

**Comparación del desempeño de mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando
materiales vírgenes y RAP**

Laura Beatriz Guarín Martínez, María Camila Segura Hernández

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Directora

Paalo Andrea Moreno Yañez

Dr. en Ingeniería Química

Coodirectores

Vladimir Plata Chávez

Dr. en Ingeniería Química

Victor Gabriel Baldovino Medrano

Dr. en Ingeniería Química

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2022

Agradecimientos

Primeramente, agradecemos a la universidad por brindarnos un espacio educativo en el que nos pudimos formar en los que tanto nos apasiona, le agradecemos a cada uno de los maestros que con mucha dedicación nos compartieron sus conocimientos y nos ayudaron a formarnos como grandes profesionales. Finalmente agradecemos muy especialmente a los directores de este trabajado de grado Paolo Andrea Moreno Yáñez y Vladimir Plata Chávez, pues su apoyo durante este proceso fue incondicional y siempre nos brindaron las herramientas necesarias para llevarlo a cabo.

Dedicatoria

El presente trabajo de grado está dedicado a nuestros padres Omar Guarín, Teresa Martínez, Jorge Segura y Concepción Hernández, por siempre creer en nosotras y hacer su mejor esfuerzo para brindarnos los medios que nos llevaron a alcanzar esta meta. Gracias a ellos nos convertimos no solo en grandes profesionales, sino aún más importante, en grandes profesionales llenas de principios éticos. Esta dedicatoria es una manera de atribuirles su amor llenándolos de gozo y orgullo al saber que logramos la meta y todo el esfuerzo y trabajo realizado para vernos convertidas en profesionales ha valido la pena. Les agradecemos profundamente ser siempre nuestros pilares más fuertes y esperamos que este trabajo les refleje la dedicación que hemos tenido por nuestra carrera. Con mucho amor, esto es para ustedes.

Contenido

Introducción	11
1. Comparación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Preparadas en Caliente Utilizando materiales vírgenes y RAP	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
2. Marco teórico	15
2.1 Cemento asfáltico.....	15
2.1.1 Definición	15
2.1.2 Envejecimiento del asfalto	16
2.2 Mezclas asfálticas.....	16
2.3 RAP	18
2.3.1 Ventajas y desventajas del uso de RAP.....	19
3. Metodología	19
3.1 Fase 1: Caracterización del desempeño físico, químico y reológico del asfalto proveniente del RAP	20
3.1.1 Actividad 1.1. Obtención y preparación de las muestras de RAP	20
3.1.2 Actividad 1.2. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos.....	20
3.1.3 Actividad 1.3. Destilación simple para separar el asfalto del solvente	21
3.1.3.4 Actividad 1.4. Penetración de materiales bituminosos.....	22
3.1.5 Actividad 1.5. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos	23

3.1.6 Actividad 1.6. Viscosidad dinámica	24
3.2 Fase 2: Análisis del desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP	25
3.2.1 Actividad 2.1. Análisis granulométrico de los agregados extraídos del RAP y definición de las mezclas asfálticas utilizadas	25
3.2.1 Actividad 2.2. Elaboración y medición de las probetas, y ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall	26
4. Resultados.....	28
4.1. Fase 1: Caracterización del desempeño físico, químico y reológico del asfalto proveniente del RAP	29
4.1.1 Actividad 1.1. Obtención y preparación de las muestras de RAP	29
4.1.2 Actividad 1.2: Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos.....	29
4.1.3 Actividad 1.3. Destilación simple para separar el asfalto del solvente	30
4.1.4 Actividad 1.4. Penetración de materiales bituminosos.....	31
4.1.5 Actividad 1.5. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos	32
4.1.6 Actividad 1.6. Viscosidad dinámica	33
4.2. Fase 2: Análisis del desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP	34
4.2.1 Actividad 2.1: Análisis granulométrico de los agregados extraídos de las mezclas asfálticas y definición de las mezclas asfálticas utilizadas.....	34
4.2.2 Actividad 2.2: Elaboración y medición de las probetas, y ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall	36
5. Conclusiones	40

