación de los Planes de Manejo Ambiental, para las estaciones de servicios y control de vertimiento y recolección ilícita de aceite usado. En las visitas se identificaron 197 empresas generadores de WEO sólo en el departamento del Tolima, correspondientes a 10 municipios: Ibagué, Espinal, Piedras, Cajamarca, Alvarado, Herveo, Fresno, Mariquita, Ortega y Saldaña, teniendo así una cobertura del 23.4% del departamento (Cortolima, 2009).

Para el año 2013 en el Departamento del Tolima se realizó la recolección de 129.334 Litros de aceite usado en el año, correspondiente a 628,75 tambores de 55 galones, y fue realizada por parte de las cinco empresas receptoras autorizadas por Cortolima, que se detallan a continuación: Transporte Juanchito, Activos ambientales, Aceites Giraldo, ATP Ingeniería y Proyectos Ambientales Hernández Asociados. (CORTOLIMA, 2014).

Del total de aceite usado para el año en cuestión, 7.285 galones fueron de WEO, de los cuales el 32% provenía de vehículos con menos de 50.000 Km de recorrido y que usaban un aceite de baja viscosidad SAE30 (15W30), mientras que un 45% provenía de vehículos con más de 50.000 Km de recorrido y que requerían un aceite de mayor viscosidad SAE50 (20W50).

De acuerdo con los registros de CORTOLIMA, estos aceites son recolectados y posteriormente tratados para obtener un combustible industrial, que por su naturaleza es poco eficiente, generando a su vez un impacto negativo al ambiente por emisiones de gases de combustión.

Considerando las cantidades generadas de WEO en el departamento del Tolima, y su posible uso como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP (también reciclado), la combinación WEO + RAP se convierte en una alternativa que contribuye a la solución del problema de mantenimiento y/o construcción de buena parte de malla vial de tipo terciaria. Con esto, se quiere aportar una alternativa para la utilización efectiva del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado como capa intermedia en la realización de proyectos de mantenimiento y conservación de vías secundarias y terciarias a menor costo, contribuyendo además a la conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto ambiental.

### 3.3 Propiedades Reológicas

La reología, definida de forma sucinta<sup>6</sup>, “es la ciencia que estudia el flujo o deformación de los materiales”. Así, en los asfaltos las propiedades reológicas más importantes son: la consistencia o viscosidad a diferentes temperaturas, la susceptibilidad térmica, la trabajabilidad, la seguridad y la durabilidad – envejecimiento.

Las investigaciones centradas en el uso de WEO en mezclas asfálticas con RAP analizan una o varias de estas propiedades, en (Jia et al., 2014) se afirma que las propiedades reológicas del cemento asfáltico obtenido a partir de mezclas de RAP con aceites se ven mejoradas, sobre todo en el desempeño a bajas temperaturas, sin embargo, existe un compromiso de otros índices de desempeño como la resistencia a altas temperaturas y ciertos aspectos de resistencia a la fatiga. Con relación a la investigación desarrollada por (Romera et al., 2006) se encontró que mezclas de 20% de aceite con 80% de asfalto envejecido presentan características similares al asfalto virgen 60/70.

---

<sup>6</sup> en:

[https://www.repsol.com/pe\\_es/productos\\_y\\_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/reologia/](https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/reologia/)  
consultada en 01/10/2016

## 4 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo son descritos los materiales, instrumentos y métodos experimentales usados para la realización de los diferentes ensayos.

### 4.1 Materiales

Los principales materiales usados para el desarrollo de esta investigación fueron agregados vírgenes, RAP, cemento asfáltico, WEO y algunos insumos propios de cada uno de los ensayos realizados (por ejemplo solventes). A continuación son detallados el origen de los materiales usados.

**Agregados vírgenes:** Estos materiales fueron suministrados por la Gobernación del departamento del Tolima, los cuales fueron extraídos del río Cucuana, en el sector de El Palmar (Municipio de Saldaña – Tolima), y posteriormente triturados en la planta hasta obtener un material con combinación granulométrica de 30% de triturado de  $\frac{3}{4}$ ", 65% de arena de trituración y 5% de llenante mineral.

**WEO:** Aceite quemado de automóvil suministrado por el concesionario FORD de la ciudad de Ibagué (Cra.5. Con 46), del tipo SAE30 (15W30). De los dos aceites de mayor uso en el departamento, este fue el único que se encontró en condiciones adecuadas para el experimento, es decir, no estaba contaminado con otros tipos de aceites quemados, como fue el caso de la referencia SAE50 (20W50).

**RAP:** Pavimento asfáltico recuperado de la vía Guamo – Saldaña km 6. Este material fue suministrado por la Gobernación del Tolima.

**Cemento Asfáltico:** Compuesto por asfalto nuevo de Ecopetrol refinería Barrancabermeja, y por asfalto envejecido contenido en el RAP.

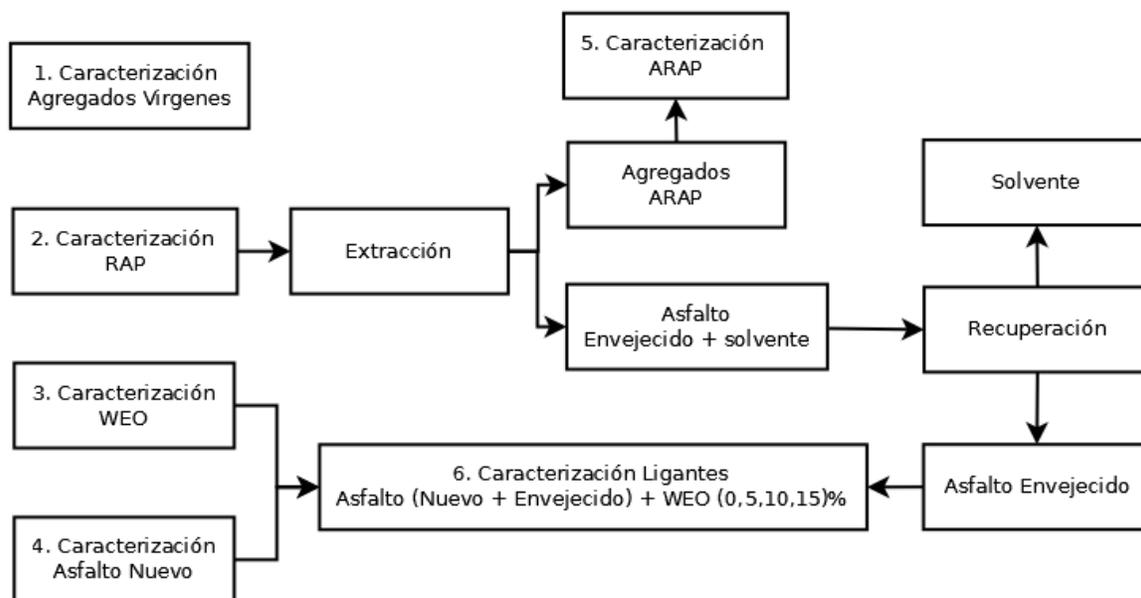
**Instrumentación:** Las pruebas se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de suelos y pavimentos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y en el Laboratorio de

pavimentos de la Universidad Cooperativa de Colombia Sede Ibagué, los cuales cuentan con los diferentes equipos e instrumentos sugeridos por la norma para cada caso.

## 4.2 Metodología experimental – Caracterización de materiales y preparación de mezclas asfálticas

En esta etapa del trabajo fueron realizados diferentes ensayos para cada material, con el fin de obtener sus características y evaluar si cumplían o no con las especificaciones requeridas para la preparación de mezclas asfálticas MDC-19. En la Figura 2 se describe en forma de diagrama de flujo las caracterizaciones realizadas. Posteriormente son descritas de forma detallada indicando la norma pertinente en cada caso.

Figura 2 – Etapas de caracterización de materiales.



Fuente: el autor

### 4.2.1 Agregados vírgenes

La variable caracterizada para este tipo de material fue la granulometría, realizada de acuerdo con la norma de ensayo de materiales para carretera INV E-123-13 de INVIAS, “Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos”. Esta caracterización tiene como objetivo particular determinar si las características de los agregados vírgenes son compatibles con los requeridos para una mezcla asfáltica MDC-19 (Capítulo 4, Art. Art. 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS).

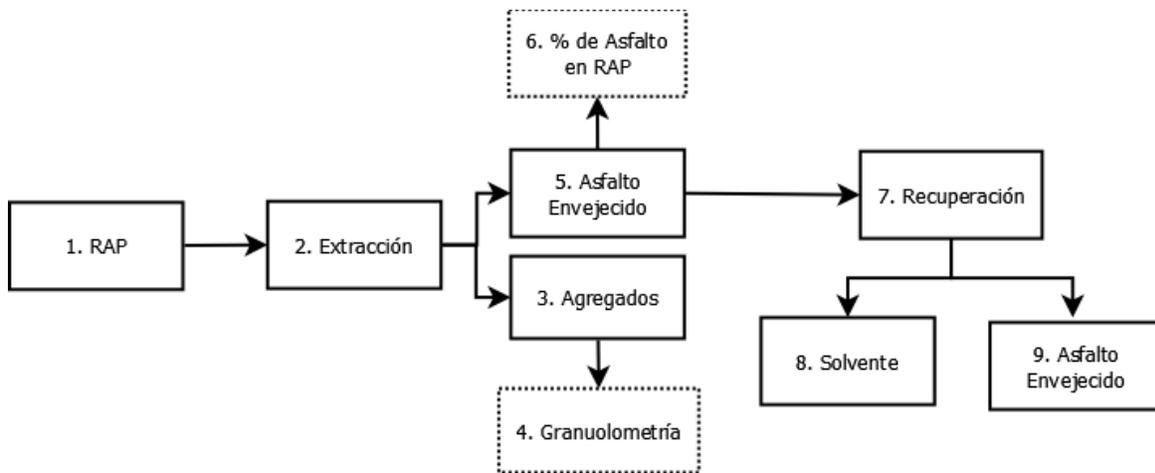
## 4.2.2 RAP

En la caracterización del RAP el objetivo fue determinar la granulometría y el porcentaje de asfalto envejecido contenido en este. Para la granulometría se usó la metodología establecida en ensayo de materiales de carretera INV E-782-13, “Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas”.

Una vez extraído el ligante contenido en las muestras de RAP<sup>7</sup>, de acuerdo con la norma INV E-732-13, “Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos”, y por diferencia de masa es calculado el porcentaje de asfalto contenido en el RAP.

Conocidos el porcentaje de asfalto y la granulometría de los agregados extraídos del RAP (ARAP), se procedió a recuperar el asfalto envejecido necesario para la caracterización de ligantes asfálticos (Bloque 6 en Figura 2). Para la recuperación del asfalto envejecido se siguió la norma INV E-759-13 “Recuperación de asfalto de una solución usando el evaporador rotatorio”. El diagrama de flujo de la Figura 3 permite observar de forma detallada las etapas realizadas para caracterización del RAP, extracción y recuperación de asfalto envejecido.

Figura 3 – Etapas de caracterización de RAP



Fuente: el autor.

<sup>7</sup> El solvente usado para la extracción del asfalto envejecido en muestras de RAP fue Tricloroetileno.

### **4.2.3 WEO**

Para la caracterización del WEO fue necesaria la contratación de un laboratorio especializado en este tipo de pruebas. El objetivo fue determinar las propiedades del WEO utilizado, de tal forma que sirvan como referencia a otros investigadores para efectos comparativos y/o de replicación del estudio.

### **4.2.4 Asfalto nuevo**

Dado que este material fue suministrado por Ecopetrol (Barrancabermeja) junto con el certificado de propiedades reológicas (60/70), no fue necesario realizar una caracterización adicional. Este es el tipo de asfalto comúnmente usado en el departamento del Tolima, dadas las condiciones de temperatura de la región (Vía Guamo-Saldaña), donde la temperatura promedio anual es de 29,0°C. De acuerdo con la Tabla 450-8, del artículo 450 del INVIAS, para temperaturas superiores a 24oC, el tipo de asfalto recomendado es el de grado 60/70.

### **4.2.5 Ligantes**

Por último, y de acuerdo con la secuencia presentada en la Figura 2, la caracterización de los ligantes asfálticos (Bloque 6 en la misma figura) fue realizada luego de la recuperación del asfalto envejecido, el cual es mezclado con asfalto nuevo y el WEO caracterizado previamente. Las proporciones de cada uno de los componentes fueron determinados respetando la proporción inicial de 65% de agregados vírgenes y 35% de RAP.

De acuerdo con el método Duriez, la cantidad de ligante en la mezcla asfáltica debe ser del 5,9%. Dado que las probetas tipo Marshall pesan 1,200 gramos, la cantidad de ligante por probeta es de 70.6g. Este último, se tomó para calcular la cantidad de WEO en peso a ser adicionado a la mezcla, considerando al WEO como si actuara como ligante, lo cual no necesariamente es correcto.

$$70,6 \text{ g} = \text{Asfalto nuevo} + \text{Asfalto del RAP} + \text{WEO}$$

Donde el peso del asfalto del RAP es constante y la cantidad de asfalto nuevo varía (disminuye) de acuerdo con la adición de WEO. Los valores detallados se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 1 – Proporciones de WEO usadas para los ensayos de Ligantes

MEZCLA No 1	WEO	0%
<b>AGREGADOS</b>		
Agreg. RAP (ARAP)	396,25 g.	35%
Agregado Virgen	733,15 g.	65%
<b>Total agregados</b>	<b>1129,40 g.</b>	<b>100%</b>
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	43,30 g.	61%
WEO	0,00 g.	0%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 2	WEO	5,00%
<b>AGREGADOS</b>		
Agreg. RAP (ARAP)	396,25 g.	35%
Agregado Virgen	733,15 g.	65%
<b>Total agregados</b>	<b>1129,40 g.</b>	<b>100%</b>
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	39,77 g.	56%
WEO	3,53 g.	5%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 3	WEO	10,00%
<b>AGREGADOS</b>		
Agreg. RAP (ARAP)	396,25 g.	35%
Agregado Virgen	733,15 g.	65%
<b>Total agregados</b>	<b>1129,40 g.</b>	<b>100%</b>
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	36,24 g.	51%
WEO	7,06 g.	10%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 4	WEO	15,00%
<b>AGREGADOS</b>		
Agreg. RAP (ARAP)	396,25 g.	35%
Agregado Virgen	733,15 g.	65%
<b>Total agregados</b>	<b>1129,40 g.</b>	<b>100%</b>
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Viejo	27,30 g.	39%
Asf. Envejecido del RAP	32,71 g.	46%
WEO	10,59 g.	15%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

La adición de WEO se realizó de forma incremental como se indica en la Tabla 1. Fueron preparadas tres especímenes para cada combinación (3 réplicas) y cada una de ellas sometida a los siguientes ensayos:

- Viscosidad de acuerdo con la norma INV E-717-13 “Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional”.
- Punto de ablandamiento, norma INV E-712-13 “Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)”.
- Penetración, norma INV E-706-13 “Penetración de los materiales bituminosos”.

#### 4.2.6 Mezclas finales

Concluida la etapa de caracterización de los materiales, la cual permitió conocer entre otras variables la temperatura de mezclado y compactación, se procedió a la elaboración de las mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de WEO. Posteriormente, fueron realizados los ensayos necesarios para determinar las propiedades físicas y mecánicas de estas.

Para la preparación y dosificación de los componentes reciclados en cada mezcla, se siguió el procedimiento INV E-812-13 “Determinación de la proporción y del grado del agente de reciclado en mezclas de concreto asfáltico elaboradas en caliente con material reciclado”. De forma general, la composición<sup>8</sup> de las mezclas corresponde a 65% de agregados vírgenes y 35% de RAP. La cantidad de asfalto nuevo fue ajustada considerando el porcentaje de asfalto envejecido presente en el RAP y las adiciones de WEO, de forma que cumplieran con los requerimientos para una mezcla MDC-19 y el método Duriez. Este último permite determinar el porcentaje óptimo teórico de asfalto con base en la superficie específica de los agregados. Cabe resaltar que todos los materiales y recipientes para elaboración de las mezclas deben estar a la temperatura de mezclado calculada a partir del ensayo de viscosidad.

Una vez obtenidas las mezclas, se procedió a la realización de diferentes ensayos los cuales se citan a continuación:

- Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos INV E-733-13 (INVIAS, 2013b).
- Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas y abiertas INV E-736-13 (INVIAS, 2013d).
- Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall INV E-748-13 (INVIAS, 2013e).
- Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta INV E-725-13 (INVIAS, 2013c).
- Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas BS EN 12967.

#### *4.2.6.1 Elaboración de Mezclas con WEO*

El porcentaje óptimo de asfalto de las mezclas se determinó por el método Duriez, obteniéndose como resultado un 5,9%. Posteriormente se procedió a la elaboración de 12 briquetas por cada una de las cuatro mezclas con diferentes inclusiones de WEO (0%, 5%, 10% y 15%), para un total de 48 briquetas de 1200 g cada una. Para la evaluación de las

---

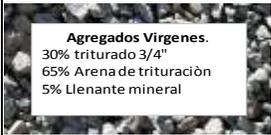
<sup>8</sup> Porcentajes y proporciones en peso.

propiedades mecánicas de las mezclas se asignaron 3 briquetas para determinar la estabilidad y flujo utilizando el equipo Marshall, 3 para el módulo resiliente y las 6 restantes para medir la susceptibilidad al agua (3 en estado seco y 3 en estado sumergido).

Las briquetas fueron elaboradas teniendo en cuenta los parámetros para una mezcla densa en caliente MDC-19, en donde los agregados fueron distribuidos en 65% de agregados vírgenes del río Cucuana y 35% ARAP. (Ver Figura 4), la distribución granulométrica del agregado virgen fue de 30% de triturado ¾”, 65% arena de trituración y 5% de llenante mineral, se utilizaron las mismas dosificaciones de los agregados para las cuatro mezclas con diferentes inclusiones de WEO.

Las proporciones de las mezclas con respecto al peso, fueron tomadas en laboratorio utilizando una balanza digital, conservándose constante para las 4 mezclas el peso de los agregados y del asfalto envejecido proveniente del RAP que fue calculado mediante el ensayo de laboratorio “extracción cuantitativa del asfalto”. Para la inclusión de WEO y asfalto nuevo se tuvo en cuenta que el peso del ligante fuera de 70,6 g (porcentaje óptimo de asfalto igual a 5,9%) para las 4 mezclas, de los cuales 27,3 g son aportados por el asfalto envejecido del RAP y los 43,3 g restantes entre el asfalto nuevo y el WEO, ajustándose el valor de este último a cada una de las inclusiones. Las temperaturas de los materiales en el proceso de mezclado para cada una de las inclusiones de WEO fueron: para los agregados vírgenes y el RAP de 165°C, 162°C, 160°C y 135°C, para el asfalto nuevo 160°C, 157°C, 155°C y 130°C y el WEO fue adicionado sin calentamiento previo (temperatura de calentamiento segura 163±1 °C). (Ver Figura 4 a Figura 7).

Figura 4 – Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 0%

Tipo de mezcla:	MDC - 19		% Asfalto:	5,88	
Mezcla (0% WEO)					
<b>Agregados de la mezcla</b>			<b>Ligante de la mezcla</b>		
65%	+	35%			
					
733,15 g	+	396,25 g	27,3 g	+	43,3 g
Peso = 1129,4 g			Peso = 70,6 g		
Peso total de briketa = 1200 g					

Fuente: el autor.

Figura 5 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 5%

Agregados de la mezcla		Mezcla (5% WEO)			Ligante de la mezcla		
65%	35%						
733,15 g	396,25 g	27,3 g	39,8 g	3,5 g			
Peso = 1129,4 g		Peso = 70,6 g					
Peso total de briqueeta = 1200 g							

Fuente: el autor.

Figura 6 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 10%

Agregados de la mezcla		Mezcla (10% WEO)			Ligante de la mezcla		
65%	35%						
733,15 g	396,25 g	27,3 g	36,2 g	7,1 g			
Peso = 1129,4 g		Peso = 70,6 g					
Peso total de briqueeta = 1200 g							

Fuente: el autor

Figura 7 - Preparación de Mezclas – Mezclas asfáltica con RAP y WEO al 15%

Agregados de la mezcla		Mezcla (15% WEO)			Ligante de la mezcla		
65%	35%						
733,15 g	396,25 g	27,3 g	32,7 g	10,6 g			
Peso = 1129,4 g		Peso = 70,6 g					
Peso total de briqueeta = 1200 g							

Fuente: el autor

Teniendo las mezclas optimas dosificadas, se procedió al calentamiento de los materiales en una estufa eléctrica hasta lograr las temperaturas óptimas de mezclado, las cuales fueron determinadas en el ensayo de viscosidad del ligante siendo estas de 160°C, 157°C, 155°C y 130°C para cada una de las inclusiones de WEO de 0%, 5%, 10% y 15% respectivamente, seguidamente se homogenizaron las mezclas hasta que los agregados estuvieran cubiertos de ligante.

Se procedió a la lubricación de los moldes (calientes) para evitar la adherencia del material, las mezclas fueron vaciadas dentro de un molde cilíndrico y distribuidas uniformemente, Luego se procedió a la preparación del equipo manual de compactación Marshall acorde con las especificaciones descritas en la Norma (INV E-748-13).

El proceso de compactación de las mezclas fue realizado mediante la aplicación de 75 golpes con el martillo por cada cara. Posteriormente se dejaron en reposo dentro del molde hasta alcanzar una temperatura cercana a la temperatura ambiente y proceder a la extracción de las briquetas.

### 4.3 Metodología estadística

El modelo estadístico utilizado fue anava de dos vías, con cuatro tratamientos correspondientes a cuatro mezclas con inclusiones crecientes de WEO en porcentajes de 0%, 5%, 10% y 15%, calculado con base al peso total del ligante y tres diferentes temperaturas 10°C, 20°C y 30°C<sup>9</sup>, de acuerdo con la práctica tradicional a nivel nacional de tres temperaturas y tres frecuencias (2,5Hz 5,0Hz y 10Hz). Este método, junto con el test de hipótesis de Duncan (Montgomery, 2008), permite establecer el efecto de las diferentes adiciones de WEO en las muestras de asfalto recuperado y en las mezclas finales.

Las variables dependientes estudiadas fueron:

- Viscosidad
- Penetración
- Punto de ablandamiento en el asfalto recuperado

Para las mezclas finales:

---

<sup>9</sup> La norma europea BS EN 12697-26:2012 sugiere 10°C, 20°C, 30°C y 40°C.

- Estabilidad y flujo
- Porcentaje de vacíos
- Susceptibilidad al agua y tensión indirecta
- Módulo resiliente.

Adicionalmente fue realizado un análisis de regresión para las variables de las mezclas finales (exceptuando el módulo resiliente).

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1 Caracterización de Agregados Vírgenes

Los agregados son clastos de rocas ígneas con arenas donde predomina el cuarzo, presentaron una coloración gris homogénea, con una superficie sin agrietamientos ni foliación, con porcentaje de caras fracturada importante dada su condición de material de trituración.

Los agregados vírgenes corresponden a SP - Arena Pobrementemente Gradada de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos, o A-1-a de acuerdo con la clasificación de la AASHTO. Resultados detallados en Anexo 1

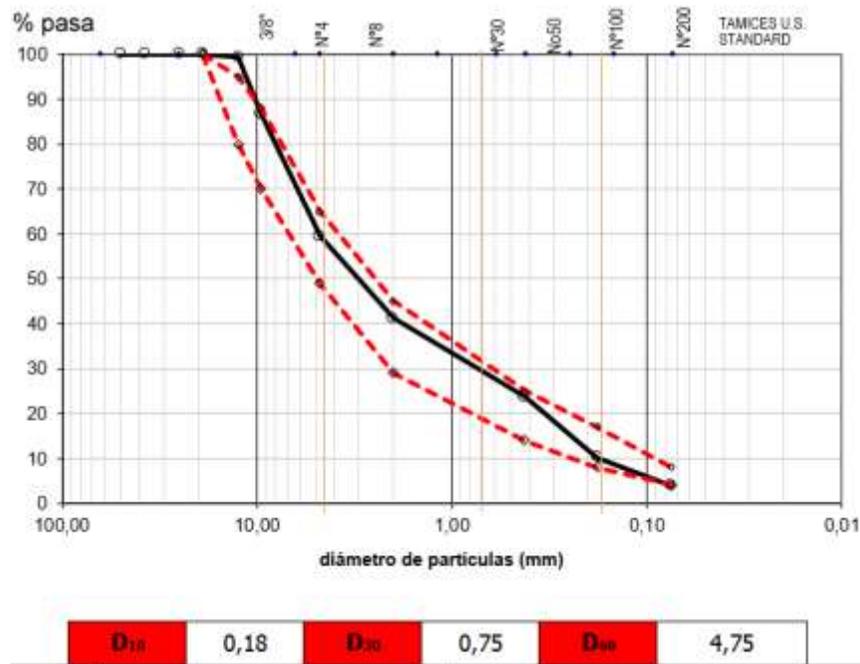
*Tabla 2 - Resultados del análisis de granulometría de agregados vírgenes*

Agregado	Porcentaje (%)
Grava	40.47
Arena	55.64
Finos	3.88

Fuente: el autor.