Referencias.....	41
------------------	----

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua .</i>	18
Tabla 2. <i>Resultados de las extracciones del asfalto del RAP</i>	30
Tabla 3. <i>Penetración del asfalto virgen y envejecido</i>	31
Tabla 4. <i>Punto de ablandamiento del asfalto virgen y envejecido</i>	32
Tabla 5. <i>Viscosidad dinámica (T=150°C, shear rate: 34,3 1/s-1).....</i>	33
Tabla 6. <i>Resultados del ensayo Marshall en probetas vírgenes</i>	36
Tabla 8. <i>Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall.....</i>	37
Tabla 9. <i>Resultados del ensayo Marshall en probetas con 20% RAP y 80% materiales vírgenes</i>	38

Lista de figuras

Figura 1. <i>Protocolo de la extracción cuantitativa del asfalto</i>	21
Figura 2. <i>Protocolo de la determinación de material mineral</i>	21
Figura 3. <i>Protocolo del sistema de destilación simple</i>	22
Figura 4. <i>Protocolo del ensayo de penetración del asfalto</i>	23
Figura 6. <i>Protocolo del ensayo de punto de ablandamiento</i>	24
Figura 8. <i>Metodología fase 2</i>	25
Figura 9. <i>Protocolo del análisis granulométrico de los agregados extraídos del RAP</i>	26
Figura 10. <i>Protocolo para la elaboración de las probetas con RAP</i>	27
Figura 11. <i>Protocolo de ensayo de estabilidad y flujo</i>	28
Figura 12. <i>Proceso de disminución del tamaño de partícula inferior a una pulgada</i>	29
Figura 13. <i>Proceso de destilación del asfalto</i>	31
Figura 14. <i>Curva granulométrica del RAP</i>	34
Figura 15. <i>Curva granulométrica del proyecto</i>	35
Figura 16. <i>Estabilidad Vs Flujo</i>	39

Resumen

Los pavimentos están expuestos a condiciones ambientales y cargas vehiculares que causan que estos se envejeczan. Por la alta demanda de construcción de pavimentos y por la escasez de recursos, es necesario implementar materiales como el RAP (Recycled Asphalt Pavement). En este proyecto se realizó una comparación de las propiedades físicas y reológicas de una mezcla asfáltica 100% virgen y una con 20% de RAP. Para hacerlo, al asfalto se le realizaron los ensayos de punto de ablandamiento, penetración y viscosidad, y al pavimento el ensayo de Marshall. Estos indicaron que el envejecimiento causó un endurecimiento en el asfalto. El ensayo de Marshall arrojó buenos resultados, por lo que es posible usar mezclas asfálticas con un 20% de RAP.

Palabras Clave: asfalto, envejecimiento, RAP, ensayo de Marshall, penetración, punto de ablandamiento

Abstract

Pavements are exposed to environmental conditions and vehicle loads that cause them to age. Due to the high demand for pavement construction and the scarcity of resources, it is necessary to implement materials such as RAP (Recycled Asphalt Pavement). In this project, a comparison was made of the physical and rheological properties of a 100% virgin asphalt mix and one with 20% RAP. To do this, softening point, penetration and viscosity tests were performance to asphalt, and Marshall test was performance to pavement. These indicated that aging caused a hardening in the asphalt. The Marshall test yielded good results, so it is possible to use asphalt mixes with 20% RAP.

Keywords: asphalt, aging, RAP, Marshall's test, penetration, softening point

Introducción

Las vías son un factor clave para el desarrollo de cualquier país, por lo que tiene sentido que la industria de la pavimentación invierta millones de pesos en la construcción y rehabilitación de estas. El pavimento asfáltico está compuesto de grave gruesa, grava fina y asfalto, por lo que es de esperarse que la generación de este demande un gran consumo de materiales no renovables como el petróleo y, además, que genere una gran contaminación ambiental. A pesar de los recursos limitados con los que se cuentan hoy en día, las agencias viales usan alrededor de 110 millones de toneladas de ligante asfáltico anualmente en todo el mundo [1]. Por lo tanto, debido a los altos costos de rehabilitación, a la escasez de materias primas y al impacto ambiental causado por el uso de este material, numerosas investigaciones se han enfocado en el uso de un material reciclado y más sostenible que es conocido como RAP (Recycled Asphalt Paviment, por sus siglas en inglés) para la construcción de nuevas carreteras. Durante el tiempo que está en uso el pavimento, este está continuamente expuesto al aire caliente y la temperatura, lo que genera un cambio en sus propiedades físicas y reológicas [2]. Por lo mencionado anteriormente, se hace necesario realizar ensayos que permitan conocer el estado en el que se encuentran las propiedades de dicho material, y poder compararlo con un asfalto virgen, para que de esta manera se pueda determinar si es posible usarlo nuevamente en la construcción de pavimentos. De esta manera, en este proyecto de investigación se compararon dos mezclas asfálticas preparadas en caliente, la primera usando materiales vírgenes y la segunda usando un 80% de materiales vírgenes y un 20% de RAP provenientes de obras de rehabilitación vial del área metropolitana de Bucaramanga.