La gradación de los agregados vírgenes cumple con los rangos especificados para mezclas asfálticas tipo MDC-19 (Art. 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS), como se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8 – Curva granulométrica – Agregados vírgenes



Fuente: el autor.

## 5.2 Caracterización de RAP

Una inspección visual preliminar al RAP utilizado, permite evidenciar que este conserva en un alto porcentaje los agregados gruesos, lo cual demuestra las características favorables de estos ante la abrasión por el uso y fresado del material.

El porcentaje de asfalto contenido en las muestras de RAP analizadas fue en promedio del 6.4%. Los resultados detallados pueden ser observados en Anexo 2.

Los agregados extraídos de las muestras de RAP, clasifican como SW-SM, ARENA BIEN GRADADA - ARENA LIMOSA de acuerdo con el USCS o como A-1-a según la ASSHTO y las proporciones de sus componentes se muestran en la Tabla 3. Información detallada de los ensayos disponible en el Anexo 4.

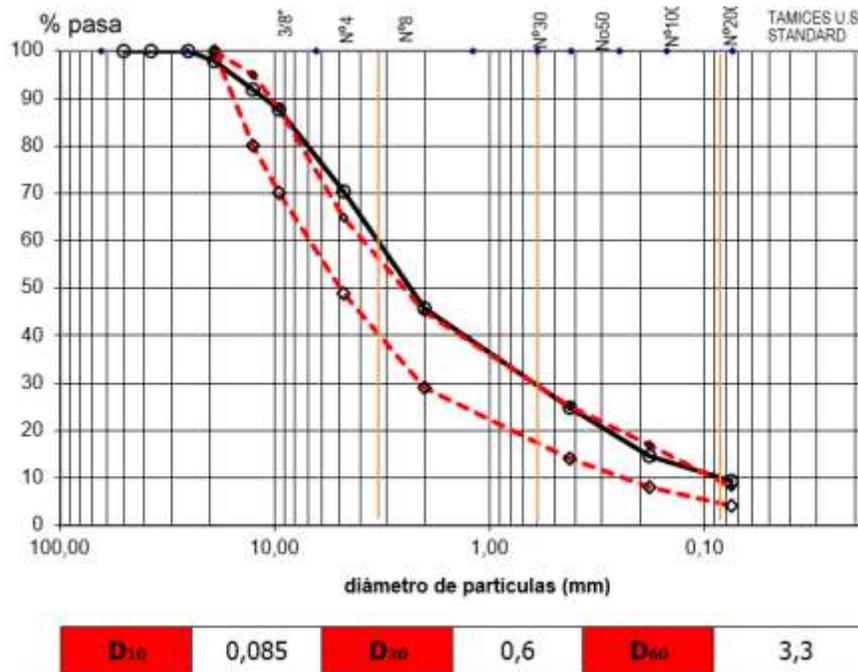
Tabla 3 - Resultados del análisis de granulometría de agregados del RAP

Agregado	Porcentaje (%)
Grava	29,50
Arena	61,19
Finos	9,31

Fuente: el autor.

Al evaluar los resultados obtenidos con la curva granulométrica para mezclas asfálticas de gradación continua (concreto asfáltico) Artículo 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, se observó que la curva para agregados del RAP (línea continua en la Figura 9) se encuentra muy próxima del límite superior establecido por la norma (líneas discontinuas en la misma figura), es decir corresponde a la gradación más fina recomendada para este tipo de mezclas.

Figura 9 – Curva granulométrica – Agregados del RAP

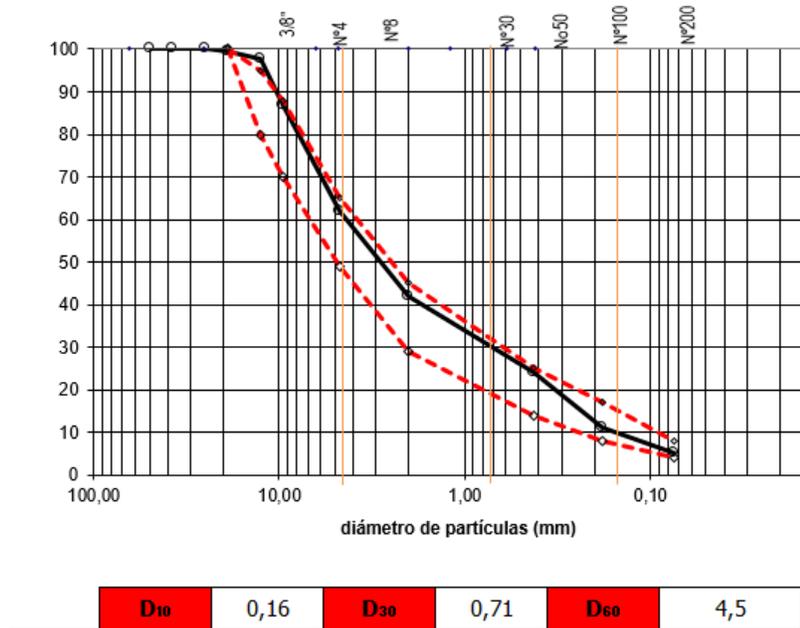


Fuente: el autor.

### 5.3 Caracterización de agregados en la mezcla asfáltica

La gradación de la mezcla final de agregados del RAP y agregados vírgenes se encuentran dentro de los parámetros establecidos en Artículo 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS para concreto asfáltico, este resultado es esperado dado que la gradación de los dos materiales de forma aislada cumplen con los mismos requerimientos (ver Figura 10).

Figura 10 – Curva granulométrica para Agregados de la Mezcla 65%-35%



### 5.4 Caracterización de WEO

Esta caracterización, realizada por el laboratorio LIPFA de la Universidad del Tolima, de acuerdo con el protocolo de ensayo de la *American Standard Testing of Materials* (indicadas en Tabla 4), permite establecer las condiciones particulares de la calidad del WEO empleado en este estudio, análisis en Anexo 3.

Tabla 4 – Valores reportados para WEO usado para los experimentos

Parámetros	Valores	Unidades	Norma ASTM
Densidad	875 +/- 4,20	Kg m <sup>-3</sup>	D-1298
Gravedad API	901 +/- 14,1	-	D-1298
V. Cinemática 20°C	3,86 +/- 0,012	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	D-445
Cenizas sulfatadas	0,334 +/- 0,005	% (p/p)	D-874
Humedad	0,10 +/- 0,001	% (v/v)	D-95
Sólidos 0,20 +/- 0,002	0,20 +/- 0,002	% (p/v)	D-9362
P. Inflamación	163 +/- 1	°C	D-92

Fuente: el autor.

## 5.5 Caracterización del asfalto del RAP

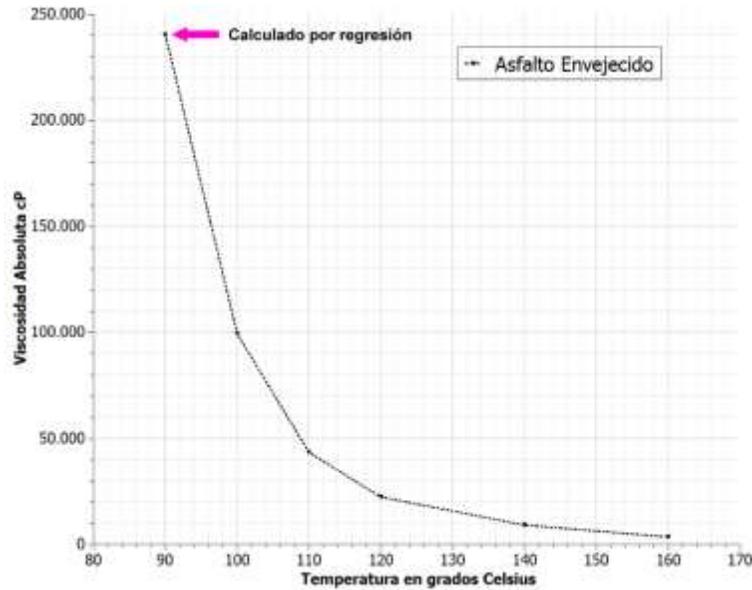
Para el asfalto envejecido fueron realizados ensayos de penetración y punto de ablandamiento, obteniéndose los siguientes resultados:

$$Penetración_{\left(\frac{1}{10mm}\right)} = 8,9$$

$$Punto\ de\ ablandamiento = 95,3\ ^\circ C$$

El ensayo de viscosidad fue realizado a partir de 100°C, esto debido a la dureza del material el cual no permitió realizar la prueba a partir de los 90°C como en los casos con inclusión de WEO, por tal razón, el valor presentado en la gráfica para esa temperatura fue calculado mediante regresión.

Figura 11- Viscosidad del asfalto envejecido.



Fuente: el autor.

### 5.5.1 Modelos de regresión

La relación viscosidad – temperatura y los modelos matemáticos que representan su comportamiento fueron explorados por (Cárdenas & Fonseca, 2009) para una un asfalto convencional y dos modificados con polímeros reciclados. Los modelos que mejor representaron su comportamiento fueron en su orden el de Arrhenius ( $\overline{R^2}=0,99$ ), ley de potencia ( $\overline{R^2}=0,98$ ) y exponencial lineal ( $\overline{R^2}=0,97$ ). De acuerdo con el mismo autor también es posible usar un modelo polinómico de sexto grado, sin embargo fue descartado por presentar deficiencias al momento de calcular la viscosidad para ciertos valores de temperatura (valores negativos de viscosidad a altas temperaturas o valores que no concuerdan con los datos experimentales).

Para los datos de este estudio, los coeficientes tanto del modelo polinómico (orden 5) como el Arrhenius<sup>10</sup> poseen un  $R^2 = 1,00$ , sin embargo, se decidió trabajar con el modelo Arrhenius por simplicidad de la expresión matemática. En la Figura 12 se presenta el

<sup>10</sup> El valor exacto para el coeficiente de correlación del modelo Arrhenius es 0,9996

comparativo de los dos modelos analizados, así como las expresiones para cada uno de ellos. Se aprecia que el comportamiento de los dos modelos es muy similar y pueden predecir con bastante precisión los datos experimentales.

Figura 12 – Comparativo de modelos de regresión para la variable Viscosidad de Asfalto envejecido.



Fuente: el autor

## 5.6 Caracterización de Asfalto Nuevo

Las características del asfalto nuevo fueron suministradas mediante ficha técnica por Ecopetrol. Estas características se encuentran dentro de los rangos descritos en las especificaciones del cemento asfáltico con grado de penetración 60 - 70 tomadas como referencia para la evaluación del efecto de las diferentes inclusiones de WEO. Las características son presentadas en la Tabla 5 a continuación:

Tabla 5 – Caracterización del asfalto nuevo utilizado en los experimentos

ANALISIS	UNIDAD	RESULTADO	ESPECIFICACION	METODO
CURVA REOLOGICA				
VISCOSIDAD A 60 C	cP	200000	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 80 C	cP	18813	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 100 C	cP	3175	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 135 C	cP	355	REPORTAR	ASTM D 4402
VISCOSIDAD A 150 C	cP	171.2	REPORTAR	ASTM D 4402
DUCTILIDAD	cm	140	100 MINIMO	ASTM D 113 D
GRAVEDAD API/GRAVEDAD ESPECIF. EN CRUDOS				
GRAVEDAD API	Grados API	7.6	REPORTAR	ASTM D 4052
DENSIDAD A 15 °C	kg/m3	1016.6	REPORTAR	ASTM D 4052
INDICE DE PENETRACION CALCULADO				
PENETRACION A 25 C (77 F)	mm/10	63	60 MINIMO - 70 MAXIMO	ASTM D 5
INDICE DE PENETRACION	N/A	-1.2	REPORTAR	ASTM D 5
PERDIDA DE MASA (RTFOT)	g/100g	0.40	1.0 MAXIMO	ASTM D 2872
PUNTO ABLANDAMIENTO	°C	47.7	45 MINIMO - 55 MAXIMO	ASTM D 36
PUNTO DE INFLAMACION	°C	288	232 MINIMO	ASTM D 92
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO	%	99.9	99.0 MINIMO	ASTM D 2042
VISTO BUENO TANQUES				
VoBo	N/A	SI	REPORTAR	VISTO BUENO
COMENTARIO	N/A	NINGUNO	REPORTAR	VISTO BUENO

Fuente: Ecopetrol, reporte de resultados de ensayo de laboratorio

## 5.7 Caracterización de Ligantes

Las mezclas de ligantes compuestas por asfalto envejecido, asfalto virgen y WEO (punto de inflamación del WEO  $163 \pm 1$  °C), este último actuando como agente rejuvenecedor del asfalto envejecido, aun cuando, como ya se indicó, para el cálculo de su proporción se consideró como ligante, se caracterizaron en las proporciones indicadas en la siguiente tabla:

Tabla 6 – Proporciones de asfalto envejecido, asfalto virgen y WEO para la preparación de las mezclas de ligante.

MEZCLA No 1	WEO	0%
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	43,30 g.	61%
WEO	0,00 g.	0%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 2	WEO	5,00%
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	39,77 g.	56%
WEO	3,53 g.	5%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 3	WEO	10,00%
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Envejecido del RAP	27,30 g.	39%
Asf. Nuevo	36,24 g.	51%
WEO	7,06 g.	10%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

MEZCLA No 4	WEO	15,00%
<b>LIGANTE</b>		
Asf. Viejo	27,30 g.	39%
Asf. Envejecido del RAP	32,71 g.	46%
WEO	10,59 g.	15%
<b>Total ligante</b>	<b>70,60 g.</b>	<b>100%</b>
<b>TOTAL MEZCLA</b>	<b>1200,0 g.</b>	

Fuente: el autor.

### 5.7.1 Viscosidad

El comportamiento de la viscosidad para las cuatro mezclas analizadas presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Duncan (casos con temperaturas de 90°C a 130°C), siendo mayor la diferencia entre las viscosidades de las mezclas con menor incorporación de WEO, a excepción de las temperaturas de 140°C y 160°C donde ninguna de las mezclas presentó diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Ver Figura 13 y Anexo 5. La única mezcla con inclusión de WEO que presentó viscosidad superior 1.500 P a 60°C como lo especifica la norma (Capítulo 4 – Pavimentos Asfálticos, artículo 410-13 Especificaciones del cemento asfáltico. INVIAS-2013) fue aquella con contenido de 5% (Ver Tabla 10). Las viscosidades fueron medidas a partir de 90°C debido a la dureza de las mezclas de ligante que no permitieron realizar el ensayo a 60°C, los datos presentados en la Tabla 7 fueron estimados mediante regresión a partir de los datos medidos. En el Anexo 6 están disponibles los datos de viscosidad experimentales.

Tabla 7 – Viscosidad para ligantes con inclusiones de WEO y temperatura de 60°C

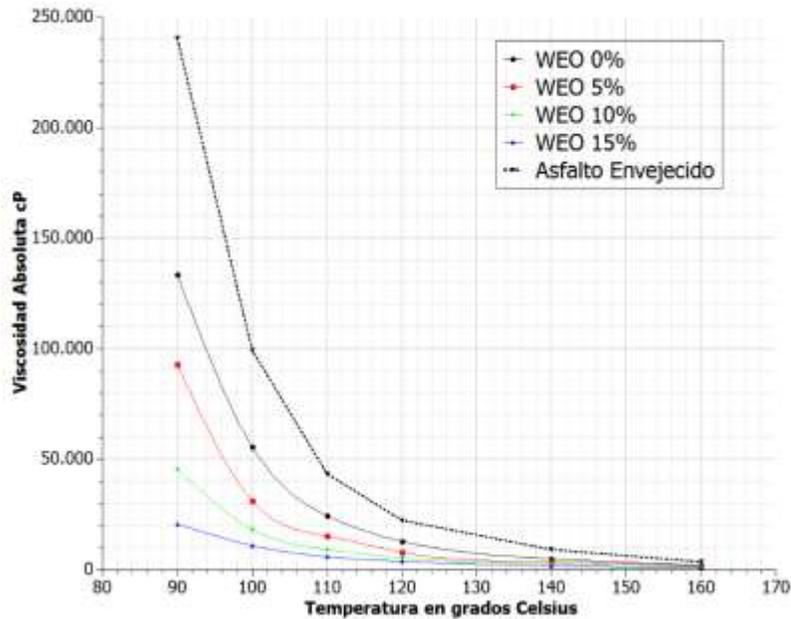
% de WEO	Viscosidad (P)
Asfalto Envejecido*	5896,5
0%	2977,9
5%	1757,0
10%	798,9
15%	382,9

\* Para el asfalto envejecido no fue posible realizar medición a 90°C. Los valores presentados aquí han sido calculados por regresión para una temperatura de 60 grados Celsius..

Fuente: el autor

Es posible observar que la inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen induce un aumento en la viscosidad del 49% pasando de 2.000P a 2.977P. A pesar de esto, el incremento no afectó el cumplimiento mínimo de 1500P de acuerdo con las especificaciones de cemento asfáltico, Norma INVIAS Art. 410-13.

Figura 13 – Comportamiento de la variable Viscosidad de acuerdo con el porcentaje de WEO adicionado a cada mezcla.

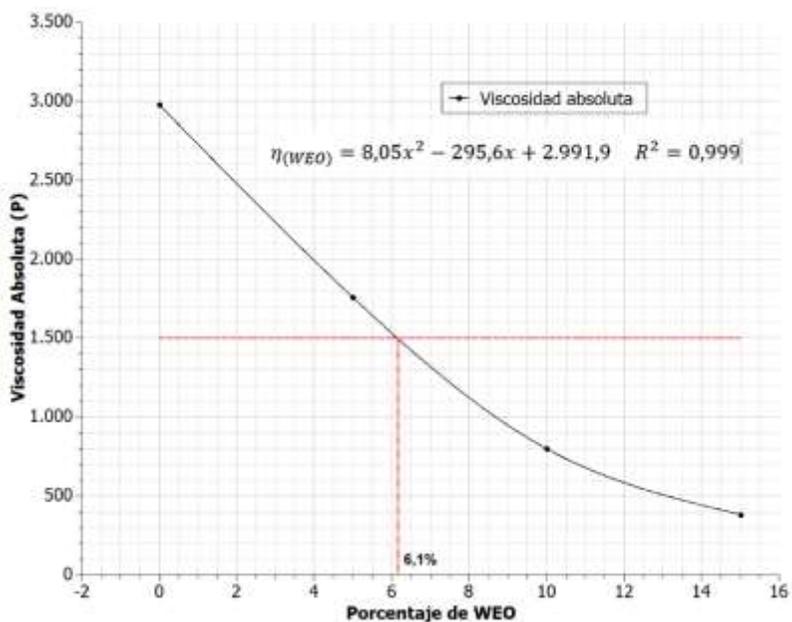


Fuente: el autor

De acuerdo con lo establecido en el capítulo 4- Pavimentos asfálticos, artículo 410-13 Especificaciones técnicas del cemento asfáltico (INVIAS 2013), la viscosidad absoluta mínima para una mezcla con grado de penetración 60-70 es de 1.500 P (a 60°C), con base en los valores de la Tabla 7 y a través de un modelo de regresión polinómica, el mayor porcentaje de WEO que es posible utilizar de forma que la mezcla final tenga una viscosidad de 1.500P es 6,1% (Ver Figura 14).

Vale la pena comentar que para el anterior cálculo fueron evaluados los modelos lineal ( $R^2 = 0,958$ ), polinómico de segundo orden ( $R^2 = 0,999$ ) y Arrhenius ( $R^2 = 0,991$ ). Se puede observar que para todos los casos los coeficientes de correlación son cercanos a 1, sin embargo, el modelo que presentó menor error con respecto a los valores experimentales fue el modelo polinómico de segundo orden y cuya expresión aparece en la Figura 14.

Figura 14 –Viscosidad absoluta. Vs. Porcentaje de inclusión de WEO para una mezcla (asfalto nuevo y asfalto envejecido) a 60°C con grado de penetración 60-70



Fuente: el autor.

### 5.7.2 Penetración

Se evidencia que la adición de asfalto envejecido al asfalto nuevo produce una disminución en el valor de la penetración, pasando de 63 a 24,8 (décimas de milímetro). Es posible observar también que la adición de WEO permite recuperar de forma gradual esta propiedad. El análisis estadístico (test de Duncan) para los valores de penetración para las mezclas de ligantes presentaron diferencias significativas (Anexo 7), evidenciándose que los valores de penetración tienen una correlación positiva con la cantidad de WEO usada para cada mezcla, a mayor cantidad de WEO, mayor penetración. A continuación se detallan los resultados obtenidos para esta variable:

Tabla 8 – Valores de penetración en (1/10 mm) para las mezclas de ligantes

		Penetración en la muestra (1/10 mm), 25°C			
Asfalto Nuevo	Asfalto Envejecido	Porcentaje de inclusión de WEO			
		0%	5%	10%	15%
63	8,9	24,78	41,00	87,89	147,78
		a	b	c	d

Fuente: el autor

Al ser comparados los valores de penetración obtenidos contra los valores establecidos en las especificaciones 410-1 (Tabla 9), se observa que las mezclas con niveles de 0% y 15% de inclusión de WEO están por fuera de los límites menor y mayor respectivamente. El 5% de inclusión de WEO posee un grado de penetración 40-50, mientras que el 10% está catalogado con un grado de penetración 80-100 (ver recuadros continuos en Tabla 9).

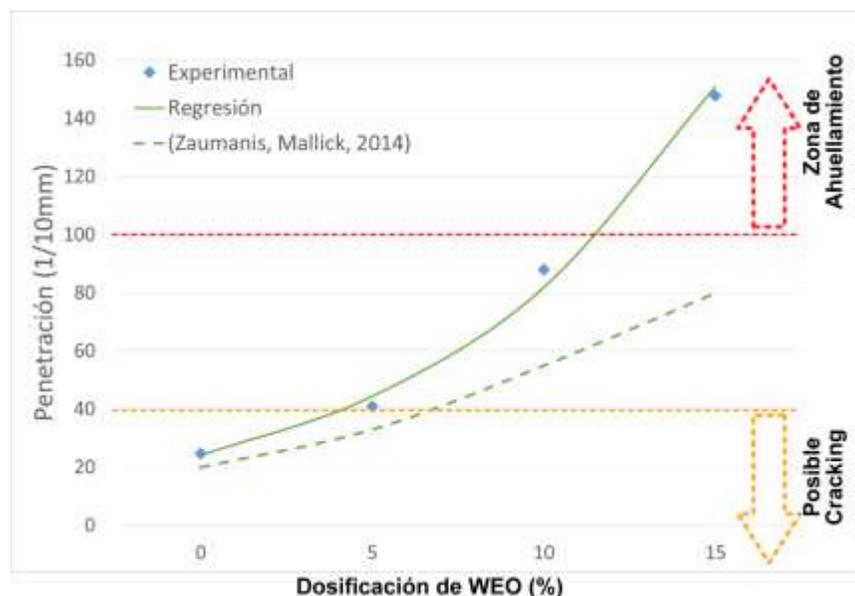
Tabla 9 – Comparación de valores encontrados para penetración contra Especificaciones del cemento asfáltico.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	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° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 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, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3

Fuente: Tomado del Capítulo 4 – Pavimentos Asfálticos, artículo 410-13 Especificaciones del cemento asfáltico. INVIAS-2013.

Adicionalmente, es plausible suponer que valores fuera de estos límites [5% 10%] produzcan agrietamiento excesivo, de acuerdo con lo reportado en (Burke & Hesp, 2011). Es posible observar que niveles inferiores a 5% de WEO son susceptibles agrietamiento (Figura 15), mientras que valores inclusiones de WEO superiores a 12% comienzan a presentar problemas de ahuellamiento. Considerando lo anterior, los valores posibles de inclusión de WEO en este ensayo deberán encontrarse ente 5% y 10%.

Figura 15 – Comparación de los valores encontrados de penetración con valores reportados en (Zaumanis, Mallick, Poulikakos, et al., 2014)



Fuente: el autor con información de (Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014)

### 5.7.3 Punto de ablandamiento

Los puntos de ablandamiento de las mezclas de ligantes con adición de WEO presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test estadístico de Duncan (Ver Anexo 8). De acuerdo con los resultados, y como era de esperarse, mayores proporciones de WEO producen disminución en la temperatura de ablandamiento (Tabla 10).

Tabla 10 –Puntos de ablandamiento para mezclas de ligante con diferentes cantidades de WEO

Asfalto Nuevo 47,7°C	Porcentaje de inclusión de WEO				
	Asfalto envejecido 95,3°C	0%	5%	10%	15%
		72,05°C	52,57°C	45,14°C	39,58°C
		a	b	c	d

Fuente: el autor

A partir de los resultados obtenidos es posible calcular la curva de regresión que representa el comportamiento del punto de ablandamiento en función de las cantidades de WEO adicionadas, la cual es descrita a continuación:

$$y = 0,1392x^2 - 4,1849x + 71,541$$

$$R^2 = 0,9914$$

De acuerdo con la anterior expresión, para obtener un ligante con las características de penetración del cemento asfáltico 60/70, debe ser adicionado WEO en el rango comprendido entre 5,0% (48°C) y 7,5% (54°C).

Tabla 11 – Comparación de valores encontrados de punto de ablandamiento con respecto a las Especificaciones de cemento asfáltico. Artículo 410-13 de INVIAS

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADO DE PENETRACIÓN					
		40-50		60-70		80-100	
		MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	MÍN	MÁX
<b>Asfalto original</b>							
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	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° C), P	E-716 o E-717	200 0	-	150 0	-	100 0	-
Ductilidad (25° C, 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, °C	E-709	240	-	230	-	230	-
Contenido de parafinas, %	E-718	-	3	-	3	-	3

Fuente: Tomado del Capítulo 4 – Pavimentos Asfálticos, artículo 410-13 Especificaciones del cemento asfáltico. INVIAS-2013

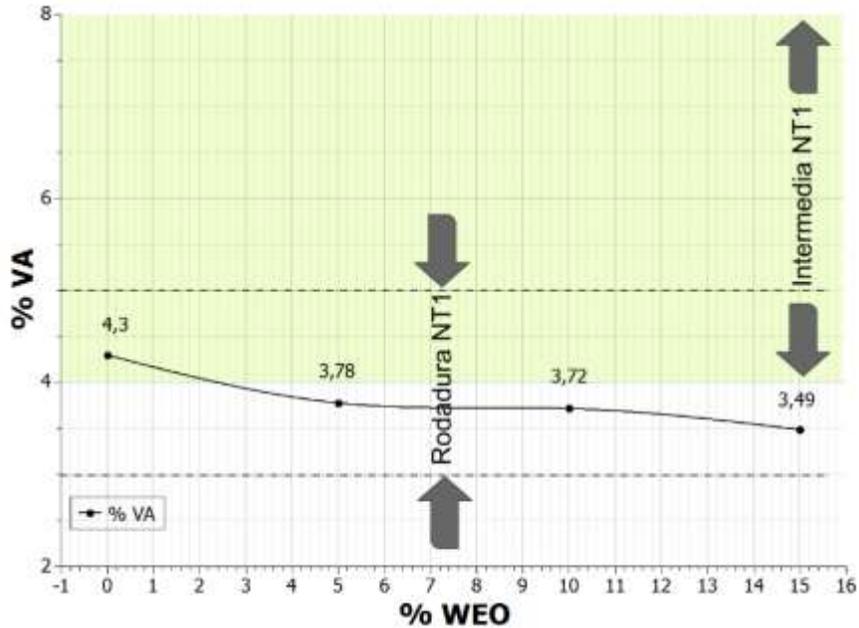
## 5.8 Caracterización de Mezclas Finales (Propiedades físicas y mecánicas)

Para este ensayo, 3 briquetas tipo Marshall fueron elaboradas por cada mezcla y compactadas a 75 golpes por cada cara, siguiendo las especificaciones para elaboración de briquetas para prueba de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente, empleando el equipo Marshall (INV E-748-13)

### 5.8.1 Vacíos con aire

Los resultados fueron evaluados con las especificaciones del Artículo 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, cumpliendo con los requisitos de vacíos con aire ( $V_A$ ) %, para capa de rodadura categoría NT1. Esta afirmación también es válida para las mezclas para capas intermedias, puesto que las especificaciones para estas son menos exigentes (ver Figura 16).

Figura 16- Porcentajes de vacíos de aire presentes en las diferentes mezclas asfálticas con RAP y WEO



Fuente: el autor

Los valores del porcentaje de vacíos para las mezclas analizadas no presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Tukey, en las mezclas con 5% y 10% de WEO (ver Figura 16). Todos los valores se encuentran dentro de las especificaciones definidas en la norma para una capa de rodadura e intermedia. En el caso de 15% de inclusión de WEO, y considerando que el Artículo 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS expresa: “el valor promedio de los vacíos con aire de las cuatro (4) probetas se deberá encontrar en el rango establecido en la Tabla 450-10, sin que ningún valor individual se pueda alejar en más de medio por ciento (0,5%)”, lotes con inclusiones de WEO al 15% deben ser rechazados.

Los resultados de VA en función del contenido de WEO pueden calcularse a partir de la siguiente ecuación:

$$V_A = -0,00084x^3 + 0,02179x^2 - 0,192x + 4,30; R^2 = 1$$

De acuerdo con la anterior expresión, 14.9% es el máximo porcentaje de WEO factible de ser usado en las mezclas de asfalto nuevo, asfalto envejecido del RAP y WEO que garantice un porcentaje de VA = 3.5%. Adicionalmente, si son consideradas las especificaciones para la capa de rodadura NT1 y NT2, las cuatro (4) inclusiones de WEO cumplirían con las condiciones de vacíos tolerados. En este caso fueron considerados los modelos lineal ( $R^2 = 0,884$ ), polinómico de segundo ( $R^2 = 0,943$ ) y tercer orden ( $R^2 = 1$ ), exponencial ( $R^2 = 0,898$ ) y Arrhenius ( $R^2 = 0,897$ ). El modelo con menor error con relación a los datos experimentales fue el polinómico de tercer orden.

### 5.8.2 Estabilidad y Flujo

**Estabilidad:** para este parámetro, la norma establece que el mínimo aceptable para vías tipo NT1 es de 5,000N. De acuerdo con esto, la única mezcla de RAP + WEO que cumple con dicha especificación es la que contiene 5,00% de WEO (5,750N). Los valores obtenidos para cada una de las mezclas analizadas en esta investigación son presentadas en la Tabla 12.

Tabla 12 Valores de estabilidad y flujo para diferentes inclusiones de WEO en mezclas asfálticas con RAP

Normas de ensayo	Niveles de inclusión de WEO			
	0%	5%	10%	15%
Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	8.427	5.750	3.506	2.348
	NT2	NT1	-*	-*
Flujo (mm) (Individual)	3,11	2,84	2,67	2,64
	NT2	AM	AM	AM
Relación Estabilidad/Flujo	2.71	2.03	1.31	0.89
	NT3	NT3	-*	-*

AM = Alto Módulo

-\* = Fuera de especificación

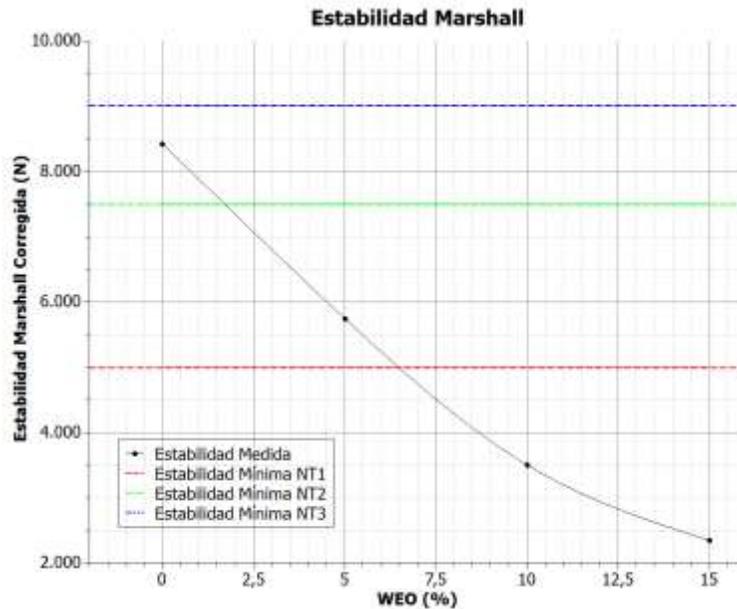
Fuente: el autor

Los valores de estabilidad para las mezclas analizadas presentaron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para el test de Duncan, encontrándose que a una mayor inclusión de WEO los valores de estabilidad disminuyen. Resultados detallados se muestran en el Anexo 9.

Los resultados de Estabilidad presentados en la anterior tabla también son presentados en la Figura 17, en esta es posible apreciar el comportamiento de este parámetro con relación a la adición de WEO, adicionalmente son representados los niveles mínimos permitidos por la especificación para cada uno de los tipos de vía NT1, NT2 y NT3. Del gráfico presentado

es posible identificar que existe un punto óptimo de inclusión de WEO que garantiza una Estabilidad de 5,000N (línea roja en el gráfico).

Figura 17 – Estabilidad Marshall para mezclas con RAP + WEO



Fuente: el autor

Para calcular el valor óptimo de WEO para el parámetro Estabilidad Marshall, se calculó el modelo matemático que explica el comportamiento de dicho parámetro, expresado a continuación:

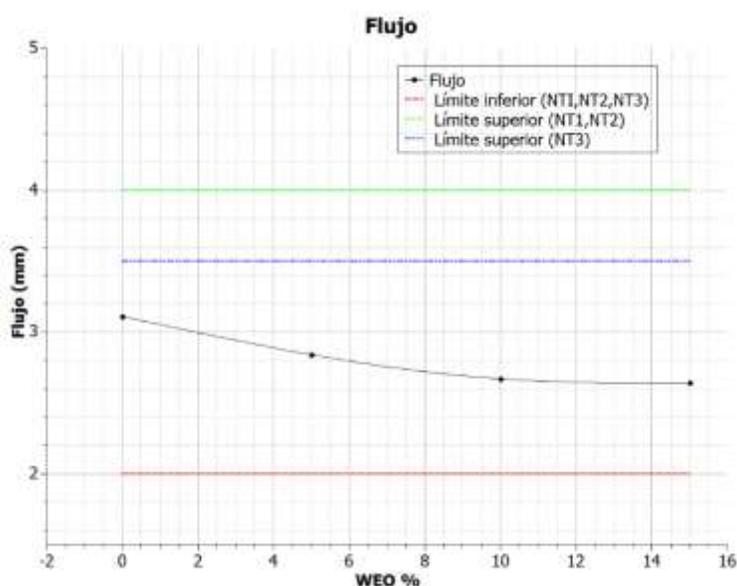
$$\text{Estabilidad Marshall} = 15,1899x^2 - 637,4699x + 8449,6499; R^2 = 0,99901$$

De acuerdo con la expresión anterior, 6,38% es la máxima cantidad de WEO que es posible adicionar de tal forma que la Estabilidad Marshall sea de 5.000N. Vale la pena mencionar que la estabilidad en mezclas con agregados y asfaltos vírgenes del tipo analizado en esta investigación, presentan un valor reportado de 7.117N (diseño Marshall planta El Palmar – Municipio de Saldaña (Tolima), usando el mismo modelo matemático se tiene que el porcentaje de WEO necesario para alcanzar dicha estabilidad es de 2,21%.

**Flujo:** La norma establece que para esta variable el límite inferior aceptable, para las vías tipo NT1, NT2 y NT3, es de 2mm, y el límite superior o máximo aceptable es de 4mm para vías tipo NT1 y NT2, mientras que para el tipo de vía NT3 es de 3.5mm. Estos límites, así como los resultados obtenidos para la prueba de Flujo en las diferentes mezclas analizadas son presentados en la Figura 18. Se puede apreciar que hay conformidad con la norma para este parámetro, ya que todas las mezclas presentan flujos compatibles con cualquiera de los tipos de vías considerados en este estudio.

En este caso no fue necesario calcular el modelo matemático que rige el comportamiento del flujo debido a las diferentes inclusiones de WEO, dado que no es un parámetro que restrinja alguno de los porcentajes de WEO utilizados en el experimento.

Figura 18 – Flujo para mezclas con RAP + WEO



Fuente: el autor

### Relación Estabilidad y Flujo:

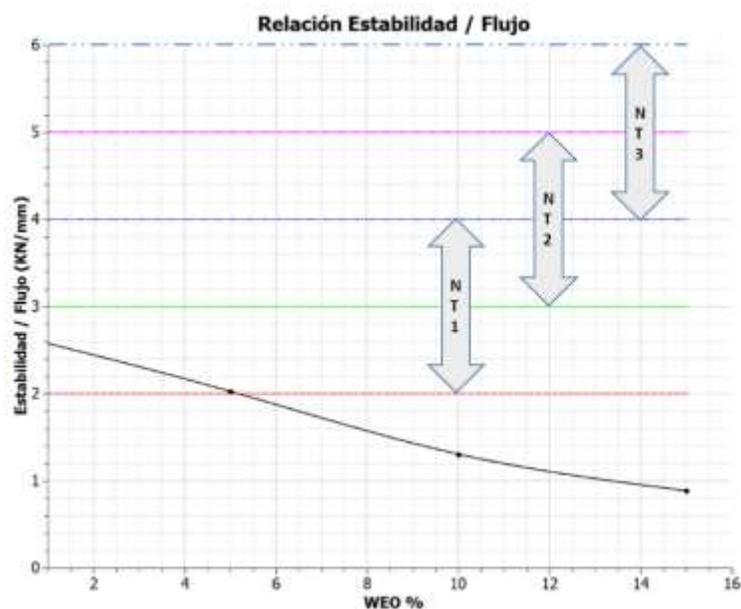
De acuerdo con la especificación Artículo 450-13 de INVIAS, este parámetro debe estar en el rango [2, 4] para las vías tipo NT1. Los resultados de esta relación indican que la única mezcla factible de ser usada es la que contiene inclusión de WEO al 5,00%. La Figura 19

presenta de forma gráfica los resultados obtenidos para las diferentes mezclas, con relación a los valores establecidos en la norma para los tipos de vía NT1, NT2 y NT3.

Los resultados permiten observar que el valor de la relación estabilidad – flujo para la mezcla con 5,00% de WEO está próxima del límite establecido por la norma. Así, el valor óptimo de WEO con el que es posible obtener una mezcla con relación estabilidad-flujo de dos (2,00) es de 5,40%, calculado a partir del modelo matemático de los resultados obtenidos, presentado a continuación:

$$R.\frac{E}{F} = -0,1236x + 2,662; R^2 = 0,988$$

Figura 19 – Relación estabilidad y flujo para mezclas con RAP + WEO



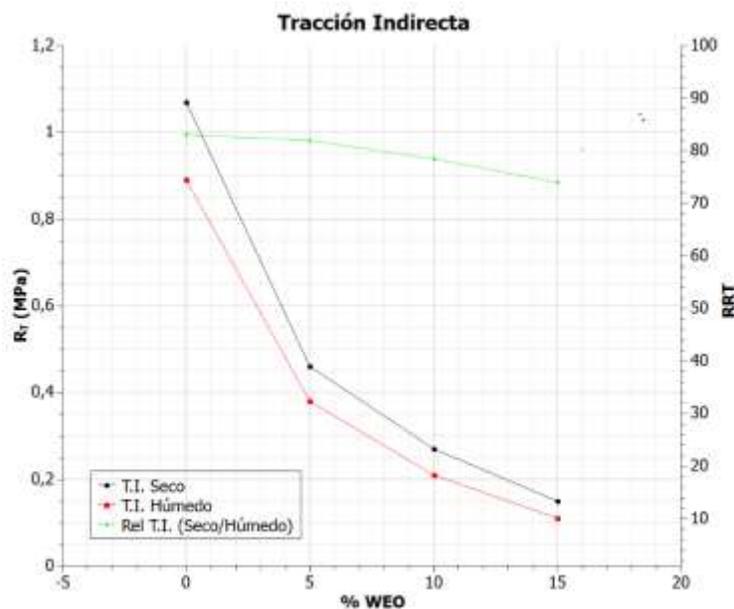
Fuente: el autor

De los anteriores resultados es posible deducir que la única mezcla que cumple con los criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación Artículo 450-10, es aquella que contiene WEO al 5,00% y únicamente para vías tipo NT1.

### 5.8.3 Susceptibilidad al agua utilizando la prueba de Tracción indirecta

Los resultados para las pruebas de tracción indican que con cada adición de WEO, la resistencia a la tracción indirecta húmeda y seca disminuye en proporciones similares y cercanas al 50% con cada inclusión de WEO. Este comportamiento se puede visualizar en la Figura 20 donde son presentadas las curvas para Tracción indirecta seca, húmeda y la relación Tracción indirecta RRT. Las curvas de Resistencia a tracción indirecta en seco y húmeda poseen una correlación positiva cercana a 1 (0,999733), es decir, el efecto del WEO es el mismo en cada uno de ellos, lo cual es evidenciado en la misma gráfica (las curvas obtenidas tienen el mismo comportamiento).

Figura 20 – Tracción indirecta (húmeda y seca) y relación tracción indirecta (RRT) para mezclas con RAP + WEO.



Fuente: el autor.

Es de resaltar que de acuerdo con las especificaciones Artículo 450.5.2.4.5 para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, “La resistencia del grupo curado en húmedo deberá ser, cuando menos, ochenta por ciento (80%) de la resistencia del grupo curado en seco, para que se considere que la mezcla no es susceptible a la humedad” (INVIAS, 2013a). Así, los especímenes con inclusiones de 10% y 15% de WEO son susceptibles a

la humedad (línea verde en la Figura 20), incluso se puede estimar que con niveles de inclusión superiores al 6.5% de WEO este requisito no es cumplido (ver Figura 21). Los valores detallados de RRT son presentados en la Tabla 13.

Tabla 13 – Relación Resistencia a la Tensión de mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de WEO

Nivel de inclusión de WEO	Relación Resistencia a la Tensión RRT=100(RTH/RTS)
0%	83.11 a
5%	81.96 a
10%	78.43 a
15%	74.00 b

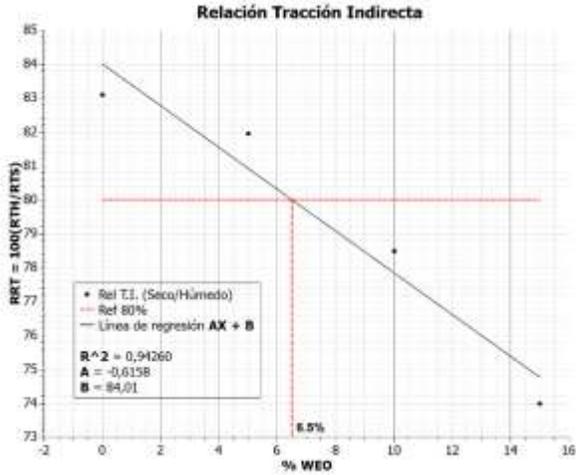
Fuente: el autor.

Los datos de RRT tienen un comportamiento decreciente lineal con cada incremento de WEO, este comportamiento puede ser observado en la Figura 21 y de forma detallada en la Tabla 13 y está regido por la siguiente expresión:

$$RRT = -0,6158x + 84.01; R^2 = 0,943$$

Fueron analizados los modelos de regresión lineal ( $R^2 = 0,945$ ), polinómico de segundo orden ( $R^2 = 0,997$ ), y exponencial ( $R^2 = 0,943$ ), en todos los casos el coeficiente de correlación fue  $\cong 1$ , se optó por el modelo lineal por mayor simplicidad.

Figura 21 – Relación de Resistencia a la Tensión Indirecta (RRT).



Fuente: el autor.

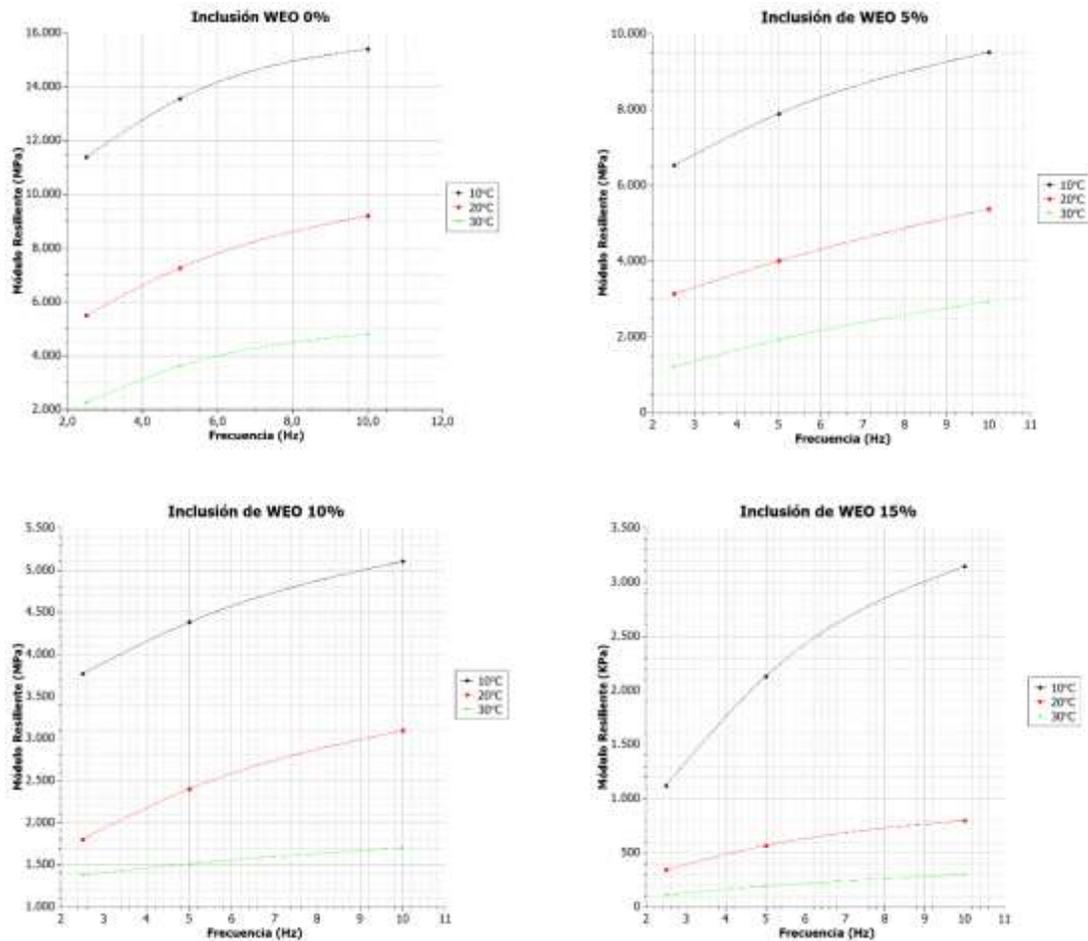
#### **5.8.4 Módulo resiliente**

Para determinar el módulo resiliente se usó el ensayo europeo BS EN 12697-26:2012 Anexo C, evaluándose los efectos de la temperatura y de la velocidad de aplicación de carga (INVIAS, 2013), con el propósito de analizar la calidad relativa de los materiales, en esta caso las mezclas con los diferentes niveles de WEO.

Como se anotó, se compactaron las muestras tipo Marshall a 75 golpes por cada cara, siguiendo las especificaciones para elaboración de briquetas, con el fin de realizar el ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente (Capítulo ), y el ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas según la norma INV E-749-13 (INVIAS, 2013f).

En la Figura 22 se aprecian los valores de los módulos resilientes obtenidos para cada combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de la carga utilizada, según el porcentaje de WEO contenido en cada mezcla. Los valores usados para la construcción de estos gráficos se encuentran en el Anexo 10.

Figura 22 – Módulos resilientes para la Mezcla con diferentes porcentajes de inclusión de WEO



Fuente: el autor.

En la misma figura es posible apreciar que a menores temperaturas los módulos resilientes son más altos para todas las mezclas, lo que concuerda con lo publicado en (Kamaruddin, Hainin, Hassan, Abdullah, et al., 2014), donde se afirma que la temperatura influye significativamente en el desempeño de la mezcla.

Se observa también que la alta rigidez que posee el RAP se ve disminuida en una mezcla caliente y que concuerda con las experiencias relatadas en (Dedene, 2011a; Kamaruddin, Hainin, Hassan, & Abdullah, 2014; Kamaruddin, Hainin, Hassan, Abdullah, et al., 2014). A pesar de lo anterior, la especificación en los artículos 465-13 y 450-13, solo establecen

especificaciones para diseños que requieren mezclas de alto módulo, que solo cumpliría la mezcla sin adición de WEO para una temperatura de 30°C, para otro tipo de especificaciones por ejemplo las especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, para pavimentos para tránsitos T4 y T5 deberán “medir y reportar los módulos resilientes correspondientes a la mezcla definida como óptima al efectuar el diseño Marshall para todas las mezclas que se empleen en el proyecto” (Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, n.d.).