1. Comparación del Desempeño de Mezclas Asfálticas Preparadas en Caliente Utilizando materiales vírgenes y RAP

1.1 Planteamiento del problema

En un contexto de continuo desarrollo las vías son un factor muy importante para el progreso de un país, no obstante, la construcción y el mantenimiento de estas demandan un gran consumo de recursos naturales que a su vez causa un impacto ambiental negativo que trae repercusiones para toda la humanidad. La mayoría de las vías o carreteras se construyen usando asfalto y agregados que se constituyen como recursos naturales no renovables siendo el primero un derivado del petróleo. Ahora bien, es importante saber que en el año 1973 ocurrió un hecho que afectó directamente la industria de la construcción de pavimentos que fue la crisis del petróleo ya que durante esta época el costo del asfalto, así como la escasez de los agregados eran altos cerca de los sitios de construcción [3]. Esto llevó a que los investigadores se centrarán en el estudio del uso de materiales alternativos como el RAP para la construcción de nuevas carreteras.

Así mismo, es importante saber que las carreteras durante su vida útil sufren de un proceso conocido como envejecimiento, que causa que el asfalto pierda algunas de sus propiedades físicas y químicas. Debido a este envejecimiento, se realizan obras de rehabilitación las cuales consisten en retirar la capa superficial de pavimento (fresado), por lo que las agencias viales gastan millones de dólares cada año, de los cuales una parte significativa se destina a la adquisición de nuevos agregados naturales y asfalto [2]. Al mismo tiempo, este material fresado de las carreteras envejecidas es el RAP, y aunque numerosas investigaciones han estudiado la manera de implementarlo en nuevos pavimentos se debe tener en cuenta que este material reciclado no presenta las mismas propiedades mecánicas y reológicas que presentaba cuando era virgen, por lo

que se hace necesario realizar ensayos tanto al asfalto envejecido como al pavimento que permitan conocer el estado en el que se encuentra y así poder determinar si es posible usarlo en la construcción de nuevas carreteras. De esta manera, en esta investigación se pretende realizar una comparación de las propiedades físicas y reológicas de una mezcla asfáltica virgen y mezclas asfálticas preparadas utilizando RAP.

1.2 Justificación

La producción de nuevos pavimentos y la reparación de pavimentos viejos son dos actividades que requieren un uso excesivo de recursos naturales que a su vez llevan a que las agencias viales sean responsables de una gran parte de las emisiones de CO₂ que se producen actualmente [2]. Por esta razón, se hace necesaria la implementación de nuevos materiales que ayuden a reducir el uso de estos materiales que se están agotando. En esta investigación se propone la reutilización del pavimento que es fresado cuando se les realiza el mantenimiento a las carreteras existentes, ya que usualmente este es desechado generando mayor acumulación en las escombreras, y su transporte y localización producen aún más contaminaciones al medio ambiente [4].

En los últimos años el uso de este material se ha vuelto bastante popular debido a sus beneficios ambientales y económicos. Con el aumento en el costo de las materias primas y los portadores de energía, la reutilización de materiales reciclados se hace más necesario cada día por lo que el uso de grandes porciones de RAP en la construcción de nuevas carreteras es fundamental para reducir el costo y la huella ambiental de los pavimentos asfálticos [5]. Ahora bien, es claro que un pavimento reciclado no conserva las mismas propiedades físicas, químicas y reológicas que tiene un pavimento virgen; esto es debido a un proceso natural conocido como envejecimiento.

Por lo tanto, este proyecto de investigación se justifica en la medida en que es necesario comparar el desempeño físico y mecánico de mezclas asfálticas vírgenes y mezclas asfálticas preparadas en caliente usando materiales vírgenes y RAP, para que de esta manera se pueda analizar la viabilidad de usar el RAP en la construcción de nuevos pavimentos asfálticos en el área metropolitana de Bucaramanga.