Para efectos comparativos, en la Figura 22 han sido incluidos los valores de módulo resiliente para una mezcla estándar MDC-19 (Pantoja & Prieto, 2014), representada en la figura como las superficies con áreas grises. Es posible apreciar que la única mezcla con valores de módulo resiliente compatibles es aquella con inclusiones de 5% de WEO. La mezcla con 10% de WEO presenta módulo de resiliencia compatible con la mezcla MDC-19 a temperaturas superiores a 20°C y a bajas frecuencias (entre 2.5Hz y 5Hz) y se aprecia en la misma figura como el área con color cyan.

A partir de los datos de Módulo resiliente para T=10°C y f=10Hz, es posible calcular el modelo matemático del decaimiento de la curva de WEO. La expresión obtenida se expone a continuación:

$$M_{R(f=10Hz, T=10^{\circ}C)} = 39,335 \times WEO^2 - 1413 \times WEO + 15.452; R^2 = 0,9995$$

Basado en la anterior expresión, la cantidad de WEO que es necesario usar para llegar a un Módulo resiliente compatible con mezcla MDC-19 sería 5,94%.

## 5.9 Resultados Consolidados

Dado que fueron varios los parámetros evaluados para la caracterización tanto de la mezcla de ligantes como de las mezclas asfálticas con adición de RAP + WEO, todo esto de acuerdo con las especificaciones del Artículo 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, la selección de la cantidad óptima de WEO dependerá del análisis conjunto de todos ellos. A continuación son expuestos los efectos producidos en cada uno de los parámetros analizados:

### 5.9.1 Incidencia del asfalto envejecido en el asfalto nuevo

La inclusión de asfalto envejecido al asfalto virgen produjo alteraciones en las propiedades reológicas de este último tales como aumento de la viscosidad del 49% ( $2.000P \Rightarrow 2.977P$ ), aumento de la temperatura de ablandamiento del 51% ( $47,7^{\circ}C \Rightarrow 72,1^{\circ}C$ ) y una disminución de la penetración del 61% ( $63_{(1/10mm)} \Rightarrow 24,8_{(1/10mm)}$ ), y son representados en la siguiente figura:

Figura 23 – Efectos de la inclusión de asfalto envejecido en el asfalto virgen para cada uno de los parámetros analizados.

Incidencia de Asfalto envejecido en ligante nuevo		
Parámetro		
Viscosidad	Penetración	Ablandamiento
2.977,9P	63 $(_{1/10mm})$	72,1 C
↑ 49%	↓ 61%	↑ 51%
2.000P	24,8 $(_{1/10mm})$	47,7 C

Fuente: el autor

### 5.9.2 Incidencia del WEO en las mezclas de ligante

La inclusión de WEO en la mezcla de ligante produjo efectos contrarios a los inducidos por la adición de asfalto envejecido a la mezcla, permitiendo recuperar las propiedades reológicas de la mezcla de ligante a niveles comparables con una mezcla virgen. Produjo una disminución promedio<sup>11</sup> de la viscosidad de un 49.3% ( $2.977P_{(weo_0\%)} \Rightarrow 382,9P_{(weo_{15\%})}$ ), disminución de la temperatura de ablandamiento en promedio de 17,7% ( $72,1^{\circ}C_{(weo_0\%)} \Rightarrow 39,6^{\circ}C_{(weo_{15\%})}$ ) y un aumento en la penetración de 82,6% ( $41_{(1/10mm)}_{(weo_0\%)} \Rightarrow$

<sup>11</sup> Porcentaje promedio por cada inclusión de 5% de WEO.

147<sub>(1/10mm)(weo0%)</sub>). Los valores y comportamiento detallado son presentados en la siguiente figura:

Figura 24 – Incidencia de la inclusión de WEO en las mezclas de ligantes (Asfalto envejecido más Asfalto Virgen)

Incidencia del WEO en mezclas de Ligantes			
Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%
Viscosidad	2.977,9P	1.757,0P	798,9P
	↓ 41%	↓ 55%	↓ 52%
Ablandamiento (°C)	72,1	52,6	45,1
	↓ 27%	↓ 14%	↓ 12%
Penetración (1/10mm)	41,0	87,9	147,8
	↑ 66%	↑ 114%	↑ 68%
	24,8	41,0	87,9

Fuente: el autor

### 5.9.3 Incidencia del WEO en las mezclas finales

La inclusión de WEO produjo cambios en las propiedades de las mezclas finales (ligante + agregados + RAP), de forma general el efecto fue la disminución en el valor de todas ellas. Los porcentajes de disminución promedio<sup>12</sup> fueron: Vacíos con aire 7,3% (4,3%<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 3,7%<sub>(weo15%)</sub>), estabilidad 34,7% (8.427N ⇒ 2.348N), Flujo 5,3% (3,1mm<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 2,6mm<sub>(weo15%)</sub>), Relación estabilidad – flujo 30,7% (2,7<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 0,9P<sub>(weo15%)</sub>), Tracción indirecta seca 7,3% (1,1MPa<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 0,2MPa<sub>(weo15%)</sub>), Tracción indirecta húmeda 50% (0,9MPa<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 0,1MPa<sub>(weo15%)</sub>), Tracción indirecta 3,7% (83,1%<sub>(weo0%)</sub> ⇒ 74,0%<sub>(weo15%)</sub>). Los valores y comportamiento detallado son presentados en la siguiente figura:

<sup>12</sup> Porcentaje promedio por cada inclusión de 5% de WEO.

Incidencia del WEO en mezclas finales							
Parámetro	Inclusión de WEO			Parámetro	Inclusión de WEO		
	5%	10%	15%		5%	10%	15%
Vacíos con aire (%)	4,3	3,8	3,7	Tracción Indirecta Seca (MPa)	1,1	0,5	0,3
	↓12% 3,8	↓2% 3,7	↓8% 3,4		↓57% 0,5	↓41% 0,3	↓44% 0,2
Estabilidad (N)	8.427	5.750	3.506	Tracción Indirecta Húmeda (MPa)	0,9	0,4	0,2
	↓32% 5.750	↓39% 3.506	↓33% 2.348		↓57% 0,4	↓45% 0,2	↓48% 0,1
Flujo (mm)	3,1	2,8	2,7	Relación Tracción Indirecta	83,1	81,9	78,5
	↓9% 2,8	↓6% 2,7	↓1% 2,6		↓1% 81,9	↓4% 78,5	↓6% 74,0
Relación Estabilidad/Flujo	2,7	2,0	1,3				
	↓25% 2,0	↓35% 1,3	↓32% 0,89				

Fuente: el autor.

Se evidencia que la inclusión de WEO mejora las propiedades de la mezcla teniendo en cuenta que las características de viscosidad y punto de ablandamiento de los ligantes disminuyeron, mientras que la penetración disminuyó (efectos contrarios a los inducidos por la adición de asfalto envejecido). Lo anterior demuestra que con la inclusión de WEO se pueden obtener unos parámetros cercanos a los que tiene el asfalto nuevo. Esto denota que se rejuvenece el asfalto envejecido.

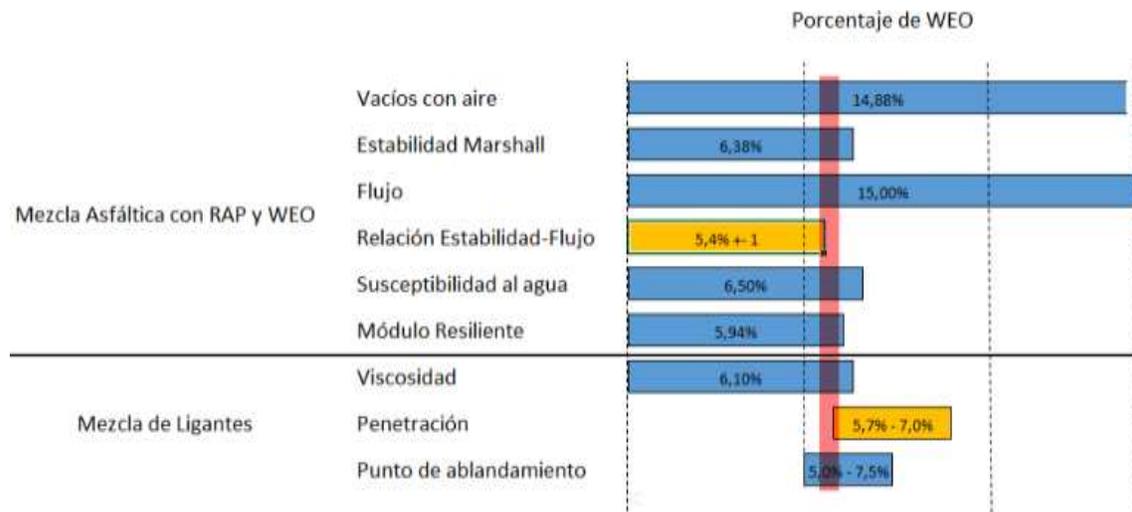
En cuanto a los parámetros medidos a las mezclas [estabilidad y flujo, susceptibilidad al agua y módulo resiliente), se muestra claramente que al incluir WEO se disminuye la rigidez de la mezcla que es finalmente el inconveniente medido en las características mecánicas que presentan las mezclas asfálticas con RAP.

Por último, y a partir de los modelos de regresión calculados para cada uno de los parámetros evaluados en las mezclas finales (agregados + RAP+ ligante + WEO), es posible determinar cuáles restringen el porcentaje de WEO que debe ser usado para

obtener una mezcla tipo MDC-19, de acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras descritas en el artículo 450-13 del INVIAS.

La Figura 25 presenta el consolidado de los valores óptimos calculados para cada parámetro analizado, se aprecia que los parámetros que restringen la cantidad de WEO que es posible adicionar son la Relación Estabilidad-Flujo y la Penetración del ligante. Así, el porcentaje admisible de WEO estaría entre 5,4% y 5,7%.

Figura 25 – Porcentajes de WEO óptimo para adicionar a mezclas con RAP, de acuerdo con cada parámetro evaluado.



La franja roja indica el intervalo en términos de porcentaje de adición de WEO en los que se encuentra el punto óptimo.

Fuente el autor:

## 6 Conclusiones

Como era de esperar, la adición de asfalto envejecido al asfalto nuevo produjo alteraciones en las propiedades analizadas, contribuyendo al aumento o la disminución de las magnitudes de estas. La viscosidad de la mezcla así como su punto de ablandamiento aumentaron en un 49% ( $2.000P \Rightarrow 2.977P$ ) y 51% ( $47,7^{\circ}C \Rightarrow 72,1^{\circ}C$ ) respectivamente, mientras que la penetración disminuyó en un 61% ( $63_{(1/10mm)} \Rightarrow 24,8_{(1/10mm)}$ ).

La adición de WEO en las mezclas de ligante (asfalto nuevo y asfalto envejecido) modificó las magnitudes de todas las propiedades, de forma inversa al efecto producido por la presencia del asfalto envejecido, permitiendo alcanzar valores compatibles con un ligante compuesto únicamente con asfalto virgen. De acuerdo con los resultados, adiciones de WEO entre 5,7% y 6,1% serían suficientes para obtener una mezcla de ligante con características de un asfalto virgen (Viscosidad = 2.000P; Penetración =  $63_{(1/10mm)}$ ; T. Ablandamiento =  $47,7^{\circ}C$ ).

Se encontró que de las mezclas analizadas, aquella que más se aproxima a las especificaciones dadas en el Art. 450-13 Cap. 4 – Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS para la categoría de tránsito NT1 es la que contiene 5,0% de WEO. Sin embargo, y considerando los modelos de regresión para cada parámetro analizado, el máximo porcentaje de WEO que es posible usar para obtener una mezcla tipo MDC-19 se encuentra en el rango de 5,4% y 5,7%.

Aunque todas las mezclas de asfaltos (nuevo y envejecido) y WEO según su viscosidad quedan catalogados con grado de penetración 40-50, solo las que contienen WEO en porcentajes de 5% y 10% permiten obtener mezclas que cumplen con la penetración y punto de ablandamiento correspondiente a grados de penetración 40-50 y 80-100 respectivamente. Para obtener una mezcla con grado de penetración 60-70 sería necesario adicionar proporciones de WEO entre 5,7% y 7,0%.

Todas las mezclas con inclusiones presentan valores de módulo resiliente por debajo de 10.000 MPa y poseen propiedades que permiten su utilización en pavimentos con menores especificaciones.

En otros trabajos se había reportado límites de adición del 30% como es el caso de (King et al., 2015), es posible que esta grande variación se deba a las características del tipo de aceite, estado del RAP y calidad de los agregados utilizados.

Considerando las cantidades generadas de WEO en el departamento del Tolima, y su posible uso como agente rejuvenecedor para mezclas asfálticas con RAP (también reciclado), la combinación WEO + RAP se convierte en una alternativa que contribuye a la solución del problema de mantenimiento y/o construcción de buena parte de malla vial de tipo terciaria. Con esto, se quiere aportar una alternativa para la utilización efectiva del RAP en Colombia, obteniendo un material apto para ser reutilizado como capa intermedia en la realización de proyectos de mantenimiento y conservación de vías secundarias y terciarias a menor costo, contribuyendo además a la conservación de los recursos naturales y a la disminución del impacto ambiental.

De acuerdo con datos publicados en el sitio oficial de la Gobernación del Tolima<sup>13</sup>, existen en el departamento 10.000 kilómetros de vías terciarias de las cuales sólo el 0,01% se les ha realizado algún tipo de pavimentación, que equivalen a 12 millones de toneladas de materiales de construcción para carreteras, suponiendo una capa asfáltica de 7,5 cm de espesor y 7 metros de ancho. Basados en este cálculo, para pavimentar la totalidad de estas vías, se necesitarían 1.045,00 galones de WEO y 414 toneladas de RAP por kilómetro de vía construida, por lo anterior es necesario tener en cuenta las restricciones de disponibilidad del RAP en las regiones más apartadas, convirtiéndose en una alternativa para ser utilizada en vías no solo terciarias si no en vías secundarias y primarias.

Se determinó que el porcentaje óptimo de WEO para obtener una mezcla tipo MDC-19 se encuentra entre 5,4% y 5,7% del peso de ligante. Es importante tener en cuenta que la temperatura de mezcla definida para este porcentaje de WEO es de 157°C, muy cercana al punto de inflamación del WEO definido en 163°C, sin embargo, teniendo en cuenta el bajo porcentaje de este material en la mezcla total (0.3%), se considera que los riesgos de inflamación son reducidos.

---

<sup>13</sup> <http://www.tolima.gov.co/publicaciones.php?id=12828>

## 7 Recomendaciones

Realizar investigación del efecto de uso de WEO tipo SAE50 (20W50) en las propiedades mecánicas de mezclas asfálticas, ya que este también es producido en grandes cantidades en el departamento. Esto contribuiría al estado del arte en el uso de WEO en mezclas asfálticas.

Dado que las especificaciones técnicas para construcción de carreteras del INVIAS permite usar RAP en cantidades superiores al 35% (siempre y cuando cumplan con las características propias del proyecto), se propone realizar investigaciones que exploren el uso de mayores porcentajes de RAP para la elaboración de mezclas asfálticas aptas para la construcción y/o mantenimiento de vías terciarias.

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que las mezclas asfálticas con porcentaje de inclusión de WEO entre 5.4% y 5.7 % , cumplen con las especificaciones generales de construcción de carreteras descritas en el artículo 450-13 del INVIAS 2013 para tipo de mezcla MDC-19 (capa intermedia y de rodadura), sin embargo para su utilización en esta última por estar expuesta al intemperismo, se recomienda incluir en investigaciones futuras las pruebas para determinar el envejecimiento.

El WEO óptimo determinado para las condiciones de la presente investigación, puede ser un componente volátil dando lugar a una disminución en la masa total de los materiales considerados como ligantes. Lo anterior hubiera podido verificarse con el ensayo de *“Pérdida de masa por calentamiento en película delgada (163 °C y durante 5 horas, INV E-721)”*, sin embargo, esto no fue considerado en su momento, por lo que se recomienda en futuros estudios tener este aspecto presente.

Es importante resaltar que el uso de RAP en mezclas asfálticas es una opción económica en especial, debido al ahorro de materiales (agregados vírgenes y asfalto), y en principio, al transporte de los mismos a la planta de producción, aun cuando es necesario considerar el transporte del RAP, sin contar con el beneficio ambiental por la eficiencia en el uso de los recursos naturales; sin embargo, es necesario realizar más investigaciones frente a este tema que permitan obtener más información y confiabilidad en el uso de este método y se pueda realizar su producción masiva en plantas asfálticas.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement a literature review. *FHWA-ICT-07-001*. article.
- ARRA. (2013). *Basic Asphalt Recycling Manual. Federal Highway Administration* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Baghaee Moghaddam, T., & Baaj, H. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805–816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015>
- Bernucci, L. B., Augusto, J., Ceratti, P., Barbosa, J., Laura, S., Goretti, M., & Motta, D. (2008). *Pavimentação Asfáltica*.
- Burke, K., & Hesp, S. A. M. (2011). Penetration testing of waste engine oil residue modified asphalt cements. In *First Conference of Transportation Research Group of India*. Bangalore, India.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *Revista EIA*, 12(2), 125–137. <https://doi.org/1794-1237>
- Carpenter, S. H., Pine, W. J., & Trepanier, J. (2012). IMPACT OF HIGH RAP CONTENT ON STRUCTURAL AND PERFORMANCE Prepared By, (12).
- Chen, J.-S., Wang, C.-H., & Huang, C.-C. (2009). Engineering properties of bituminous mixtures blended with second reclaimed asphalt pavements (R2AP). *Road Materials and Pavement Design*, 10(sup1), 129–149. article.
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*. Report No. FHWA-HRT-11-021.
- Cortolima. (2009). *INFORME DE GESTION AÑO 2008*.
- Dedene, C. D. (2011a). *Investigation of using waste engine oil blended with reclaimed asphalt materials to improve pavement recyclability*. Michigan Technological

University.

Dedene, C. D. (2011b). INVESTIGATION OF USING WASTE ENGINE OIL BLENDED WITH RECLAIMED ASPHALT MATERIALS TO IMPROVE PAVEMENT RECYCLABILITY By Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MASTER OF SCIENCE ( Civil Engineering ) MICHIGAN TECHNOLOGICAL UNI.

DeDene, C. D., & You, Z. (2014). The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 7(2), 145–152. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7\(2\).145](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2014.7(2).145)

Dhananjay, A. S., Sawant, O. B., Sayyad, Z. M., Tamboli, S. A., & Tambolli, A. A. (2016). Recyclability using Reclaimed Asphalt Pavement: A Review. *IJSTE International Journal of Science Technology & Engineering*, 2(11), 251–254.

El-hmrawey, S., El-maaty, A. E. A., & Elmohr, A. I. (2015). Durability of Hot Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavements, 1–18. <https://doi.org/10.4236/oalib.1101508>

Fedesarrollo. (2013). Indicadores del sector transporte en Colombia, 234.

Gong, M., Yang, J., Zhang, J., Zhu, H., & Tong, T. (2016). Physical-chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue. *Construction and Building Materials*, 105, 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.025>

Guarin, A., Khan, A., Butt, A. A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2016). An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction. *Construction and Building Materials*, 106, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009>

Hansen, K., Newcomb, D., & Cervarich, M. (2011). Asphalt tops the charts for environmental stewardship-again. *HMAT: Hot Mix Asphalt Technology*, 16(5). article.

Hansen, K. R., & Copeland, A. (2014). *4th Annual Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials*. Retrieved from [https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2013\\_RAP-RAS-WMA\\_Survey\\_Final.pdf](https://www.asphaltpavement.org/PDFs/IS138/IS138-2013_RAP-RAS-WMA_Survey_Final.pdf)

- INVIAS. (2013a). Capítulo 4 ART. 450 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA (CONCRETO ASFÁLTICO). In *PAVIMENTOS ASFÁLTICOS* (pp. 1–8).
- INVIAS. (2013b). *Inv-E-733-13 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIE SECA.*
- INVIAS. (2013c). *Normas de ensayo de materiales para carretera. I.N.V. E – 725 – 13. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta.* Bogota (Colombia).
- INVIAS. (2013d). *Normas de ensayo de materiales para carretera. I.N.V. E – 736 – 13. Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.* Bogota (Colombia).
- INVIAS. (2013e). *Normas de ensayo de materiales para carretera. I.N.V. E – 748 – 13 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.* Bogota (Colombia).
- INVIAS. (2013f). *Normas de ensayo de materiales para carretera. I.N.V. E - 749 - 13. Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas.* Bogota.
- Jia, X., Huang, B., Bowers, B. F., & Zhao, S. (2014). Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. *Construction and Building Materials*, 50, 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.012>
- Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., & Abdullah, M. E. (2014). Rutting Evaluation of Aged Binder Containing Engine Oil. *Advanced Materials Research*, 91, 405–409. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.911.405>
- Kamaruddin, N. H. M., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Abdullah, M. E., & Yaacob, H. (2014). Evaluation of pavement mixture incorporating waste oil. *Jurnal Teknologi*, 71(3), 93–98. <https://doi.org/10.11113/jt.v71.3766>
- King, K., Holleran, I., Jayalath, C., Henning, T. F. P., & others. (2015). Laboratory

- performance of rejuvenated asphalt surfacing mixtures containing 30% RAP. *Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice*, 24(4), 3. article.
- Mogawer, W., Bennert, T., Daniel, J. S., Bonaquist, R., Austerman, A., & Booshehrian, A. (2012). Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 183–208. article. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.657070>
- Montgomery, D. (2008). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley.
- Ostos-Ascencio, J. L., Duarte-San Miguel, J. M., & Reyes-Ortiz, O. J. (2011). Comportamiento de Mezclas Asfálticas del Instituto de Desarrollo Urbano con Adición de Pavimento Reciclado. In *VI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial, Bogotá D.C. Colombia* (Vol. 920, p. 88).
- Pantoja, A. P., & Prieto, I. B. (2014). *Análisis dinámico de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-19) modificada con desechos de caucho-cuero provenientes de una remotadora de calzado*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Retrieved from <http://repository.ucatolica.edu.co/xmlui/handle/10983/2570>
- Reis, A. C. D. C. (2013). *PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EM USINA PROTÓTIPO DE ESCALA REDUZIDA*. Ministério da Defesa Exército Brasileiro.
- Reyes-Ortiz, O., Berardinelli, E., Alvarez, A. E. E., Carvajal-Muñoz, J. S. S., & Fuentes, L. G. G. (2012). Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.889>
- Romera, R., Santamaría, A., Peña, J. J., Muñoz, M. E., Barral, M., García, E., & Jañez, V. (2006). Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen. *Rheologica Acta*, 45(4), 474–478. <https://doi.org/10.1007/s00397-005-0078-7>
- Souza, F. S. (2009). *Avaliação do desempenho de pavimentos restaurados por meio de técnicas de reciclagem de materiais de pavimentação*. Escola de Minas da

Universidade Federal de Ouro Preto.

- Suzuki, C. Y., Pereira, A. C. O., Tsu, B. S. A., Azevedo, A. M., & Tuchumantel, O. (2005). Structural Analysis of a Test Section Using Cold in Place Recycling. In *2005 International Symposium on Pavement Recycling* (p. 13). Sao Paulo.
- Taylor, N. (1997). Life expectancy of recycled asphalt pavingin: L.E. Wood (Ed.). In L. E. W. (Ed.) (Ed.), *Recycling of Bituminous Pavements, ASTM STP*.
- Thanaya, I. . N., & Arya. (2003). IMPROVING THE PERFORMANCE EMULSION OF COLD BITUMINOUS ( CBEMs ) INCORPORATING WASTE The University of Leeds School of Civil Engineering, (July).
- Willis, J. R., Ph, D., & Taylor, A. J. (2012). *NCAT Report No . 12-03 EFFECTS OF CHANGING VIRGIN BINDER GRADE AND CONTENT ON* By Nam Tran , Ph . D . , P . E . Flavio de Goes Padula , Ph . D .
- Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. *Construction and Building Materials*, 69, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., Poulidakos, L., & Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. *Computers and Chemical Engineering*, 71, 538–550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>

## 9 Anexos

Anexo 1–Granulometría agregados vírgenes

<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO: -INV E - 123 - 13 -</b>				
	<b>DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS DE LAS PARTICULAS DE LOS SUELOS</b>				
<b>Fecha de elaboración:</b>		11 de enero de 2016			
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.					
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Gallego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390			
<b>Descripción de la muestra:</b> Mezcla de triturado con arena color gris, angular y llenante mineral (MDC-19)					
<b>Procedencia:</b> Material del Rio Cucuana, Sector El Palmar - Municipio de Saldaña, Departamento del Tolima.					
<b>Especificación a utilizar:</b>		INV E 450-13			
<b>Peso seco antes de lavar:</b>	2445,0 Gramos	<b>Peso seco despues de lavar:</b> 2153,0 Gramos			
<b>Tamiz Normal</b>	<b>Tamiz alternati.</b>	<b>Peso Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% retenido acumulado</b>	<b>% Pasa</b>
50,00	2"				100,0
37,50	1 1/2"				100,0
25,00	1"				100,0
19,00	3/4"				100,0
12,50	1/2"	14,9	0,61	0,6	99,4
9,50	3/8"	310,4	12,70	13,3	86,7
4,75	No 4	664,3	27,17	40,5	59,5
2,00	No 10	450,4	18,42	58,9	41,1
0,425	No 40	423,8	17,33	76,2	23,8
0,18	No 80	332,0	13,58	89,8	10,2
0,075	No 200	154,3	6,31	96,1	3,9
<b>Fondo</b>		94,9	3,88	100,0	
Total		2445,0			

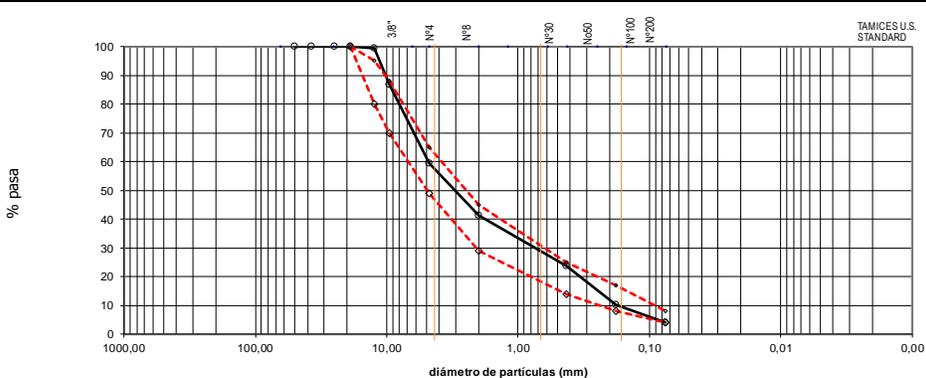
  

<b>Especificación INV E - 450 -13</b>		<b>Grava</b>	40,47
		<b>Arena</b>	55,64
		<b>Fino</b>	3,88
100	100		
80	95		
70	88		
49	65		
29	45		
14	25		
8	17		
4	8		

<b>Clasificación USCS:</b>	SP	ARENA MAL GRADADA
<b>Clasificación de suelos AASHTO:</b>	A-1-a	

<b>CURVA GRANULOMÉTRICA</b>			
% pasa			TAMICES U.S. STANDARD
	diámetro de partículas (mm)		

<b>D<sub>10</sub></b>	0,18	<b>D<sub>30</sub></b>	0,75	<b>D<sub>60</sub></b>	4,75
-----------------------	------	-----------------------	------	-----------------------	------

**Observaciones:** DISEÑO DE MEZCLA ASFALTICA MDC-19 - COMBINACION GRANULOMETRICA EN LABORATORIO (30% TRITURADO 3/4" - 65% ARENA TRITURACIÓN - 5% LLENANTE)

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	13

Anexo 2- Porcentaje de asfalto envejecido contenido en el RAP

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 732 - 13 -																																																																																																					
	EXTRACCIÓN CUANTITATIVA DEL ASFALTO EN MEZCLAS PARA PAVIMENTOS																																																																																																					
<p align="right"><b>Fecha de elaboración:</b> 18 de enero de 2016</p>																																																																																																						
<p><b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.</p>																																																																																																						
<p><b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Galego Quintana</p>		<p><b>Documento de identificación:</b> 2.231.390</p>																																																																																																				
<p><b>Descripción de la muestra:</b> Muestra de RAP tomada de la carpeta asfáltica</p>																																																																																																						
<p><b>Procedencia:</b> K6+000 Tramo entre los Municipios de Guamo - Saldaña en el Departamento Tolima</p>																																																																																																						
<p><b>Especificación a utilizar:</b> INV E</p>		450-13																																																																																																				
REGISTRO DE DATOS																																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="width: 15%;">No de MUESTRA</th> <th style="width: 5%;">1</th> <th style="width: 5%;">2</th> <th style="width: 5%;">3</th> <th style="width: 5%;">4</th> <th style="width: 5%;">5</th> <th style="width: 5%;">6</th> <th style="width: 5%;">7</th> <th style="width: 5%;">8</th> <th style="width: 5%;">9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">ABSCISA</td> <td colspan="9" style="text-align: center;"><b>CONCESIÓN NEIVA-ESPINAL-GIRARDOT. K6+000 Tramo entre los Municipios de Guamo - Saldaña en el Departamento Tolima</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO DEL PLATON (g)</td> <td style="text-align: center;">102,9</td> <td style="text-align: center;">156,0</td> <td style="text-align: center;">105,9</td> <td style="text-align: center;">98,3</td> <td style="text-align: center;">105,2</td> <td style="text-align: center;">114,0</td> <td style="text-align: center;">112,0</td> <td style="text-align: center;">108,6</td> <td style="text-align: center;">112,5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO INICIAL DE LA MUESTRA CON PLATON (g)</td> <td style="text-align: center;">1191,0</td> <td style="text-align: center;">1194,3</td> <td style="text-align: center;">1193,1</td> <td style="text-align: center;">1124,6</td> <td style="text-align: center;">1191,0</td> <td style="text-align: center;">1198,8</td> <td style="text-align: center;">1192,9</td> <td style="text-align: center;">1201,0</td> <td style="text-align: center;">1198,8</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO FINAL DE LA MUESTRA CON PLATÓN (g)</td> <td style="text-align: center;">1119,2</td> <td style="text-align: center;">1132,8</td> <td style="text-align: center;">1124,6</td> <td style="text-align: center;">1057,2</td> <td style="text-align: center;">1120,5</td> <td style="text-align: center;">1129,9</td> <td style="text-align: center;">1125,0</td> <td style="text-align: center;">1131,9</td> <td style="text-align: center;">1130,9</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO INICIAL DE LA MUESTRA</td> <td style="text-align: center;">1088,1</td> <td style="text-align: center;">1038,3</td> <td style="text-align: center;">1087,2</td> <td style="text-align: center;">1026,3</td> <td style="text-align: center;">1085,8</td> <td style="text-align: center;">1084,8</td> <td style="text-align: center;">1080,9</td> <td style="text-align: center;">1092,4</td> <td style="text-align: center;">1086,3</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO FINAL DE LA MUESTRA</td> <td style="text-align: center;">1016,3</td> <td style="text-align: center;">976,8</td> <td style="text-align: center;">1018,7</td> <td style="text-align: center;">958,9</td> <td style="text-align: center;">1015,3</td> <td style="text-align: center;">1015,9</td> <td style="text-align: center;">1013,0</td> <td style="text-align: center;">1023,3</td> <td style="text-align: center;">1018,4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO INICIAL DEL FILTRO</td> <td style="text-align: center;">13,9</td> <td style="text-align: center;">13,7</td> <td style="text-align: center;">13,7</td> <td style="text-align: center;">13,9</td> <td style="text-align: center;">13,8</td> <td style="text-align: center;">13,8</td> <td style="text-align: center;">13,8</td> <td style="text-align: center;">13,8</td> <td style="text-align: center;">13,6</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">PESO FINAL DEL FILTRO</td> <td style="text-align: center;">15,0</td> <td style="text-align: center;">14,6</td> <td style="text-align: center;">14,7</td> <td style="text-align: center;">15,0</td> <td style="text-align: center;">14,6</td> <td style="text-align: center;">14,8</td> <td style="text-align: center;">14,9</td> <td style="text-align: center;">14,8</td> <td style="text-align: center;">14,7</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td style="text-align: center;"><b>CONTENIDO DE ASF. (%)</b></td> <td style="text-align: center;">6,70%</td> <td style="text-align: center;">6,01%</td> <td style="text-align: center;">6,39%</td> <td style="text-align: center;">6,67%</td> <td style="text-align: center;">6,57%</td> <td style="text-align: center;">6,44%</td> <td style="text-align: center;">6,38%</td> <td style="text-align: center;">6,42%</td> <td style="text-align: center;">6,35%</td> </tr> </tbody> </table>			No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ABSCISA	<b>CONCESIÓN NEIVA-ESPINAL-GIRARDOT. K6+000 Tramo entre los Municipios de Guamo - Saldaña en el Departamento Tolima</b>									PESO DEL PLATON (g)	102,9	156,0	105,9	98,3	105,2	114,0	112,0	108,6	112,5	PESO INICIAL DE LA MUESTRA CON PLATON (g)	1191,0	1194,3	1193,1	1124,6	1191,0	1198,8	1192,9	1201,0	1198,8	PESO FINAL DE LA MUESTRA CON PLATÓN (g)	1119,2	1132,8	1124,6	1057,2	1120,5	1129,9	1125,0	1131,9	1130,9	PESO INICIAL DE LA MUESTRA	1088,1	1038,3	1087,2	1026,3	1085,8	1084,8	1080,9	1092,4	1086,3	PESO FINAL DE LA MUESTRA	1016,3	976,8	1018,7	958,9	1015,3	1015,9	1013,0	1023,3	1018,4	PESO INICIAL DEL FILTRO	13,9	13,7	13,7	13,9	13,8	13,8	13,8	13,8	13,6	PESO FINAL DEL FILTRO	15,0	14,6	14,7	15,0	14,6	14,8	14,9	14,8	14,7	<b>CONTENIDO DE ASF. (%)</b>	6,70%	6,01%	6,39%	6,67%	6,57%	6,44%	6,38%	6,42%	6,35%
No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																																																													
ABSCISA	<b>CONCESIÓN NEIVA-ESPINAL-GIRARDOT. K6+000 Tramo entre los Municipios de Guamo - Saldaña en el Departamento Tolima</b>																																																																																																					
PESO DEL PLATON (g)	102,9	156,0	105,9	98,3	105,2	114,0	112,0	108,6	112,5																																																																																													
PESO INICIAL DE LA MUESTRA CON PLATON (g)	1191,0	1194,3	1193,1	1124,6	1191,0	1198,8	1192,9	1201,0	1198,8																																																																																													
PESO FINAL DE LA MUESTRA CON PLATÓN (g)	1119,2	1132,8	1124,6	1057,2	1120,5	1129,9	1125,0	1131,9	1130,9																																																																																													
PESO INICIAL DE LA MUESTRA	1088,1	1038,3	1087,2	1026,3	1085,8	1084,8	1080,9	1092,4	1086,3																																																																																													
PESO FINAL DE LA MUESTRA	1016,3	976,8	1018,7	958,9	1015,3	1015,9	1013,0	1023,3	1018,4																																																																																													
PESO INICIAL DEL FILTRO	13,9	13,7	13,7	13,9	13,8	13,8	13,8	13,8	13,6																																																																																													
PESO FINAL DEL FILTRO	15,0	14,6	14,7	15,0	14,6	14,8	14,9	14,8	14,7																																																																																													
<b>CONTENIDO DE ASF. (%)</b>	6,70%	6,01%	6,39%	6,67%	6,57%	6,44%	6,38%	6,42%	6,35%																																																																																													
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: red; color: white;"><b>CONTENIDO DE ASF. (%) DE LA MUESTRA DE RAP</b></td> <td style="text-align: center; width: 100px;"><b>6,44%</b></td> </tr> </table>		<b>CONTENIDO DE ASF. (%) DE LA MUESTRA DE RAP</b>	<b>6,44%</b>																																																																																																			
<b>CONTENIDO DE ASF. (%) DE LA MUESTRA DE RAP</b>	<b>6,44%</b>																																																																																																					
<p><b>Observaciones:</b> Material fresado en la vía y desechado.</p>																																																																																																						
<p><b>Nota:</b> Material suministrado por la Gobernación de Tolima.</p>																																																																																																						
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :	Firma	Fecha																																																																																																				
<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>		Año																																																																																																				
		Mes																																																																																																				
		Día																																																																																																				
		2016      1      20																																																																																																				



Ibagué, 20 de Abril de 2016

Ing. Pedro Julián Gallego

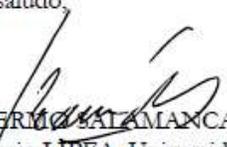
**Nota:** La muestra objeto de análisis ha sido reportada a solicitud del interesado.

En relación y consideración a su solicitud de análisis de una muestra de aceite lubricante (AL), me permito relacionar los valores tipo observados en las muestras reportadas al laboratorio LIPFA de la Universidad del Tolima.

Parámetros	Valores	Unidades
Densidad	$875 \pm 4,20$	$\text{kg m}^{-3}$
Gravedad API	$901 \pm 14,1$	-
V. Cinemática 20°C	$3,86 \pm 0,012$	$\text{mm}^2\text{s}^{-1}$
Cenizas sulfatadas	$0,334 \pm 0,005$	% (p/p)
Humedad	$0,10 \pm 0,001$	% (v/v)
Solidos	$0,20 \pm 0,002$	% (p/v)
P. inflamación	$163 \pm 1$	°C

Las evaluaciones se realizaron considerando protocolos de ensayo de la American Standard Testing of Materials (ASTM).

Cordial saludo,

  
GUILLERMO ATAMANCA GROSSO, PhD. Química  
Laboratorio LIPFA. Universidad del Tolima



Anexo 5– Anova y test de Duncan para variable Viscosidad

**Factores inter-sujetos**

		N
Mezcla	,00	18
	5,00	18
	10,00	18
	15,00	18
	Temperatura	90,00
	100,00	12
	110,00	12
	120,00	12
	140,00	12
	160,00	12

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Viscosidad

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	714354053 <sup>a</sup>	23	31058871,88	377,737	,000
Intersección	329072409,4	1	329072409,4	4002,164	,000
Mezcla	104180019,4	3	34726673,13	422,344	,000
Temperatura	446230564,8	5	89246112,96	1085,407	,000
Mezcla * Temperatura	163943469,1	15	10929564,61	132,925	,000
Error	3946733,333	48	82223,611		
Total	1047373196	72			
Total corregido	718300786,6	71			

a. R al cuadrado = ,995 (R al cuadrado ajustada = ,992)

**Viscosidad**

Temperatura	N	Subconjunto					
		1	2	3	4	5	
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	160,00	12	149,8333				
	140,00	12	328,0000				
	120,00	12		754,7500			
	110,00	12			1370,0833		
	100,00	12				2903,0000	
	90,00	12					7321,5000
	Sig.		,652	1,000	1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>	160,00	12	149,8333				
	140,00	12	328,0000				
	120,00	12		754,7500			
	110,00	12			1370,0833		
	100,00	12				2903,0000	
	90,00	12					7321,5000
	Sig.		,135	1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 82223,611.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 12,000.

b. Alfa = 0,05.

**Viscosidad**

Mezcla	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	15,00	18	739,3889			
	10,00	18		1374,8333		
	5,00	18			2542,6667	
	,00	18				3894,5556
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>	15,00	18	739,3889			
	10,00	18		1374,8333		
	5,00	18			2542,6667	
	,00	18				3894,5556
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

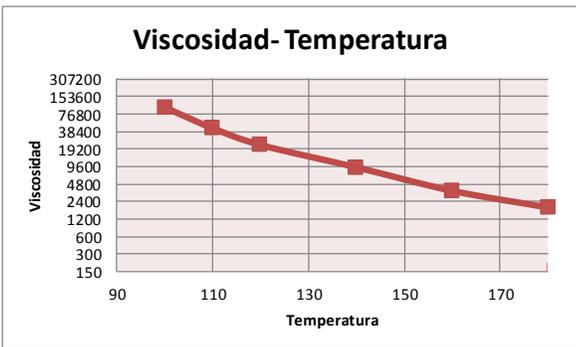
Se basa en las medias observadas.

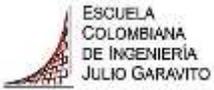
El término de error es la media cuadrática(Error) = 82223,611.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 18,000.

b. Alfa = 0,05.

Anexo 6- Análisis de viscosidad de muestras de asfalto

<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -</b>																																				
	<b>DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL</b>																																				
<b>Fecha de elaboración:</b>		18 de enero de 2016																																			
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																					
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Gallego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390																																			
<b>Descripción de la muestra:</b> 100% de asfalto envejecido																																					
<b>Procedencia:</b> Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.																																					
<b>Especificación a utilizar:</b>		INV E 450-13																																			
<b>REGISTRO DE DATOS</b>																																					
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: red;">Hora:</td> <td style="text-align: center;">8:05</td> <td style="text-align: center;">a.m.</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red;">Tamaño del vastago:</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>			Hora:	8:05	a.m.	Tamaño del vastago:																															
Hora:	8:05	a.m.																																			
Tamaño del vastago:																																					
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th style="background-color: red;">Temperatura de ensayo redondeada (°C):</th> <th>100</th> <th>110</th> <th>120</th> <th>140</th> <th>160</th> <th>180</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="background-color: red;">Velocidad de giro (RPM)</td> <td>44</td> <td>103</td> <td>191</td> <td>250</td> <td>250</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red;">Torque medido(%)</td> <td>174,3</td> <td>179,2</td> <td>170,8</td> <td>91,5</td> <td>46,4</td> <td>24,4</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red;">Viscosidad promedio (cP)</td> <td>99319</td> <td>43485</td> <td>22348</td> <td>9180</td> <td>3605</td> <td>1858</td> </tr> <tr> <td style="background-color: red;">Viscosidad promedio (Pa.s)</td> <td>99,32</td> <td>43,49</td> <td>22,35</td> <td>9,18</td> <td>3,61</td> <td>1,86</td> </tr> </tbody> </table>			Temperatura de ensayo redondeada (°C):	100	110	120	140	160	180	Velocidad de giro (RPM)	44	103	191	250	250	250	Torque medido(%)	174,3	179,2	170,8	91,5	46,4	24,4	Viscosidad promedio (cP)	99319	43485	22348	9180	3605	1858	Viscosidad promedio (Pa.s)	99,32	43,49	22,35	9,18	3,61	1,86
Temperatura de ensayo redondeada (°C):	100	110	120	140	160	180																															
Velocidad de giro (RPM)	44	103	191	250	250	250																															
Torque medido(%)	174,3	179,2	170,8	91,5	46,4	24,4																															
Viscosidad promedio (cP)	99319	43485	22348	9180	3605	1858																															
Viscosidad promedio (Pa.s)	99,32	43,49	22,35	9,18	3,61	1,86																															
<b>TEMPERATURA - VISCOSIDAD</b>																																					
<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;"> <h3 style="text-align: center;">Viscosidad- Temperatura</h3>  </div>																																					
Temperatura de mezclado:		°C																																			
Temperatura de compactación:		°C																																			
<b>Observaciones:</b> Material fresado en la via y desechado.																																					
<b>Nota:</b> Material suministrado por la Gobernación de Tolima.																																					
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :	Firma	<b>Fecha</b>																																			
<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <th style="background-color: red;">Año</th> <th style="background-color: red;">Mes</th> <th style="background-color: red;">Día</th> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2016</td> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">20</td> </tr> </table>	Año	Mes	Día	2016	1	20																													
Año	Mes	Día																																			
2016	1	20																																			

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 18 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 1A (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

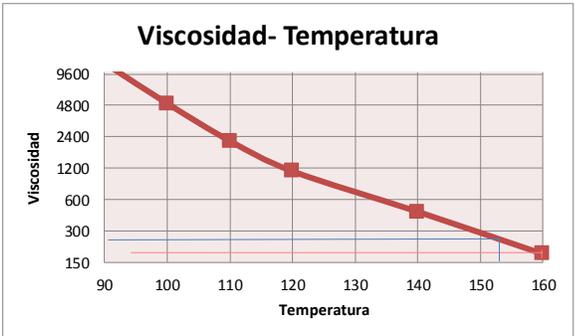
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	08:05	a.m.
<b>Tamaño del vastago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	16	44	103	191	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	87,7	88,1	90,4	86,1	46,2	23,4
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	12180	5006	2194	1127	462	182
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	12,18	5,01	2,19	1,13	0,46	0,18

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

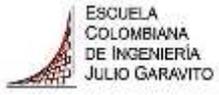


<b>Temperatura de mezclado:</b>	160	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	153	°C

**Observaciones:** Material fresado en la via y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	20

<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -</b>	
	<b>DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL</b>	

**Fecha de elaboración:** 18 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 1B (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

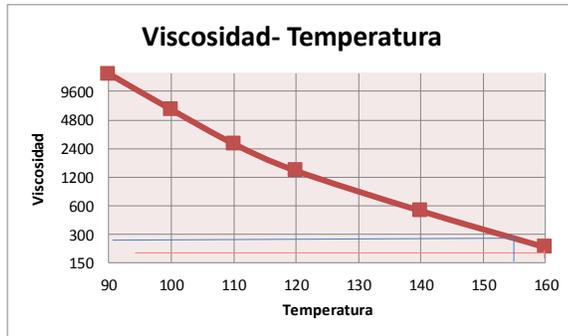
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	10:08	a.m.
<b>Tamaño del vastago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	15	35	82	153	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	87,7	86,2	88,3	85,7	53,1	26,2
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	14617	6157	2692	1400	531	220
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	14,62	6,16	2,69	1,40	0,53	0,22

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**



<b>Temperatura de mezclado:</b>	160	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	155	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	20

<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	<b>NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -</b>	
	<b>DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL</b>	

**Fecha de elaboración:** 18 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 1C (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

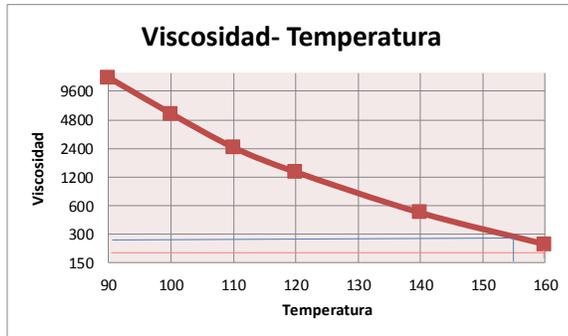
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	02:00	p.m.
<b>Tamaño del vastago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	16	31	94	185	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	87,7	87,4	89,9	85,9	50,4	25,1
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	13250	5545	2450	1350	504	235
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	13,25	5,55	2,45	1,35	0,50	0,24

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

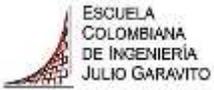


<b>Temperatura de mezclado:</b>	160	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	155	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	20

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 19 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 2A (5% Aceite quemado + 95% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

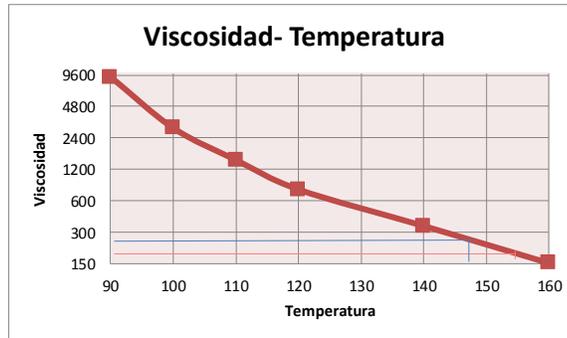
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	08:55	a.m.
<b>Tamaño del vastago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	24	74	141	250	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	87,7	88,2	83,5	77,4	34,7	12,5
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	9135	2980	1480	774	348	154
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	9,14	2,98	1,48	0,77	0,35	0,15

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

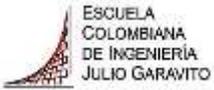


<b>Temperatura de mezclado:</b>	157	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	147	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	21

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 19 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 2B (5% Aceite quemado + 95% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

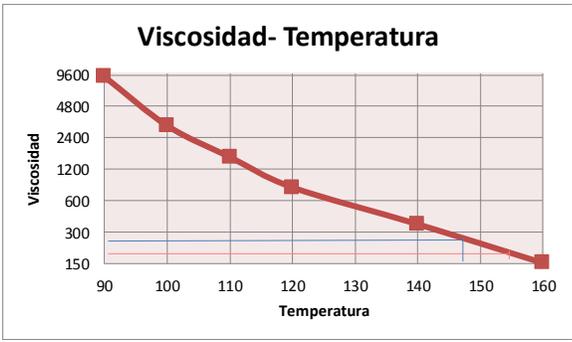
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

Hora:	10:15	a.m.
Tamaño del vastago:		

Temperatura de ensayo redondeada (°C):	90	100	110	120	140	160
Velocidad de giro (RPM)	26	78	150	250	250	250
Torque medido(%)	87,8	90,2	85,5	81,6	35,6	15,5
Viscosidad promedio (cP)	9258	3150	1580	810	360	153
Viscosidad promedio (Pa.s)	9,26	3,15	1,58	0,81	0,36	0,15