Además de esto, la realización de este proyecto se hace pertinente teniendo en cuenta el sello sostenible que la Universidad Santo Tomás promueve en los ingenieros civiles, ya que es un hecho que no solo las obras de infraestructura vial, sino en general todo el sector de la construcción es un gran contaminante. Así bien, se hace necesario desarrollar alternativas sostenibles como lo es la implementación del RAP, el cual ayuda a reducir el impacto ambiental sin perder calidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar el desempeño físico, reológico y mecánico de mezclas asfálticas vírgenes y mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando RAP proveniente del área metropolitana de Bucaramanga.

1.3.2 Objetivos específicos

Caracterizar el desempeño físico y reológico del asfalto proveniente del RAP.

Analizar el desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP.

2. Marco teórico

Desde que se identificó el problema ambiental y económico que trae consigo la reparación y construcción de nuevas carreteras con pavimento asfáltico, numerosos estudios se han enfocado en la implementación de materiales más sostenibles como el RAP. Ahora bien, para realizar la implementación de un material reciclado es necesario realizar una serie de ensayos en el laboratorio que permitan determinar si el material es apto para el uso, y para hacer esto es necesario estudiar y comprender teóricamente los conceptos que involucran el RAP. De esta manera, este marco teórico se estructuró en tres capítulos generales que son el cemento asfáltico, las mezclas asfálticas, el reciclaje de pavimentos.

2.1 Cemento asfáltico

2.1.1 Definición

Un asfalto es un betún sólido, derivado del petróleo, que resulta de la destilación de este, el cual posee propiedades mecánicas y reológicas que dependen del tipo de procesamiento realizado, ya sea por destilación en aire o por vapor. Siendo esta última la más utilizada en pavimentación [6].

El asfalto posee características químicas y físicas que le proveen todas sus particularidades. Este cementante contiene tres propiedades químicas muy importantes: consistencia, pureza y seguridad, donde la primera se debe a su habilidad para fluir a diferentes temperaturas, debido a que el asfalto es un material termoplástico, es decir se fluidifica a altas temperaturas. Por otro lado, la segunda propiedad define la composición química del asfalto, donde las impurezas de este son prácticamente inertes. Y finalmente la tercera hace referencia al

comportamiento de afinidad química con las diferentes cargas eléctricas. Entre las propiedades físicas del asfalto se encuentran la viscosidad, elasticidad, resistencia al corte, ductilidad y pérdida de masa [7].

2.1.2 Envejecimiento del asfalto

El envejecimiento del asfalto es un fenómeno que se ha venido estudiando desde 1903, cuando Dow relacionó el calentamiento de asfalto extraído de mezclas asfálticas con la reducción de su peso y de los valores de penetración [8].

A lo largo de los años este fenómeno ha sido objeto de numerosas investigaciones, las cuales inicialmente lo consideraban como un proceso de endurecimiento físico, no obstante, se ha demostrado que este es un proceso mucho más complejo. Inicialmente se intentó comprenderlo “a partir del cambio de propiedades fisicoquímicas y ensayos empíricos como ductilidad, penetración, anillo y bola, y los índices de penetración, susceptibilidad a la temperatura, etcétera, hasta llegar a las determinaciones reológicas como las propiedades viscoelásticas” [8]. Es por esta razón que para llegar a comprender este fenómeno se hace necesario realizar diferentes ensayos que lleven a determinar los cambios presentados en dichas propiedades.

2.2 Mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar teniendo en cuenta varios parámetros. Entre ellas por fracciones de agregado pétreo empleado, por temperatura y otras como la porción de vacíos en la mezcla asfáltica, el tamaño máximo de agregado pétreo, estructura del agregado pétreo y la granulometría [9].

Según la clasificación de temperatura puesta en obra, las mezclas asfálticas pueden ser en caliente: Se fabrican con asfaltos a unas temperaturas elevadas, en el rango de los 150°C; o mezclas asfálticas en frío: El ligante suele ser una emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente [9].

Así mismo, el INVIAS clasifica las mezclas en caliente por su tipo de granulometría como mezclas densas (MDC), Mezclas semidensas (MSC) y mezclas gruesas (MGC) [10]. Así mismo las mezclas asfálticas son clasificadas según el nivel de tránsito en NT1, NT2 y NT3 donde señala que la proporción de arena natural debe ser menor o igual al 50% de la masa total del agregado fino [10].