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**



Temperatura de mezclado:	157	°C
Temperatura de compactación:	147	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	Fecha		
		Año	Mes	Día
		2016	1	21

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 19 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 2C (5% Aceite quemado + 95% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

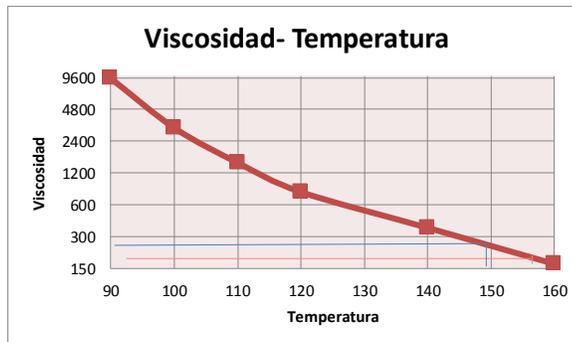
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	01:50	p.m.
<b>Tamaño del vástago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	25	80	156	250	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	87,7	90,5	86,5	80,5	36,8	16,5
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	9485	3240	1520	804	369	168
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	9,49	3,24	1,52	0,80	0,37	0,17

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

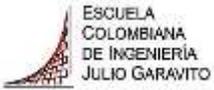


<b>Temperatura de mezclado:</b>	158	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	149	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	21

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 20 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 3A (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

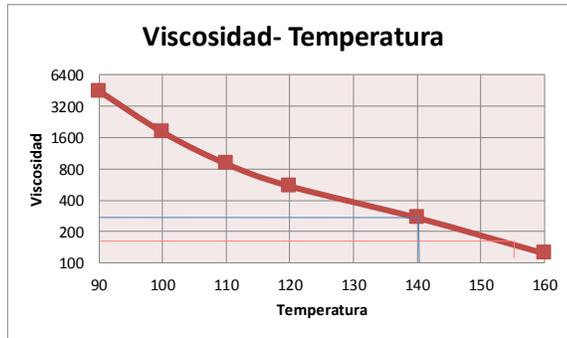
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

Hora:	08:35	a.m.
Tamaño del vastago:		

Temperatura de ensayo redondeada (°C):	90	100	110	120	140	160
Velocidad de giro (RPM)	50	115	235	250	250	250
Torque medido(%)	89,7	83,1	84,6	54,9	26,8	13,5
Viscosidad promedio (cP)	4485	1807	900	549	274	125
Viscosidad promedio (Pa.s)	4,49	1,81	0,90	0,55	0,27	0,13

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

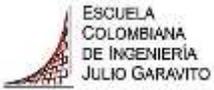


Temperatura de mezclado:	155	°C
Temperatura de compactación:	140	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		Año	Mes	Día
		2016	1	22

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 20 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 3B (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

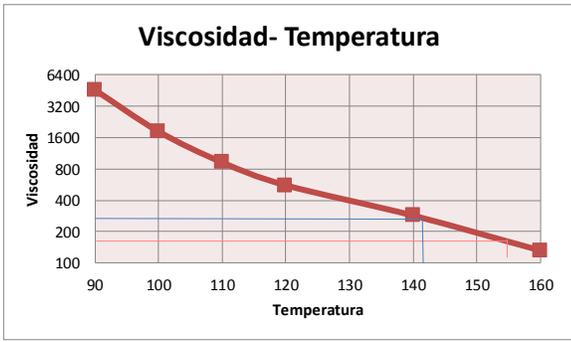
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

Hora:	12:05	a.m.
Tamaño del vastago:		

Temperatura de ensayo redondeada (°C):	90	100	110	120	140	160
Velocidad de giro (RPM)	62	121	241	250	250	250
Torque medido(%)	90,1	83,4	82,1	50,4	25,6	12,8
Viscosidad promedio (cP)	4580	1825	921	555	284	131
Viscosidad promedio (Pa.s)	4,58	1,83	0,92	0,56	0,28	0,13

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

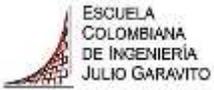


Temperatura de mezclado:	154	°C
Temperatura de compactación:	141	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	22

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 20 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 3C (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

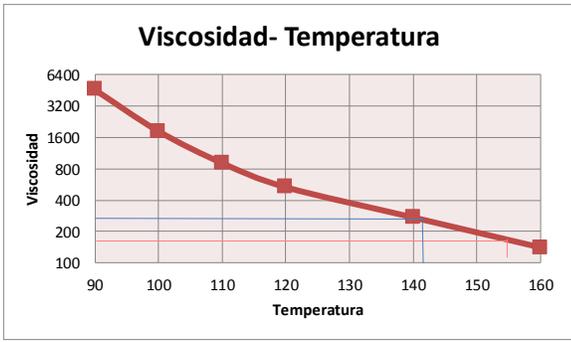
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

Hora:	03:05	p.m.
Tamaño del vastago:		

Temperatura de ensayo redondeada (°C):	90	100	110	120	140	160
Velocidad de giro (RPM)	55	117	238	250	250	250
Torque medido(%)	90,3	83,2	83,5	52,1	26,2	13,8
Viscosidad promedio (cP)	4610	1841	911	534	274	141
Viscosidad promedio (Pa.s)	4,61	1,84	0,91	0,53	0,27	0,14

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

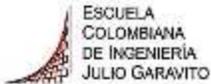


Temperatura de mezclado:	154	°C
Temperatura de compactación:	141	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	22

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 21 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 4A (15% Aceite quemado + 85% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Vía Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

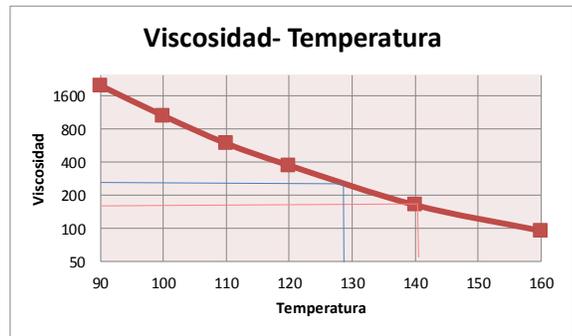
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	08:20	a.m.
<b>Tamaño del vástago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	112	191	250	250	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	89,7	91,1	59,4	37,4	16,5	8,4
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	2002	1062	594	374	163	95
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	2,00	1,06	0,59	0,37	0,16	0,095

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

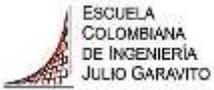


<b>Temperatura de mezclado:</b>	128	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	140	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	23

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 21 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 4B (15% Aceite quemado + 85% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

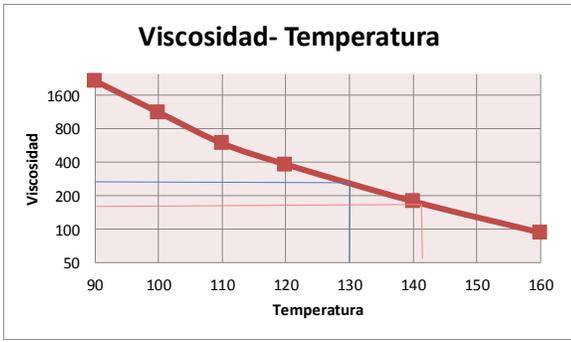
**Especificación a utilizar:**      INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

<b>Hora:</b>	11:12	a.m.
<b>Tamaño del vastago:</b>		

<b>Temperatura de ensayo redondeada (°C):</b>	90	100	110	120	140	160
<b>Velocidad de giro (RPM)</b>	124	205	250	250	250	250
<b>Torque medido(%)</b>	89,8	80,9	59,8	35,4	17,8	9,5
<b>Viscosidad promedio (cP)</b>	2158	1125	591	382	178	93
<b>Viscosidad promedio (Pa.s)</b>	2,16	1,13	0,59	0,38	0,18	0,093

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**

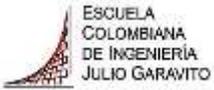


<b>Temperatura de mezclado:</b>	130	°C
<b>Temperatura de compactación:</b>	141	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Día</b>
		2016	1	23

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 717 - 13 -	
	DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	

**Fecha de elaboración:** 21 de enero de 2016

**Nombre del proyecto:** Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.

**Nombres y apellidos del autor del trabajo:** Pedro Julián Gallego Quintana      **Documento de identificación:** 2.231.390

**Descripción de la muestra:** Mezcla No 4C (15% Aceite quemado + 85% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)

**Procedencia:** Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.

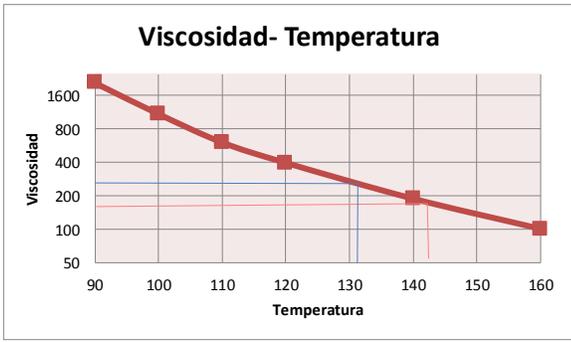
**Especificación a utilizar:** INV E      450-13

**REGISTRO DE DATOS**

Hora:	03:38	a.m.
Tamaño del vastago:		

Temperatura de ensayo redondeada (°C):	90	100	110	120	140	160
Velocidad de giro (RPM)	115	201	250	250	250	250
Torque medido(%)	89,7	85,9	57,8	36,9	18,4	10,5
Viscosidad promedio (cP)	2098	1098	608	398	189	101
Viscosidad promedio (Pa.s)	2,10	1,10	0,61	0,40	0,19	0,101

**TEMPERATURA - VISCOSIDAD**



Temperatura de mezclado:	131	°C
Temperatura de compactación:	142	°C

**Observaciones:** Material fresado en la vía y desechado.

**Nota:** Material suministrado por la Gobernación de Tolima.

Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :  <b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>	Firma	<b>Fecha</b>		
		Año	Mes	Día
		2016	1	23

Anexo 7- Análisis de medias para Penetración de los materiales bituminosos

**Factores inter-sujetos**

	N
Inclusión ,00	3
5,00	3
10,00	3
15,00	3

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Penetración\_mm

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	27420,686 <sup>a</sup>	3	9140,229	36722,494	,000
Intersección	68152,570	1	68152,570	273815,065	,000
Inclusión	27420,686	3	9140,229	36722,494	,000
Error	1,991	8	,249		
Total	95575,247	12			
Total corregido	27422,677	11			

a. R al cuadrado = 1,000 (R al cuadrado ajustada = 1,000)

**Subconjuntos homogéneos**

**Penetración\_mm**

Inclusión	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a,b</sup>					
,00	3	24,7767			
5,00	3		41,0033		
10,00	3			87,8900	
15,00	3				147,7767
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>					
,00	3	24,7767			
5,00	3		41,0033		
10,00	3			87,8900	
15,00	3				147,7767
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

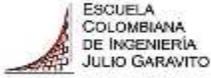
El término de error es la media cuadrática(Error) = ,249.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

b. Alfa = 0,05.

Anexo 8 - Penetración de los materiales bituminosos Norma de ensayo INV E 706 – 13.

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 706 - 13 -									
	PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS.									
Fecha de elaboración: 25 de enero de 2016										
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.										
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Galego Quintana					Documento de identificación: 2.231.390					
Descripción de la muestra: Mezcla No 1 (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)										
Procedencia: Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.										
Especificación a utilizar: INV E					450-13					
REGISTRO DE DATOS										
	Recipiente No 01			Recipiente No 02			Recipiente No 03			
No de MUESTRA	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
ASFALTO	MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 0% DE ACEITE QUEMADO)									
PENETRACIÓN. (0.1 mm)	25	24	25	25	25	26	24	24	25	
Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm)	24,67			25,33			24,33			
Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm) de la muestra:							24,8	mm		
Observaciones: Material fresado en la via y desechado.										
Nota: Material suministrado por la Gobernación de Tolima.										
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :					Firma			Fecha		
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA								Año	Mes	Día
								2016	1	27

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 706 - 13 -									
	PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS.									
				Fecha de elaboración: 25 de enero de 2016						
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.										
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana			Documento de identificación: 2.231.390							
Descripción de la muestra: Mezcla No 1 (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)										
Procedencia: Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Vía Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.										
Especificación a utilizar: INV E			450-13							
REGISTRO DE DATOS										
	Recipiente No 01			Recipiente No 02			Recipiente No 03			
<b>No de MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	
ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 0% DE ACEITE QUEMADO)</b>									
<b>PENETRACIÓN. (0.1 mm)</b>	25	24	25	25	25	26	24	24	25	
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm)</b>	24,67			25,33			24,33			
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm) de la muestra:</b>				<b>24,8</b>	<b>mm</b>					
Observaciones: Material fresado en la vía y desechado.										
Nota: Material suministrado por la Gobernación de Tolima.										
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :				Firma		Fecha				
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA						Año	Mes	Día		
						2016	1	27		

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 706 - 13 -								
	PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS.								
<b>Fecha de elaboración:</b>				25 de enero de 2016					
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.									
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Gallego Quintana			<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390						
<b>Descripción de la muestra:</b> Mezcla No 3 (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)									
<b>Procedencia:</b> Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Vía Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.									
<b>Especificación a utilizar:</b>			INV E	450-13					
REGISTRO DE DATOS									
	Recipiente No 01			Recipiente No 02			Recipiente No 03		
<b>No de MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)</b>								
<b>PENETRACIÓN. (0.1 mm)</b>	88	88	89	87	88	88	87	88	88
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm)</b>	88,33			87,67			87,67		
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm) de la muestra:</b>							<b>87,9</b>	<b>mm</b>	
<b>Observaciones:</b> Material fresado en la via y desechado.									
<b>Nota:</b> Material suministrado por la Gobernación de Tolima.									
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :			Firma		Fecha				
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA					Año	Mes	Día		
					2016	1	27		

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 706 - 13 -								
	PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS.								
<b>Fecha de elaboración:</b>				25 de enero de 2016					
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.									
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b>		Pedro Julián Gallego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390					
<b>Descripción de la muestra:</b> Mezcla No 4 (15% Aceite quemado + 85% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)									
<b>Procedencia:</b> Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.									
<b>Especificación a utilizar:</b>		INV E	450-13						
REGISTRO DE DATOS									
	Recipiente No 01			Recipiente No 02			Recipiente No 03		
<b>No de MUESTRA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 15% DE ACEITE QUEMADO)</b>								
<b>PENETRACIÓN. (0.1 mm)</b>	147	148	148	149	148	148	148	147	147
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm)</b>	147,67			148,33			147,33		
<b>Promedio PENETRACIÓN (0.1 mm) de la muestra:</b>							<b>147,8</b>	<b>mm</b>	
<b>Observaciones:</b> Material fresado en la vía y desechado.									
<b>Nota:</b> Material suministrado por la Gobernación de Tolima.									
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :				Firma		<b>Fecha</b>			
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA						Año	Mes	Día	
						2016	1	27	

Anexo 9– Análisis de medias para la variable Punto de ablandamiento

**Factores inter-sujetos**

	N
Mezcla ,00	6
5,00	6
10,00	6
15,00	6

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Punto\_ablandamiento

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	3620,665 <sup>a</sup>	3	1206,888	938,300	,000
Intersección	65720,200	1	65720,200	51094,422	,000
Mezcla	3620,665	3	1206,888	938,300	,000
Error	25,725	20	1,286		
Total	69366,590	24			
Total corregido	3646,390	23			

a. R al cuadrado = ,993 (R al cuadrado ajustada = ,992)

**Punto\_ablandamiento**

Mezcla	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	15,00	6	39,5833			
	10,00	6		45,1167		
	5,00	6			52,5667	
	,00	6				72,0500
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>	15,00	6	39,5833			
	10,00	6		45,1167		
	5,00	6			52,5667	
	,00	6				72,0500
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

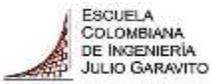
Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 1,286.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 6,000.

b. Alfa = 0,05.

Anexo 10 - Resultados Ensayos Puntos de Ablandamiento Norma de ensayo INV E 712 – 13.

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 712 - 13 -																										
	PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA).																										
Fecha de elaboración:			25 de enero de 2016																								
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																											
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																									
Descripción de la muestra: Mezcla No 1 (0% Aceite quemado + 100% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)																											
Procedencia: Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.																											
Especificación a utilizar:		INV E	450-13																								
<b>REGISTRO DE DATOS</b>																											
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th>No de MUESTRA</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">ASFALTO</td> <td colspan="6"><b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 0% DE ACEITE QUEMADO)</b></td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td>Punto de ablandamiento. (°C)</td> <td>70,9</td> <td>71,8</td> <td>72,4</td> <td>71,5</td> <td>72,6</td> <td>73,1</td> </tr> </tbody> </table>							No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 0% DE ACEITE QUEMADO)</b>						Punto de ablandamiento. (°C)	70,9	71,8	72,4	71,5	72,6	73,1
No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6																					
ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 0% DE ACEITE QUEMADO)</b>																										
Punto de ablandamiento. (°C)	70,9	71,8	72,4	71,5	72,6	73,1																					
<b>Punto de ablandamiento promedio de la muestra:</b>					<b>72,1</b>	<b>°C</b>																					
Observaciones: Material fresado en la vía y desechado.																											
Nota: Material suministrado por la Gobernación de Tolima.																											
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :			Firma		Fecha																						
<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>					Año	Mes	Día																				
					2016	1	27																				

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 712 - 13 -																										
	PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA).																										
<b>Fecha de elaboración:</b> 25 de enero de 2016																											
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																											
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Gallego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390																									
<b>Descripción de la muestra:</b> Mezcla No 2 (5% Aceite quemado + 95% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)																											
<b>Procedencia:</b> Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Vía Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.																											
<b>Especificación a utilizar:</b> INV E		450-13																									
REGISTRO DE DATOS																											
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th>No de MUESTRA</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> </tr> <tr> <td>ASFALTO</td> <td colspan="6">MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 5% DE ACEITE QUEMADO)</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th>Punto de ablandamiento. (°C)</th> <td>51,8</td> <td>51,4</td> <td>52,4</td> <td>51,7</td> <td>54,2</td> <td>53,9</td> </tr> </table>							No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	ASFALTO	MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 5% DE ACEITE QUEMADO)						Punto de ablandamiento. (°C)	51,8	51,4	52,4	51,7	54,2	53,9
No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6																					
ASFALTO	MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 5% DE ACEITE QUEMADO)																										
Punto de ablandamiento. (°C)	51,8	51,4	52,4	51,7	54,2	53,9																					
<b>Punto de ablandamiento promedio de la muestra:</b>				52,6	°C																						
<b>Observaciones:</b> Material fresado en la vía y desechado.																											
<b>Nota:</b> Material suministrado por la Gobernación de Tolima.																											
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :			Firma		Fecha																						
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA					Año	Mes	Día																				
					2016	1	27																				

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 712 - 13 -																							
	PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA).																							
			Fecha de elaboración: 25 de enero de 2016																					
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																								
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																						
Descripción de la muestra: Mezcla No 2 (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)																								
Procedencia: Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.																								
Especificación a utilizar: INV E		450-13																						
<b>REGISTRO DE DATOS</b>																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>No de MUESTRA</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ASFALTO</td> <td colspan="6" style="text-align: center;"><b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)</b></td> </tr> <tr> <td>Punto de ablandamiento. (°C)</td> <td>44,0</td> <td>43,2</td> <td>45,1</td> <td>44,5</td> <td>46,8</td> <td>47,1</td> </tr> </tbody> </table>				No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)</b>						Punto de ablandamiento. (°C)	44,0	43,2	45,1	44,5	46,8	47,1
No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6																		
ASFALTO	<b>MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)</b>																							
Punto de ablandamiento. (°C)	44,0	43,2	45,1	44,5	46,8	47,1																		
<table border="1"> <tr> <td>Punto de ablandamiento promedio de la muestra:</td> <td>45,1</td> <td>°C</td> </tr> </table>				Punto de ablandamiento promedio de la muestra:	45,1	°C																		
Punto de ablandamiento promedio de la muestra:	45,1	°C																						
Observaciones: Material fresado en la vía y desechado.																								
Nota: Material suministrado por la Gobernación de Tolima.																								
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma																						
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA		<b>Fecha</b>																						
		Año	Mes																					
		2016	1																					
		Día	27																					

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 712 - 13 -																										
	PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA).																										
			Fecha de elaboración: 25 de enero de 2016																								
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																											
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																									
Descripción de la muestra: Mezcla No 2 (10% Aceite quemado + 90% de asfalto envejecido con asfalto nuevo)																											
Procedencia: Asfalto recuperado del RAP tomado en el K6+00 Via Guamo - Saldaña en el Departamento del Tolima.																											
		Especificación a utilizar: INV E	450-13																								
REGISTRO DE DATOS																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="padding: 5px;">No de MUESTRA</th> <th style="padding: 5px;">1</th> <th style="padding: 5px;">2</th> <th style="padding: 5px;">3</th> <th style="padding: 5px;">4</th> <th style="padding: 5px;">5</th> <th style="padding: 5px;">6</th> </tr> <tr> <td style="padding: 5px; text-align: center;">ASFALTO</td> <td colspan="6" style="padding: 5px; text-align: center;">MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="padding: 5px;">Punto de ablandamiento. (°C)</th> <td style="padding: 5px; text-align: center;">39,1</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">39,8</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">38,4</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">39,5</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">39,9</td> <td style="padding: 5px; text-align: center;">40,8</td> </tr> </table>							No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6	ASFALTO	MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)						Punto de ablandamiento. (°C)	39,1	39,8	38,4	39,5	39,9	40,8
No de MUESTRA	1	2	3	4	5	6																					
ASFALTO	MEZCLA DE (ASFALTO RECUPERADO + ASFALTO NUEVO + 10% DE ACEITE QUEMADO)																										
Punto de ablandamiento. (°C)	39,1	39,8	38,4	39,5	39,9	40,8																					
Punto de ablandamiento promedio de la muestra:				39,6	°C																						
Observaciones: Material fresado en la via y desechado.																											
Nota: Material suministrado por la Gobernación de Tolima.																											
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :			Firma		Fecha																						
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA					Año	Mes	Día																				
					2016	1	27																				

Anexo 11 – Análisis de media para estabilidad y flujo

**ANOVA**

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Est_Marshall	Entre grupos	1331234166,667	3	443744722,222	861,640	,000
	Dentro de grupos	4120000,000	8	515000,000		
	Total	1335354166,667	11			
Est_Marshall_corregida	Entre grupos	1280255467,583	3	426751822,528	275,252	,000
	Dentro de grupos	12403220,667	8	1550402,583		
	Total	1292658688,250	11			
Flujo_mm	Entre grupos	,418	3	,139	6,980	,013
	Dentro de grupos	,160	8	,020		
	Total	,578	11			

**Est\_Marshall\_corregida**

		N	Subconjunto para alfa = 0.05			
Mezcla	1		2	3	4	
HSD Tukey <sup>a</sup>	15	3	10446,3333			
	10	3		15594,6667		
	5	3			25578,6667	
	20	3				37483,3333
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a</sup>	15	3	10446,3333			
	10	3		15594,6667		
	5	3			25578,6667	
	20	3				37483,3333
	Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

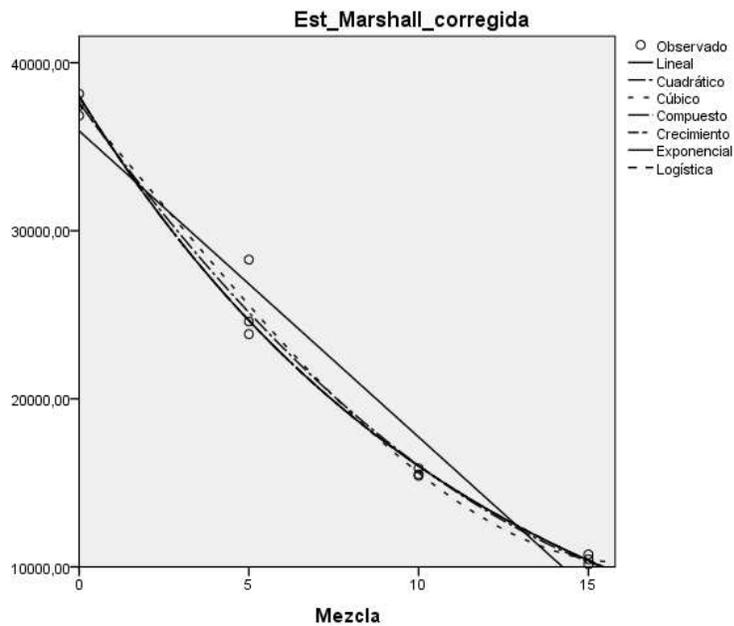
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.

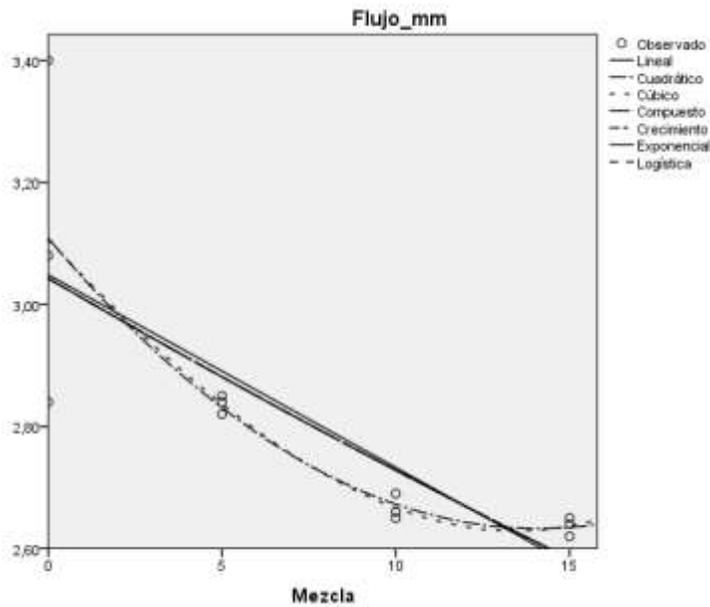
### Flujo\_mm

	Mezcla	N	Subconjunto para alfa = 0.05	
			1	2
HSD Tukey <sup>a</sup>	15	3	2,6367	
	10	3	2,6667	
	5	3	2,8367	2,8367
	20	3		3,1067
	Sig.			,368
Duncan <sup>a</sup>	15	3	2,6367	
	10	3	2,6667	
	5	3	2,8367	
	20	3		3,1067
	Sig.			,135

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3,000.





Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Flujo\_mm

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	,648	18,437	1	10	,002	3,049	-,032		
Logarítmico <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-	-		
Inverso <sup>b</sup>	-	-	-	-	-	-	-		
Cuadrático	,723	11,754	2	9	,003	3,109	-,068	,002	
Cúbico	,724	6,980	3	8	,013	3,107	-,061	,001	5,333E-5
Compuesto	,680	21,261	1	10	,001	3,043	,989		
Potencia <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-	-		
S <sup>b</sup>	-	-	-	-	-	-	-		
Crecimiento	,680	21,261	1	10	,001	1,113	-,011		
Exponencial	,680	21,261	1	10	,001	3,043	-,011		
Logística	,680	21,261	1	10	,001	,329	1,011		

La variable independiente es Mezcla.

a. La variable independiente (Mezcla) contiene valores no positivos. El valor mínimo es 0. Los modelos Logarítmico y de Potencia no se pueden calcular.

b. La variable independiente (Mezcla) contiene valores de cero. Los modelos Inverso y S no se pueden calcular.

**Resumen de modelo y estimaciones de parámetro**

Variable dependiente: Est\_Marshall\_corregida

Ecuación	Resumen del modelo					Estimaciones de parámetro			
	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.	Constante	b1	b2	b3
Lineal	.963	259,788	1	10	.000	35940,000	-1821,900		
Logarítmico <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Inverso <sup>b</sup>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Cuadrático	.989	420,785	2	9	.000	37629,083	-2035,350	67,563	
Cúbico	.990	275,252	3	8	.000	37483,333	-2378,667	-19,887	3,887
Compuesto	.991	1111,595	1	10	.000	38005,525	.917		
Potencia <sup>a</sup>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
S <sup>b</sup>	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Crecimiento	.991	1111,595	1	10	.000	10,545	-.087		
Exponencial	.991	1111,595	1	10	.000	38005,525	-.087		
Logística	.991	1111,595	1	10	.000	2,631E-5	1,090		

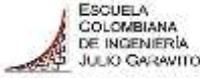
La variable independiente es Mezcla.

a. La variable independiente (Mezcla) contiene valores no positivos. El valor mínimo es 0. Los modelos Logarítmico y de Potencia no se pueden calcular.

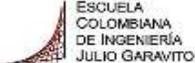
b. La variable independiente (Mezcla) contiene valores de cero. Los modelos Inverso y S no se pueden calcular.

Anexo 12 - Resultados ensayos para estabilidad y flujo.

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 748 - 13 -																																																		
	ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL																																																		
			Fecha de elaboración: 23 de Febrero de 2016																																																
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																			
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																																																	
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 1 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 0%)																																																			
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 1. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo y asfalto envejecido de RAP)																																																	
Especificación a utilizar:		INV E 450-13																																																	
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="text-align: center;">No de MUESTRA</th> <th style="text-align: center;">1,10</th> <th style="text-align: center;">1,11</th> <th style="text-align: center;">1,12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura de mezcla (°C)</td> <td style="text-align: center;">160,0</td> <td style="text-align: center;">160,4</td> <td style="text-align: center;">160,2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura de compactación (°C)</td> <td style="text-align: center;">154,6</td> <td style="text-align: center;">155,0</td> <td style="text-align: center;">155,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura del ensayo (°C)</td> <td style="text-align: center;">60,2</td> <td style="text-align: center;">60,4</td> <td style="text-align: center;">60,0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Gravedad Específica Bulk a 25°C</td> <td style="text-align: center;">2,364</td> <td style="text-align: center;">2,344</td> <td style="text-align: center;">2,350</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>2,353</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Altura de la probeta (mm)</td> <td style="text-align: center;">62,37</td> <td style="text-align: center;">63,19</td> <td style="text-align: center;">62,89</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">38150</td> <td style="text-align: center;">36850</td> <td style="text-align: center;">37450</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">38150</td> <td style="text-align: center;">36850</td> <td style="text-align: center;">37450</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td style="text-align: center;"><b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>37483</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Flujo (mm) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">2,84</td> <td style="text-align: center;">3,40</td> <td style="text-align: center;">3,08</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td style="text-align: center;"><b>FLUJO (mm) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>3,11</b></td> </tr> </tbody> </table>				No de MUESTRA	1,10	1,11	1,12	Temperatura de mezcla (°C)	160,0	160,4	160,2	Temperatura de compactación (°C)	154,6	155,0	155,0	Temperatura del ensayo (°C)	60,2	60,4	60,0	Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,364	2,344	2,350	<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,353</b>			Altura de la probeta (mm)	62,37	63,19	62,89	Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	38150	36850	37450	Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	38150	36850	37450	<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>37483</b>			Flujo (mm) (Individual)	2,84	3,40	3,08	<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>3,11</b>		
No de MUESTRA	1,10	1,11	1,12																																																
Temperatura de mezcla (°C)	160,0	160,4	160,2																																																
Temperatura de compactación (°C)	154,6	155,0	155,0																																																
Temperatura del ensayo (°C)	60,2	60,4	60,0																																																
Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,364	2,344	2,350																																																
<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,353</b>																																																		
Altura de la probeta (mm)	62,37	63,19	62,89																																																
Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	38150	36850	37450																																																
Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	38150	36850	37450																																																
<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>37483</b>																																																		
Flujo (mm) (Individual)	2,84	3,40	3,08																																																
<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>3,11</b>																																																		
Observaciones: N/A																																																			
Nota: N/A																																																			
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma																																																	
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA		Fecha																																																	
		Año	Mes	Día																																															
		2016	2	24																																															

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 748 - 13 -																																																		
	ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL																																																		
			Fecha de elaboración: 23 de Febrero de 2016																																																
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																			
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																																																	
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 2 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 5%)																																																			
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 2. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 5%)																																																	
Especificación a utilizar:		INV E	450-13																																																
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="text-align: center;">No de MUESTRA</th> <th style="text-align: center;">2,10</th> <th style="text-align: center;">2,11</th> <th style="text-align: center;">2,12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperatura de mezcla (°C)</td> <td style="text-align: center;">157,2</td> <td style="text-align: center;">157,0</td> <td style="text-align: center;">157,2</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de compactación (°C)</td> <td style="text-align: center;">147,0</td> <td style="text-align: center;">146,8</td> <td style="text-align: center;">147,0</td> </tr> <tr> <td>Temperatura del ensayo (°C)</td> <td style="text-align: center;">60,0</td> <td style="text-align: center;">60,4</td> <td style="text-align: center;">60,2</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica Bulk a 25°C</td> <td style="text-align: center;">2,357</td> <td style="text-align: center;">2,353</td> <td style="text-align: center;">2,362</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>2,357</b></td> </tr> <tr> <td>Altura de la probeta (mm)</td> <td style="text-align: center;">63,67</td> <td style="text-align: center;">60,90</td> <td style="text-align: center;">63,15</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">24600</td> <td style="text-align: center;">25950</td> <td style="text-align: center;">23850</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">24600</td> <td style="text-align: center;">28286</td> <td style="text-align: center;">23850</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>25579</b></td> </tr> <tr> <td>Flujo (mm) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">2,85</td> <td style="text-align: center;">2,82</td> <td style="text-align: center;">2,84</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>FLUJO (mm) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>2,84</b></td> </tr> </tbody> </table>				No de MUESTRA	2,10	2,11	2,12	Temperatura de mezcla (°C)	157,2	157,0	157,2	Temperatura de compactación (°C)	147,0	146,8	147,0	Temperatura del ensayo (°C)	60,0	60,4	60,2	Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,357	2,353	2,362	<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,357</b>			Altura de la probeta (mm)	63,67	60,90	63,15	Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	24600	25950	23850	Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	24600	28286	23850	<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>25579</b>			Flujo (mm) (Individual)	2,85	2,82	2,84	<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,84</b>		
No de MUESTRA	2,10	2,11	2,12																																																
Temperatura de mezcla (°C)	157,2	157,0	157,2																																																
Temperatura de compactación (°C)	147,0	146,8	147,0																																																
Temperatura del ensayo (°C)	60,0	60,4	60,2																																																
Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,357	2,353	2,362																																																
<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,357</b>																																																		
Altura de la probeta (mm)	63,67	60,90	63,15																																																
Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	24600	25950	23850																																																
Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	24600	28286	23850																																																
<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>25579</b>																																																		
Flujo (mm) (Individual)	2,85	2,82	2,84																																																
<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,84</b>																																																		
Observaciones: N/A																																																			
Nota: N/A																																																			
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma																																																	
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA																																																			
		Fecha																																																	
		Año	Mes																																																
		2016	2																																																
		Día																																																	
		24																																																	

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 748 - 13 -																																																			
	ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL																																																			
				Fecha de elaboración: 23 de Febrero de 2016																																																
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																				
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana			Documento de identificación: 2.231.390																																																	
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 3 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 10%)																																																				
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 3. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 10%)																																																		
		Especificación a utilizar: INV E 450-13																																																		
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <th>No de MUESTRA</th> <th>3,10</th> <th>3,11</th> <th>3,12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperatura de mezcla (°C)</td> <td>155,4</td> <td>155,2</td> <td>154,8</td> </tr> <tr> <td>Temperatura de compactación (°C)</td> <td>140,2</td> <td>140,0</td> <td>140,2</td> </tr> <tr> <td>Temperatura del ensayo (°C)</td> <td>60,4</td> <td>60,0</td> <td>60,0</td> </tr> <tr> <td>Gravedad Específica Bulk a 25°C</td> <td>2,351</td> <td>2,344</td> <td>2,353</td> </tr> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <td><b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3"><b>2,349</b></td> </tr> <tr> <td>Altura de la probeta (mm)</td> <td>59,60</td> <td>62,83</td> <td>60,25</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)</td> <td>14550</td> <td>15500</td> <td>14150</td> </tr> <tr> <td>Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)</td> <td>15860</td> <td>15500</td> <td>15424</td> </tr> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <td><b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b></td> <td colspan="3"><b>15594</b></td> </tr> <tr> <td>Flujo (mm) (Individual)</td> <td>2,66</td> <td>2,65</td> <td>2,69</td> </tr> <tr style="background-color: #ff0000; color: white;"> <td><b>FLUJO (mm) (Promedio)</b></td> <td colspan="3"><b>2,67</b></td> </tr> </tbody> </table>					No de MUESTRA	3,10	3,11	3,12	Temperatura de mezcla (°C)	155,4	155,2	154,8	Temperatura de compactación (°C)	140,2	140,0	140,2	Temperatura del ensayo (°C)	60,4	60,0	60,0	Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,351	2,344	2,353	<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,349</b>			Altura de la probeta (mm)	59,60	62,83	60,25	Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	14550	15500	14150	Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	15860	15500	15424	<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>15594</b>			Flujo (mm) (Individual)	2,66	2,65	2,69	<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,67</b>		
No de MUESTRA	3,10	3,11	3,12																																																	
Temperatura de mezcla (°C)	155,4	155,2	154,8																																																	
Temperatura de compactación (°C)	140,2	140,0	140,2																																																	
Temperatura del ensayo (°C)	60,4	60,0	60,0																																																	
Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,351	2,344	2,353																																																	
<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,349</b>																																																			
Altura de la probeta (mm)	59,60	62,83	60,25																																																	
Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	14550	15500	14150																																																	
Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	15860	15500	15424																																																	
<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>15594</b>																																																			
Flujo (mm) (Individual)	2,66	2,65	2,69																																																	
<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,67</b>																																																			
Observaciones: N/A																																																				
Nota: N/A																																																				
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma		Fecha																																																
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA				Año																																																
				Mes																																																
				Día																																																
				2016																																																
				2																																																
				24																																																

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 748 - 13 -																																																			
	ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL																																																			
				Fecha de elaboración: 23 de Febrero de 2016																																																
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																				
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																																																		
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 4 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 15%)																																																				
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 4. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 15%)																																																		
Especificación a utilizar:		INV E 450-13																																																		
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th style="text-align: center;">No de MUESTRA</th> <th style="text-align: center;">4,10</th> <th style="text-align: center;">4,11</th> <th style="text-align: center;">4,12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura de mezcla (°C)</td> <td style="text-align: center;">140,2</td> <td style="text-align: center;">139,6</td> <td style="text-align: center;">139,8</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura de compactación (°C)</td> <td style="text-align: center;">130,0</td> <td style="text-align: center;">128,6</td> <td style="text-align: center;">128,8</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Temperatura del ensayo (°C)</td> <td style="text-align: center;">60,0</td> <td style="text-align: center;">60,4</td> <td style="text-align: center;">60,4</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Gravedad Específica Bulk a 25°C</td> <td style="text-align: center;">2,339</td> <td style="text-align: center;">2,348</td> <td style="text-align: center;">2,348</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>2,345</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Altura de la probeta (mm)</td> <td style="text-align: center;">63,59</td> <td style="text-align: center;">60,48</td> <td style="text-align: center;">61,50</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">10150</td> <td style="text-align: center;">9850</td> <td style="text-align: center;">10050</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">10150</td> <td style="text-align: center;">10737</td> <td style="text-align: center;">10452</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>10446</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Flujo (mm) (Individual)</td> <td style="text-align: center;">2,64</td> <td style="text-align: center;">2,62</td> <td style="text-align: center;">2,65</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>FLUJO (mm) (Promedio)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;"><b>2,64</b></td> </tr> </tbody> </table>					No de MUESTRA	4,10	4,11	4,12	Temperatura de mezcla (°C)	140,2	139,6	139,8	Temperatura de compactación (°C)	130,0	128,6	128,8	Temperatura del ensayo (°C)	60,0	60,4	60,4	Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,339	2,348	2,348	<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,345</b>			Altura de la probeta (mm)	63,59	60,48	61,50	Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	10150	9850	10050	Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	10150	10737	10452	<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>10446</b>			Flujo (mm) (Individual)	2,64	2,62	2,65	<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,64</b>		
No de MUESTRA	4,10	4,11	4,12																																																	
Temperatura de mezcla (°C)	140,2	139,6	139,8																																																	
Temperatura de compactación (°C)	130,0	128,6	128,8																																																	
Temperatura del ensayo (°C)	60,0	60,4	60,4																																																	
Gravedad Específica Bulk a 25°C	2,339	2,348	2,348																																																	
<b>Gmb (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	<b>2,345</b>																																																			
Altura de la probeta (mm)	63,59	60,48	61,50																																																	
Estabilidad Marshall medida (N) (Individual)	10150	9850	10050																																																	
Estabilidad Marshall corregida (N) (Individual)	10150	10737	10452																																																	
<b>ESTABILIDAD MARSHALL CORREGIDA (N) (Promedio)</b>	<b>10446</b>																																																			
Flujo (mm) (Individual)	2,64	2,62	2,65																																																	
<b>FLUJO (mm) (Promedio)</b>	<b>2,64</b>																																																			
Observaciones: N/A																																																				
Nota: N/A																																																				
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo:		Firma		Fecha																																																
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA				Año																																																
				Mes																																																
				Día																																																
				2016																																																
				2																																																
				24																																																

Anexo 13 – Susceptibilidad al agua

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 725 - 13 -									
	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA									
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.			Fecha de elaboración: 15 de Abril de 2016							
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana			Documento de identificación: 2.231.390							
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 1 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 0%)										
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 1. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo y asfalto envejecido de RAP)								
Especificación a utilizar: INV E			450-13							
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>										
<b>Método de compactación:</b>										
		Marshall	Esfuerzo:							
<b>Subgrupos</b>		<b>Subgrupo II</b>		<b>Subgrupo I</b>						
		<b>Grupo Humedo</b>			<b>Grupo Seco</b>					
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Prom</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Prom</b>	
<b>Diámetro</b>	mm(pg) D	101,58	101,25	101,39	101,4	101,05	101,32	101,51	101,3	
<b>Altura</b>	mm(pg) T	66,0	64,8	65,8	65,5	68,1	70,6	68,6	69,1	
<b>Masa seca al aire</b>	A	958,7	958,9	961,7	959,8	964,0	967,7	976,2	969,3	
<b>Masa SSS</b>	B	961,3	961,5	963,3	962,0	965,5	968,9	977,1	970,5	
<b>Masa en el agua</b>	C	541,5	542,1	544,0	542,5	540,0	550,0	550,0	546,7	
<b>Volumen (cm³)</b>	(B-C) E	419,8	419,4	419,3	419,5	425,5	418,9	427,1	423,8	
<b>Gravedad específica Bulk</b>	(A/E) F	2,28	2,29	2,29	2,29	2,27	2,31	2,29	2,29	
<b>Gravedad específica máxima</b>	G	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	
<b>%vacíos con aire</b>	(100(G-F)/G) H	7,17	7,06	6,76	7,00	7,90	6,09	7,09	7,03	
<b>Volumen de vacíos con aire</b>	(HE/100) I	30,08	29,60	28,37	29,35	33,63	25,53	30,27	29,81	
<b>Carga</b>	N (bf) P					11648,87	11543,14	11944,01		
<b>Saturación durante 5 minutos por vacío a 70 kPa, 525 mm Hg (pg)</b>										
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Prom</b>					
<b>Masa SSS</b>	B'	977,6	977,0	980,7	978,5					
<b>Masa en el agua</b>	C'	551,8	551,7	554,3	552,6					
<b>Volumen (cm³)</b>	(B'-C') E'	425,9	425,2	426,4	425,8					
<b>Volumen absoluto de agua</b>	(B'-A) J'	18,94	18,08	19,04	18,7					
<b>% Saturación</b>	(100J'/I) H'	62,96	61,07	67,11						
<b>% Expansión</b>	(100(E'-E)/E) I'	1,44	1,39	1,69						
<b>Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C</b>										
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Prom</b>					
<b>Altura</b>	mm(pg) t''	67,89	66,47	67,58	67,3					
<b>Masa SSS</b>	B''	986,4	985,3	988,8	986,8					
<b>Masa en el agua</b>	C''	556,5	556,1	558,9	557,1					
<b>Volumen</b>	(B''-C'') E''	430,0	429,2	429,9	429,7					
<b>Volumen absoluto de agua</b>	(B''-A) J''	27,74	26,38	27,08	27,1					
<b>% Saturación</b>	(100J''/I) H''	92,21	89,13	95,46						
<b>% Expansión</b>	(100(E''-E)/E) I''	1,84	1,78	1,91						
<b>Carga</b>	N (bf) P''	9410,87	9355,77	9707,13						
<b>Resistencia seca 2000P/ntD</b>	(2P' / n t' D) R <sub>TS</sub>	1,08	1,03	1,09						
<b>Resistencia húmeda 2000P''/nt''D</b>	(2P'' / n t'' D) R <sub>TH</sub>	0,87	0,88	0,90						
<b>RRT</b>	100 (R <sub>TH</sub> /R <sub>TS</sub> )	80,58	86,16	82,58						
<b>Daño por humedad</b>	Visual	N/R	N/R	N/R						
<b>Agregados fracturados</b>	N (bf)	N/R	N/R	N/R						
Observación N/A										
Nota: N/A										
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA					Firma		Fecha			
							Año	Mes	Día	
							2016	4	22	

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA		NORMA DE ENSAYO: -INV E - 725 - 13 -							
		EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA							
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.			Fecha de elaboración:		15 de Abril de 2016				
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana			Documento de identificación:		2.231.390				
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 2 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 5%)									
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 2. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 5%)							
Especificación a utilizar:			INV E	450-13					
INFORME DE RESULTADOS									
Método de compactación:		Marshal		Esfuerzo:					
Subgrupos		Subgrupo II			Subgrupo I				
Especímenes		Grupo Humedo			Grupo Seco				
		1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
Diámetro	mm(pg) D	101,00	100,80	101,50	101,1	101,50	101,40	101,10	101,3
Altura	mm(pg) T	68,6	66,0	68,6	67,7	68,1	70,6	68,6	69,1
Masa seca al aire	A	957,0	966,4	972,9	965,4	962,2	961,2	965,2	962,9
Masa SSS	B	958,2	967,7	974,9	966,9	963,8	962,3	966,6	964,2
Masa en el agua	C	537,0	541,0	545,0	541,0	545,0	538,0	540,0	541,0
Volumen (cm³)	(B-C) E	421,2	426,7	429,9	425,9	418,8	424,3	426,6	423,2
Gravedad específica Bulk	(A/E) F	2,27	2,26	2,26	2,27	2,30	2,27	2,26	2,28
Gravedad específica máxima	G	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
%vacíos con aire	(100(G-F)/G) H	7,26	7,56	7,63	7,48	6,22	7,54	7,65	7,14
Volumen de vacíos con aire	(HE/100) I	30,59	32,25	32,80	31,88	26,07	31,97	32,64	30,23
Carga	N (lbf) P					4868,22	5292,94	5152,38	
Saturación durante 5 minutos por vacío a 70 kPa, 525 mm Hg (pg)									
Especímenes		1	2	3	Prom				
Masa SSS	B'	974,5	983,3	992,5	983,4				
Masa en el agua	C'	547,2	550,6	555,4	551,1				
Volumen (cm³)	(B'-C')	427,3	432,7	437,2	432,4				
Volumen absoluto de agua	(B'-A)	17,49	16,88	19,65	18,0				
% Saturación	(100J'/I)	57,18	52,34	59,90					
% Expansión	(100(E'-E)/E)	1,45	1,39	1,70					
Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C									
Especímenes		1	2	3	Prom				
Altura	mm(pg) L''	70,50	67,78	70,45	69,6				
Masa SSS	B''	983,3	991,6	1000,7	991,9				
Masa en el agua	C''	551,9	554,9	559,9	555,6				
Volumen	(B''-C'')	431,4	436,7	440,8	436,3				
Volumen absoluto de agua	(B''-A)	26,26	25,24	27,78	26,4				
% Saturación	(100J''/I)	85,85	78,25	84,71					
% Expansión	(100(E''-E)/E)	1,87	1,82	1,96					
Carga	N (lbf) P''	4143,47	4103,93	4358,37					
Resistencia seca 2000P/πtD	(2P''/n t D) R <sub>TS</sub>	0,45	0,47	0,47					
Resistencia húmeda 2000P''/π t''D	(2P''/n t'' D) R <sub>TH</sub>	0,37	0,38	0,39					
RRT	100 (R <sub>TH</sub> /R <sub>TS</sub> )	82,59	81,26	82,03					
Daño por humedad	Visual	N/R	N/R	N/R					
Agregados fracturados	N (lbf)	N/R	N/R	N/R					
Observación N/A									
Nota: N/A									
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo: PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA			Firma		Fecha				
					Año	Mes	Día		
					2016	4	22		