Según las Empresas Públicas de Medellín [11] es importante tener en cuenta la diferenciación de niveles de tránsito que establece el Instituto Nacional de Vías en sus normas generales de construcción de carreteras; éstas definen:

- NT1: Nivel de tránsito uno. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a 0.5×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.
- NT2: Nivel de tránsito dos. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre 0.5×10^6 y 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.
- NT3: Nivel de tránsito tres. Corresponde a vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a 5.0×10^6 ejes equivalentes de 80 kN en el carril de diseño.”

Con la clasificación de las mezclas anteriores se determina la granulometría elegida como se muestra en la tabla 3, esta está basada en la norma INV E – 450 – 13

Tabla 1. *Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua*

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/ U.S. Standard)									
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75	2,00	0,425	0,180	0,075
	1 ½"	1"	¾"	½"	3/8"	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
% PASA										
DENSA MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8

Adaptado de la norma INV E – 450 – 13 [10]

Por último, la mezcla que se emplea en este trabajo es la MDC-19 se define como Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm. La MCD-19 tipo INVIAS se usa generalmente para construir capas de rodadura en vías con tráfico medio y alto [12].

2.3 RAP

“El RAP corresponde al material recuperado de la carpeta asfáltica de un pavimento removido producto de una reconstrucción o rehabilitación. De acuerdo con Han, Thakur, Chong y Parsons (2011), tanto el agregado como el ligante asfáltico que conforman el RAP aún poseen la capacidad de aportar ciertas propiedades en una nueva estructura de pavimento.” [13]

Los pavimentos reciclados RAP se utilizan básicamente de dos formas: La primera es usarlo como “agregado” para material de base o sub-base, considerándolo como un agregado con bajo porcentaje de absorción, descartando el remanente de asfalto. La segunda forma es adicionarle un material rejuvenecedor, considerando que se pueden restaurar las condiciones iniciales del cemento asfáltico, en este caso sí se consideran las propiedades y el porcentaje del asfalto existente [14].

2.3.1 Ventajas y desventajas del uso de RAP

El uso del RAP trae beneficios ambientales ya que conserva la energía, preserva los recursos naturales y reduce la cantidad de escombros de construcción que se coloca en los vertederos y además beneficios económicos como la reducción en costos de pavimentación, ahorro en importación y extracción de materia prima (asfalto y agregados), reducción en los porcentajes de ligante asfáltico requerido en la mezcla [4], [13]. Behnood da cifras de estos beneficios, la mezcla de asfalto que contiene 100% de RAP podría ahorrar aproximadamente 50-70% en el costo total de los materiales en comparación con la mezcla convencional y junto a un rejuvenecedor pueden conducir a una reducción del 35% de CO₂ equivalente por tonelada de mezcla de asfalto pavimentado [15].

El uso de materiales RAP en mezclas de asfalto también podría tener algunas desventajas relacionadas principalmente con el rendimiento de ingeniería de las mezclas que contienen RAP. Un diseño deficiente puede provocar dificultades prematuras en el pavimento (p. Ej., Fatiga y grietas a baja temperatura) y una menor vida útil, lo que a su vez puede aumentar los costos de mantenimiento, el consumo de energía y las emisiones [15].

3. Metodología

La metodología de este proyecto se dividió en 2 fases las cuales corresponden a los objetivos específicos planteados previamente, de esta manera al finalizar las actividades de cada fase se obtuvieron los resultados de cada objetivo.

A continuación, se explica a detalle en que consistió cada fase.

3.1 Fase 1: Caracterización del desempeño físico, químico y reológico del asfalto proveniente del RAP

Con el fin de dar cumplimiento a esta fase, se plantearon seis actividades de las cuales la primera consistió en la obtención del RAP, la segunda en la extracción del asfalto de dicha muestra de RAP, la tercera en una destilación simple para separar el asfalto obtenido del solvente y las otras tres correspondieron a los ensayos realizados para caracterizar tanto al asfalto virgen como al extraído de las muestras de RAP recogidas del área metropolitana de Bucaramanga. Las actividades de esta fase fueron realizadas en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Santo Tomás sede Piedecuesta.

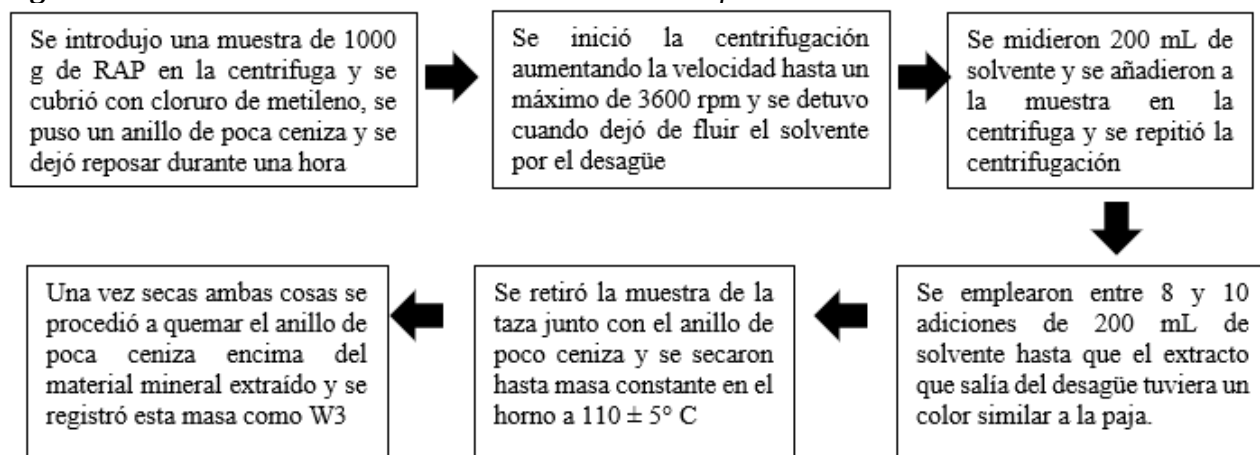
3.1.1 Actividad 1.1. Obtención y preparación de las muestras de RAP

Para dar comienzo al desarrollo de esta fase lo primero que se hizo fue obtener las muestras de RAP, estas muestras se obtuvieron de tres obras de rehabilitación vial de las cuales dos estaban ubicadas en la vía Lebrija – Girón y la otra ubicada vía al aeropuerto de Bucaramanga.

Una vez conseguidas las muestras de RAP se procedió a secarlas en el horno durante 4 h. a 110°C para luego obtener su masa en seco. Posteriormente la muestra fue tamizada de tal manera que el tamaño de partícula máximo fuera 1 in.

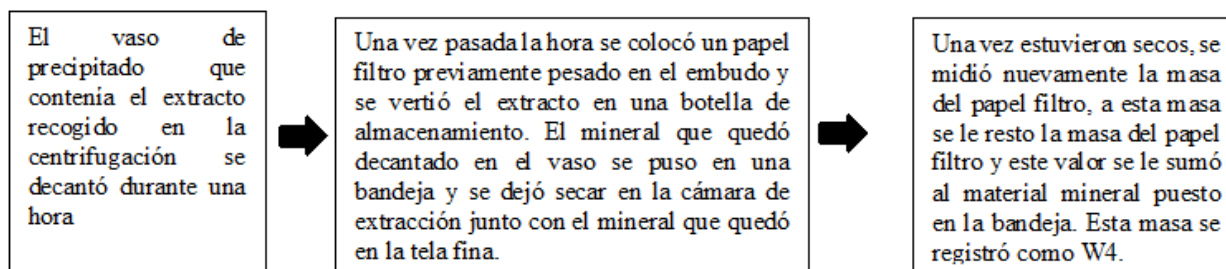
3.1.2 Actividad 1.2. Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos

Esta actividad fue realizada usando una centrifuga digital marca Pinzuar con base a la norma I.N.V.E – 732 – 13, la cual describe métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en mezclas asfálticas en caliente y en muestras tomadas de pavimentos [16]. En la figura 1 se muestra el esquema del procedimiento que se llevó a cabo para realizar este ensayo.