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 725 - 13 -											
	EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA											
Nombre del proveedor: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.			Fecha de elaboración: 15 de Abril de 2016									
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390										
Descripción de la muestra: Briquetas Mezcla No 3 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 10%)												
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 3. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 10%)										
Especificación a utilizar: INV E		450-13										
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>												
<b>Método de compactación:</b>												
		Marshal										
		Esfuerzo:										
<b>Subgrupos</b>		<b>Subgrupo II</b>		<b>Subgrupo I</b>								
		<b>Grupo Humedo</b>		<b>Grupo Seco</b>								
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>		<b>2</b>								
		<b>3</b>		<b>Prom</b>								
<b>Diámetro</b>		mm(pg)		D								
		101,20		101,50								
		101,10		101,3								
<b>Altura</b>		mm(pg)		T								
		68,8		68,4								
		68,1		68,4								
<b>Masa seca al aire</b>		A		969,6								
		962,7		963,9								
		965,4		973,8								
<b>Masa SSS</b>		B		971,2								
		964,8		965,5								
		967,2		975,0								
<b>Masa en el agua</b>		C		539,0								
		539,0		538,0								
		538,7		545,0								
<b>Volumen (cm³)</b>		(B-C)		E								
		432,2		425,8								
		427,5		428,5								
<b>Gravedad específica Bulk</b>		(A/E)		F								
		2,24		2,26								
		2,25		2,25								
<b>Gravedad específica máxima</b>		G		2,43								
		2,43		2,43								
		2,43		2,43								
<b>%vacíos con aire</b>		(100(G-F)/G)		H								
		7,68		6,96								
		7,21		7,28								
<b>Volumen de vacíos con aire</b>		(HE/100)		I								
		33,19		29,63								
		30,83		31,22								
<b>Carga</b>		N (lbf)		P								
				2986,82								
				2950,22								
				2976,97								
<b>Saturación durante 5 minutos por vacío a 70 kPa, 525 mm Hg (pg)</b>												
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>		<b>2</b>								
		<b>3</b>		<b>Prom</b>								
<b>Masa SSS</b>		B'		987,7								
		980,3		983,0								
<b>Masa en el agua</b>		C'		549,2								
		548,6		548,2								
<b>Volumen (cm³)</b>		(B'-C')		E'								
		438,5		431,7								
		434,8		435,0								
<b>Volumen absoluto de agua</b>		(B'-A)		J'								
		18,11		17,63								
		19,08		18,3								
<b>% Saturación</b>		(100J'/I)		54,57								
		59,52		61,87								
<b>% Expansión</b>		(100(E'-E)/E)		1,45								
		1,39		1,70								
<b>Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C</b>												
<b>Especímenes</b>		<b>1</b>		<b>2</b>								
		<b>3</b>		<b>Prom</b>								
<b>Altura</b>		mm(pg)		L''								
		70,73		70,20								
		69,95		70,3								
<b>Masa SSS</b>		B''		996,6								
		988,7		991,0								
		992,1		992,1								
<b>Masa en el agua</b>		C''		553,9								
		552,9		552,7								
		553,2		553,2								
<b>Volumen</b>		(B''-C'')		E''								
		442,7		435,8								
		438,3		438,9								
<b>Volumen absoluto de agua</b>		(B''-A)		J''								
		27,00		25,97								
		27,14		26,7								
<b>% Saturación</b>		(100J''/I)		81,35								
		87,64		88,01								
<b>% Expansión</b>		(100(E''-E)/E)		1,91								
		1,82		1,97								
<b>Carga</b>		N (lbf)		P''								
		2424,89		2360,72								
		2366,86										
<b>Resistencia seca 2000P/πtD</b>		(2P / n t D)		RTs								
		0,27		0,27								
		0,27		0,27								
<b>Resistencia húmeda 2000P''/π t''D</b>		(2P'' / n t'' D)		RTh								
		0,22		0,21								
		0,21		0,21								
<b>RRT</b>		100 (RTh/RTs)		79,08								
		78,04		78,39								
<b>Daño por humedad</b>		Visual		N/R								
		N/R		N/R								
<b>Agregados fracturados</b>		N (lbf)		N/R								
		N/R		N/R								
Observación N/A												
Nota: N/A												
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo:		Firma										
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA												
		<table border="1"> <tr> <th colspan="3">Fecha</th> </tr> <tr> <th>Año</th> <th>Mes</th> <th>Día</th> </tr> <tr> <td>2016</td> <td>4</td> <td>22</td> </tr> </table>		Fecha			Año	Mes	Día	2016	4	22
Fecha												
Año	Mes	Día										
2016	4	22										

NORMA DE ENSAYO: -INV E - 725 - 13 -		ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAYITO								
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA		EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA								
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.		Fecha de elaboración: 15 de Abril de 2016								
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390								
Descripción de la muestra: Briqueetas Mezcla No 4 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 15%)										
Tipo de muestra: Muestra elaborada en el laboratorio		Naturaleza de la mezcla asfáltica: Mezcla No 4. (Agregado vírgenes y agregados de RAP), (asfalto nuevo, asfalto envejecido de RAP y aceite quemado 15%)								
Especificación a utilizar:		INV E 450-13								
INFORME DE RESULTADOS										
Método de compactación:			Marshall		Esfuerzo:					
Subgrupos			Subgrupo II				Subgrupo I			
Especímenes			Grupo Humedo				Grupo Seco			
			1	2	3	Prom	1	2	3	Prom
Diámetro	mm(pg)	D	100,90	101,30	101,20	101,1	101,30	101,80	101,60	101,6
Altura	mm(pg)	T	68,9	69,0	68,8	68,9	68,4	68,1	68,5	68,3
Masa seca al aire		A	936,8	960,3	962,9	953,3	978,5	965,1	959,7	967,8
Masa SSS		B	938,7	963,5	964,6	955,6	980,4	966,9	961,4	969,6
Masa en el agua		C	524,0	538,0	539,0	533,7	543,0	537,0	535,0	538,3
Volumen (cm³)	(B-C)	E	414,7	425,5	425,6	421,9	437,4	429,9	426,4	431,2
Gravedad específica Bulk	(A/E)	F	2,26	2,26	2,26	2,26	2,24	2,24	2,25	2,24
Gravedad específica máxima		G	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42
%vacios con aire	(100(G-F)/G)	H	6,65	6,74	6,51	6,63	7,56	7,23	7,00	7,27
Volumen de vacios con aire	(HE/100)	I	27,59	28,68	27,71	27,99	33,06	31,10	29,83	31,33
Carga	N (lbf)	P					1652,74	1639,84	1603,58	
Saturación durante 5 minutos por vacio a 70 kPa, 525 mm Hg (pg)										
Especímenes			1	2	3	Prom				
Masa SSS		B'	954,7	979,0	982,1	971,9				
Masa en el agua		C'	534,0	547,6	549,2	543,6				
Volumen (cm³)	(B'-C')	E'	420,7	431,4	432,8	428,3				
Volumen absoluto de agua	(B'-A)	J'	17,86	18,71	19,16	18,6				
% Saturación	(100J'/I)		64,72	65,24	69,15					
% Expansión	(100(E'-E)/E)		1,45	1,40	1,70					
Acondicionamiento durante 24 h en agua a 60°C										
Especímenes			1	2	3	Prom				
Altura	mm(pg)	t''	70,83	70,81	70,67	70,8				
Masa SSS		B''	963,2	987,3	990,1	980,2				
Masa en el agua		C''	538,5	551,8	553,7	548,0				
Volumen	(B''-C'')	E''	424,8	435,5	436,4	432,2				
Volumen absoluto de agua	(B''-A)	J''	26,45	27,03	27,21	26,9				
% Saturación	(100J''/I)		95,86	94,25	98,21					
% Expansión	(100(E''-E)/E)		1,88	1,82	1,96					
Carga	N (lbf)	P''	1256,22	1272,03	1208,39					
Resistencia seca 2000P/πD	(2P/ n t D)	R <sub>TS</sub>	0,15	0,15	0,15					
Resistencia húmeda 2000P''/π t''D	(2P''/ n t'' D)	R <sub>TH</sub>	0,11	0,11	0,11					
RRT	100 (R <sub>TH</sub> /R <sub>TS</sub> )		73,69	74,97	73,33					
Daño por humedad	Visual		N/R	N/R	N/R					
Agregados fracturados	N (lbf)		N/R	N/R	N/R					
Observación: N/A										
Nota: N/A										
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo : PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA						Firma		Fecha		
								Año	Mes	Día
								2016	4	22

Anexo 14 – Valores encontrados de módulo resiliente para las cuatro mezclas de RAP con inclusión de WEO

WEO 0%			
Frecuencia	Temperatura grados Celsius		
	10	20	30
2,5	11.386	5.508	2.262
5	13.562	7.265	3.620
10	15.404	9.209	4.796

WEO 5%			
Frecuencia	Temperatura grados Celsius		
	10	20	30
2,5	6.530	3.135	1.211
5	7.896	4.007	1.931
10	9.513	5.386	2.936

WEO 10%			
Frecuencia	Temperatura grados Celsius		
	10	20	30
2,5	3.769	1.804	1.379
5	4.383	2.401	1.511
10	5.105	3.092	1.701

WEO 15%			
Frecuencia	Temperatura grados Celsius		
	10	20	30
2,5	1.122	345	110
5	2.131	566	192
10	3.147	799	298

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 733 - 13-																																																					
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS																																																					
Fecha de elaboración: 04 de Febrero de 2016																																																						
Nombre del proyecto: Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																						
Nombres y apellidos del autor del trabajo: Pedro Julián Gallego Quintana		Documento de identificación: 2.231.390																																																				
Descripción de la muestra: Biquetas Mezcla No 1 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 0%)																																																						
Procedencia: Especímenes elaborados en el laboratorio con Mezcla asfáltica con RAP y aceite quemado 0%.																																																						
Especificación a utilizar: INV E		450-13																																																				
REGISTRO DE DATOS																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th>No de MUESTRA</th> <th>1,7</th> <th>1,8</th> <th>1,9</th> <th>#</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A= Masa en el aire del espécimen seco (g)</td> <td style="text-align: center;">959,8</td> <td style="text-align: center;">959,3</td> <td style="text-align: center;">965,7</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr> <td>B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SES (g)</td> <td style="text-align: center;">961,1</td> <td style="text-align: center;">960,5</td> <td style="text-align: center;">966,9</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr> <td>C= Masa del espécimen en agua (g)</td> <td style="text-align: center;">549,0</td> <td style="text-align: center;">552,0</td> <td style="text-align: center;">555,0</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica bulk <math>= \frac{A}{B - C}</math></td> <td style="text-align: center;">2,329</td> <td style="text-align: center;">2,348</td> <td style="text-align: center;">2,345</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">2,341</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0</td> <td style="text-align: center;">2322,06</td> <td style="text-align: center;">2341,30</td> <td style="text-align: center;">2337,47</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>DENSIDAD A 25°C (Kg/ m³)</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">2333,61</td> <td></td> </tr> <tr> <td>% de agua absorbida por volumen= <math>\frac{B - A}{B - C} \times 100</math></td> <td style="text-align: center;">0,32%</td> <td style="text-align: center;">0,29%</td> <td style="text-align: center;">0,29%</td> <td style="text-align: center;">*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b></td> <td colspan="3" style="text-align: center;">0,30%</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					No de MUESTRA	1,7	1,8	1,9	#	A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	959,8	959,3	965,7	*	B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SES (g)	961,1	960,5	966,9	*	C= Masa del espécimen en agua (g)	549,0	552,0	555,0	*	Gravedad específica bulk $= \frac{A}{B - C}$	2,329	2,348	2,345	*	<b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	2,341				Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2322,06	2341,30	2337,47	*	<b>DENSIDAD A 25°C (Kg/ m³)</b>	2333,61				% de agua absorbida por volumen= $\frac{B - A}{B - C} \times 100$	0,32%	0,29%	0,29%	*	<b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b>	0,30%			
No de MUESTRA	1,7	1,8	1,9	#																																																		
A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	959,8	959,3	965,7	*																																																		
B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SES (g)	961,1	960,5	966,9	*																																																		
C= Masa del espécimen en agua (g)	549,0	552,0	555,0	*																																																		
Gravedad específica bulk $= \frac{A}{B - C}$	2,329	2,348	2,345	*																																																		
<b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	2,341																																																					
Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2322,06	2341,30	2337,47	*																																																		
<b>DENSIDAD A 25°C (Kg/ m³)</b>	2333,61																																																					
% de agua absorbida por volumen= $\frac{B - A}{B - C} \times 100$	0,32%	0,29%	0,29%	*																																																		
<b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b>	0,30%																																																					
Observaciones: Biquetas elaboradas para ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E - 749 -13)																																																						
Nota: Tipo de mezcla (MDG 19)																																																						
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma		Fecha																																																		
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA				Año																																																		
				Mes																																																		
				Día																																																		
				2016																																																		
				2																																																		
				5																																																		

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 733 - 13 -																																																					
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS																																																					
				<b>Fecha de elaboración:</b> 04 de Febrero de 2016																																																		
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.																																																						
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Galego Quintana			<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390																																																			
<b>Descripción de la muestra:</b> Briquetas Mezcla No 2 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 5%)																																																						
<b>Procedencia:</b> Especímenes elaborados en el laboratorio con Mezcla asfáltica con RAP y aceite quemado 5%.																																																						
			<b>Especificación a utilizar:</b> INV E	450-13																																																		
<b>REGISTRO DE DATOS</b>																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr style="background-color: red; color: white;"> <th><i>No de MUESTRA</i></th> <th><i>2,7</i></th> <th><i>2,8</i></th> <th><i>2,9</i></th> <th><i>*</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A= Masa en el aire del espécimen seco (g)</td> <td>955,4</td> <td>965,8</td> <td>958,5</td> <td>*</td> </tr> <tr> <td>B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SSS (g)</td> <td>955,8</td> <td>966,4</td> <td>959,2</td> <td>*</td> </tr> <tr> <td>C= Masa del espécimen en agua (g)</td> <td>548,5</td> <td>555,5</td> <td>554,0</td> <td>*</td> </tr> <tr> <td>Gravedad específica bulk - <math>\frac{A}{B-C}</math></td> <td>2,346</td> <td>2,350</td> <td>2,365</td> <td>*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b></td> <td colspan="3">2,354</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0</td> <td>2338,65</td> <td>2343,40</td> <td>2358,40</td> <td>*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>DENSIDAD A 25°C (Kg / m<sup>3</sup>)</b></td> <td colspan="3">2346,82</td> <td></td> </tr> <tr> <td>% de agua absorbida por volumen= <math>\frac{B-A}{B-C} \times 100</math></td> <td>0,10%</td> <td>0,15%</td> <td>0,17%</td> <td>*</td> </tr> <tr style="background-color: red; color: white;"> <td><b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b></td> <td colspan="3">0,14%</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>					<i>No de MUESTRA</i>	<i>2,7</i>	<i>2,8</i>	<i>2,9</i>	<i>*</i>	A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	955,4	965,8	958,5	*	B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SSS (g)	955,8	966,4	959,2	*	C= Masa del espécimen en agua (g)	548,5	555,5	554,0	*	Gravedad específica bulk - $\frac{A}{B-C}$	2,346	2,350	2,365	*	<b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	2,354				Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2338,65	2343,40	2358,40	*	<b>DENSIDAD A 25°C (Kg / m<sup>3</sup>)</b>	2346,82				% de agua absorbida por volumen= $\frac{B-A}{B-C} \times 100$	0,10%	0,15%	0,17%	*	<b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b>	0,14%			
<i>No de MUESTRA</i>	<i>2,7</i>	<i>2,8</i>	<i>2,9</i>	<i>*</i>																																																		
A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	955,4	965,8	958,5	*																																																		
B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SSS (g)	955,8	966,4	959,2	*																																																		
C= Masa del espécimen en agua (g)	548,5	555,5	554,0	*																																																		
Gravedad específica bulk - $\frac{A}{B-C}$	2,346	2,350	2,365	*																																																		
<b>G<sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)</b>	2,354																																																					
Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2338,65	2343,40	2358,40	*																																																		
<b>DENSIDAD A 25°C (Kg / m<sup>3</sup>)</b>	2346,82																																																					
% de agua absorbida por volumen= $\frac{B-A}{B-C} \times 100$	0,10%	0,15%	0,17%	*																																																		
<b>ABSORCIÓN DE AGUA %</b>	0,14%																																																					
<b>Observaciones:</b> Briquetas elaboradas para ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E – 749 -13)																																																						
<b>Nota:</b> Tipo de mezcla (MDC-19)																																																						
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :			Firma																																																			
<b>PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA</b>			<b>Fecha</b>																																																			
			Año	Mes	Día																																																	
			2016	2	5																																																	

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 733 - 13 -			
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS			
				<b>Fecha de elaboración:</b> 10 de Febrero de 2016
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.				
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Galego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390		
<b>Descripción de la muestra:</b> Briquetas Mezcla No 3 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 10%)				
<b>Procedencia:</b> Especímenes elaborados en el laboratorio con Mezcla asfáltica con RAP y aceite quemado 10%.				
		<b>Especificación a utilizar:</b>	INV E	450-13
REGISTRO DE DATOS				
No de MUESTRA	3,7	3,8	3,9	*
A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	933,8	958,9	941,8	*
B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SSS (g)	934,3	959,3	942,3	*
C= Masa del espécimen en agua (g)	538,0	550,5	542,0	*
Gravedad específica bulk $\frac{A}{B-C}$	2,356	2,346	2,353	*
G <sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)	2,352			
Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2349,23	2338,61	2345,68	*
DENSIDAD A 25°C (Kg/m³)	2344,50			
% de agua absorbida por volumen= $\frac{B-A}{H-C} \times 100$	0,13%	0,10%	0,12%	*
ABSORCIÓN DE AGUA %	0,12%			
<b>Observaciones:</b> Briquetas elaboradas para ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E – 749 -13)				
<b>Nota:</b> Tipo de mezcla (MDC-19)				
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma		<b>Fecha</b>
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA				<b>Año</b>
				<b>Mes</b>
		<b>Día</b>	2016	2
			11	

PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA	NORMA DE ENSAYO: -INV E - 733 - 13 -			
	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS			
				<b>Fecha de elaboración:</b> 10 de Febrero de 2016
<b>Nombre del proyecto:</b> Efecto del aceite quemado de motor sobre las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas que contienen RAP.				
<b>Nombres y apellidos del autor del trabajo:</b> Pedro Julián Galego Quintana		<b>Documento de identificación:</b> 2.231.390		
<b>Descripción de la muestra:</b> Briquetas Mezcla No 4 (mezclas asfáltica con RAP y aceite quemado 15%)				
<b>Procedencia:</b> Especímenes elaborados en el laboratorio con Mezcla asfáltica con RAP y aceite quemado 15%.				
		<b>Especificación a utilizar:</b>	INV E	450-13
REGISTRO DE DATOS				
No de MUESTRA	4,7	4,8	4,9	*
A= Masa en el aire del espécimen seco (g)	869,8	963,9	917,0	*
B= Masa en el aire del espécimen saturado y superficialmente seco - SSS (g)	870,1	964,3	917,4	*
C= Masa del espécimen en agua (g)	500,0	554,0	526,0	*
Gravedad específica bulk $\frac{A}{B-C}$	2,350	2,349	2,343	*
G <sub>mb</sub> (GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK A 25°C)	2,347			
Densidad de la mezcla= gravedad especif bulk * 997.0	2343,13	2342,21	2335,84	*
DENSIDAD A 25°C (Kg/m³)	2340,39			
% de agua absorbida por volumen= $\frac{B-A}{H-C} \times 100$	0,08%	0,10%	0,10%	*
ABSORCIÓN DE AGUA %	0,09%			
<b>Observaciones:</b> Briquetas elaboradas para ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (INV E – 749 -13)				
<b>Nota:</b> Tipo de mezcla (MDC-19)				
Nombre y apellidos de quien elabora el ensayo :		Firma		<b>Fecha</b>
PEDRO JULIAN GALLEGO QUINTANA				<b>Año</b>
				<b>Mes</b>
				2016
				2
				11

**Factores inter-sujetos**

		N
MEZCLA	1	9
	2	9
	3	9
	4	9
TemperaturaC	10,00	12
	20,00	12
	30,00	12

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Modulo\_psm

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	478203807 <sup>a</sup>	11	43473073,34	33,582	,000
Intersección	614073180,3	1	614073180,3	474,365	,000
MEZCLA	254069676,1	3	84689892,03	65,422	,000
TemperaturaC	165922891,2	2	82961445,58	64,087	,000
MEZCLA * TemperaturaC	58211239,50	6	9701873,250	7,495	,000
Error	31068382,00	24	1294515,917		
Total	1123345369	36			
Total corregido	509272188,8	35			

a. R al cuadrado = ,939 (R al cuadrado ajustada = ,911)

**Comparaciones múltiples**

Variable dependiente: Modulo\_psm

	(I) MEZCLA	(J) MEZCLA	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	1	2	3384,78 <sup>*</sup>	536,349	,000	1905,20	4864,35
		3	5401,33 <sup>*</sup>	536,349	,000	3921,76	6880,91
		4	7144,67 <sup>*</sup>	536,349	,000	5665,09	8624,24
	2	1	-3384,78 <sup>*</sup>	536,349	,000	-4864,35	-1905,20
		3	2016,56 <sup>*</sup>	536,349	,005	536,98	3496,13
		4	3759,89 <sup>*</sup>	536,349	,000	2280,31	5239,47
	3	1	-5401,33 <sup>*</sup>	536,349	,000	-6880,91	-3921,76
		2	-2016,56 <sup>*</sup>	536,349	,005	-3496,13	-536,98
		4	1743,33 <sup>*</sup>	536,349	,017	263,76	3222,91
	4	1	-7144,67 <sup>*</sup>	536,349	,000	-8624,24	-5665,09
		2	-3759,89 <sup>*</sup>	536,349	,000	-5239,47	-2280,31
		3	-1743,33 <sup>*</sup>	536,349	,017	-3222,91	-263,76

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 1294515,917.

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

**Modulo\_psm**

MEZCLA	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	4	968,11			
	3		2711,44		
	2			4728,00	
	1				8112,78
	Sig.		1,000	1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>	4	968,11			
	3		2711,44		
	2			4728,00	
	1				8112,78
	Sig.		1,000	1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 1294515,917.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 9,000.

b. Alfa = 0,05.

### Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Modulo\_psm

	(I) TemperaturaC	(J) TemperaturaC	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
						Límite inferior	Límite superior
HSD Tukey	10,00	20,00	3431,58*	464,492	,000	2271,61	4591,55
		30,00	5166,67*	464,492	,000	4006,70	6326,64
	20,00	10,00	-3431,58*	464,492	,000	-4591,55	-2271,61
		30,00	1735,08*	464,492	,003	575,11	2895,05
	30,00	10,00	-5166,67*	464,492	,000	-6326,64	-4006,70
		20,00	-1735,08*	464,492	,003	-2895,05	-575,11

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 1294515,917.

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0,05.

### Modulo\_psm

TemperaturaC	N	Subconjunto		
		1	2	3
HSD Tukey <sup>a,b</sup>	30,00	12	1829,50	
	20,00	12		3564,58
	10,00	12		6996,17
	Sig.		1,000	1,000
Duncan <sup>a,b</sup>	30,00	12	1829,50	
	20,00	12		3564,58
	10,00	12		6996,17
	Sig.		1,000	1,000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

Se basa en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 1294515,917.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 12,000.

b. Alfa = 0,05.

**Pruebas de efectos inter-sujetos**

Variable dependiente: Modulo\_psm

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	189810574 <sup>a</sup>	8	23726321,69	2,005	,084
Intersección	614073180,3	1	614073180,3	51,900	,000
X	189810573,5	8	23726321,69	2,005	,084
Error	319461615,3	27	11831911,68		
Total	1123345369	36			
Total corregido	509272188,8	35			

a. R al cuadrado = ,373 (R al cuadrado ajustada = ,187)

PARA LA MEZCLA CON 0%. DE INCLUSION.

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
,980	,961	,955	,136

La variable independiente es x.

**ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	3,152	1	3,152	171,372	,000
Residuo	,129	7	,018		
Total	3,281	8			

La variable independiente es x.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
	B	Error estándar	Beta		
x	,240	,018	,980	13,091	,000
(Constante)	4598,099	251,422		18,288	,000

La variable dependiente es ln(Modulo\_psm\_0).

PARA LAS MEZCLAS CON 5% DE INCLUSION.

### Resumen del modelo

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
,975	,951	,944	,160

La variable independiente es x.

### ANOVA

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	3,471	1	3,471	135,242	,000
Residuo	,180	7	,026		
Total	3,650	8			

La variable independiente es x.

### Coefficientes

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
	B	Error estándar	Beta		
x	,252	,022	,975	11,629	,000
(Constante)	2581,678	166,743		15,483	,000

La variable dependiente es ln(Modulo\_psm\_5).

PARA LAS MEZCLAS CON 10 % DE INCLUSION.

**Resumen del modelo**

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
,950	,902	,889	,169

La variable independiente es x.

**ANOVA**

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	1,858	1	1,858	64,765	,000
Residuo	,201	7	,029		
Total	2,059	8			

La variable independiente es x.

**Coefficientes**

	Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
	B	Error estándar	Beta		
x	,184	,023	,950	8,048	,000
(Constante)	1770,690	120,910		14,645	,000

La variable dependiente es ln(Modulo\_psm\_10).