Figura 1. *Protocolo de la extracción cuantitativa del asfalto*

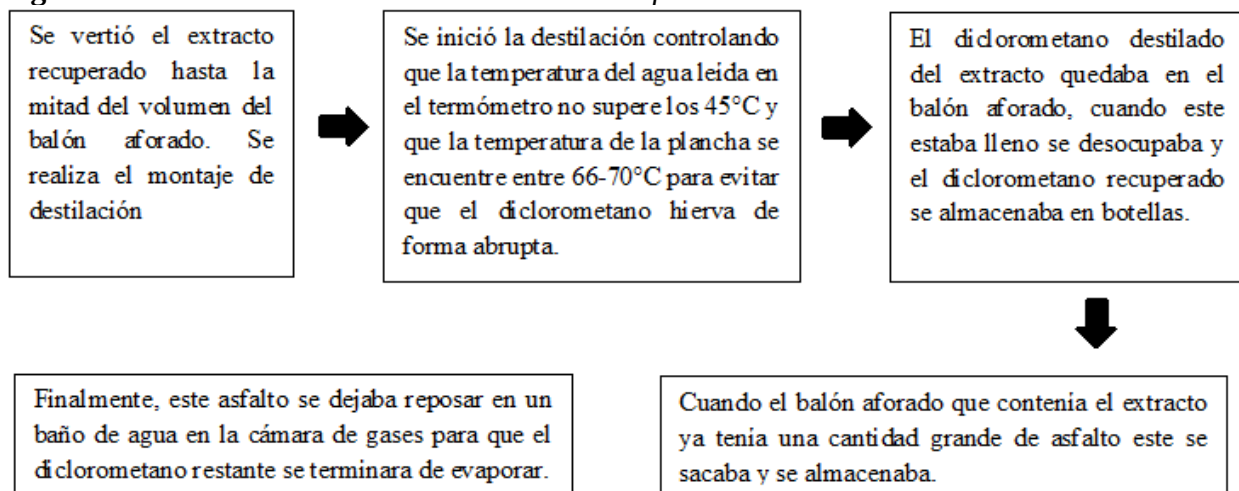
Adaptado de la norma INV E – 732 – 13 [16]

Al finalizar este ensayo se procedió a determinar la cantidad de material mineral en el extracto con el siguiente procedimiento.

Figura 2. *Protocolo de la determinación de material mineral*

3.1.3 Actividad 1.3. Destilación simple para separar el asfalto del solvente

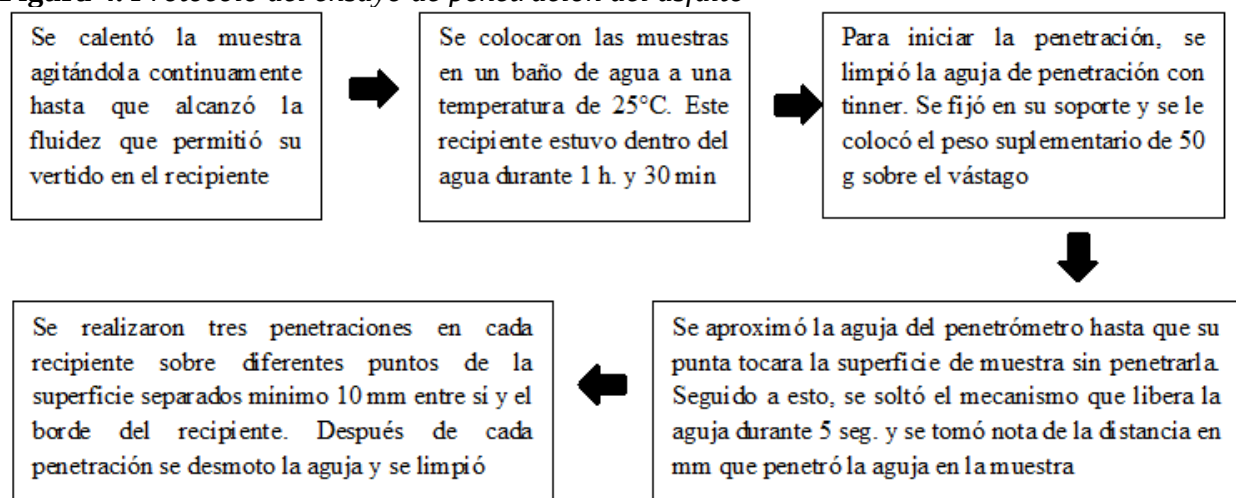
Con la realización del ensayo mostrado en la figura 2, el asfalto extraído del RAP quedó junto con el solvente usado, por lo que fue necesario separarlos por medio de una destilación simple como se muestra en la figura 3.

Figura 3. *Protocolo del sistema de destilación simple*

3.1.3.4 Actividad 1.4. Penetración de materiales bituminosos

Esta actividad fue realizada usando un penetrómetro digital marca Pinzuar (Modelo PA-703-2 serie 147) y se realizó con base a la norma I.N.V.E – 706 – 13, la cual se refiere a la determinación de la consistencia de los materiales bituminosos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto [17]. Este ensayo se le realizó a una porción de muestra de asfalto extraído de RAP que se obtuvo por medio de la centrifugación descrita en la anterior actividad, y a una muestra de asfalto virgen suministrada por la empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda (MPI). La empresa Manufacturas y Procesos Industriales Ltda (MPI) suministró junto con el asfalto virgen una tabla en la que se muestra el reporte de calidad de asfaltos de penetración 60 /70.

A continuación, se muestra el esquema con el protocolo que se siguió con el fin de realizar este ensayo.

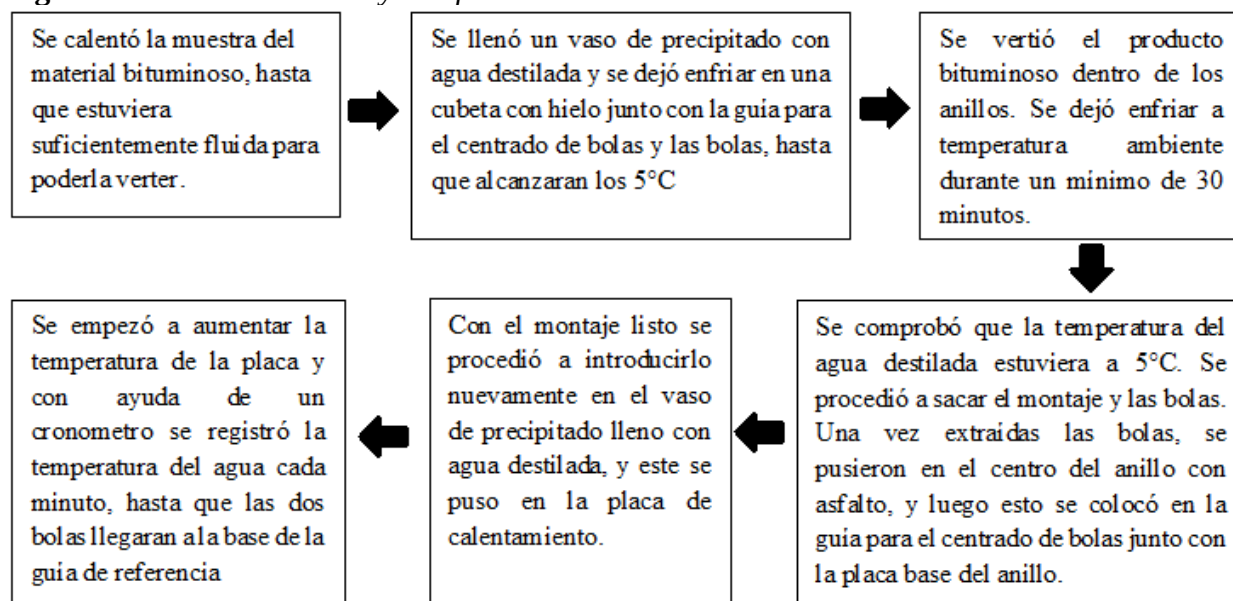
Figura 4. *Protocolo del ensayo de penetración del asfalto*

Adaptado de la norma INV E – 706 – 13 [17]

Con el fin de determinar si existe una diferencia significativa entre la penetración del asfalto virgen y la penetración del asfalto extraído del RAP, se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Fijando un 95% de confianza para una diferencia estadísticamente significativa [18]. Este análisis se realizó con el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

3.1.5 Actividad 1.5. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos

Esta actividad fue realizada con base a la norma I.N.V.E – 712 – 13, la cual se refiere a la determinación del punto de ablandamiento de productos bituminosos en el intervalo de 30 a 157° C, utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada (30 a 80° C) [19]. Al igual que en la actividad 1.3, este ensayo se le realizó a una muestra del asfalto que fue recuperado en los procesos mencionados en la actividad 1.2 (Extracción cuantitativa de asfalto y sistema de destilación) y a una muestra de asfalto virgen. A continuación, se muestra el protocolo seguido para la realización de este ensayo.

Figura 5. *Protocolo del ensayo de punto de ablandamiento*

Adaptado de la norma INV E – 712 – 13 [19]

A los resultados de este procedimiento se les realizó un análisis ANOVA [18].

3.1.6 Actividad 1.6. Viscosidad dinámica

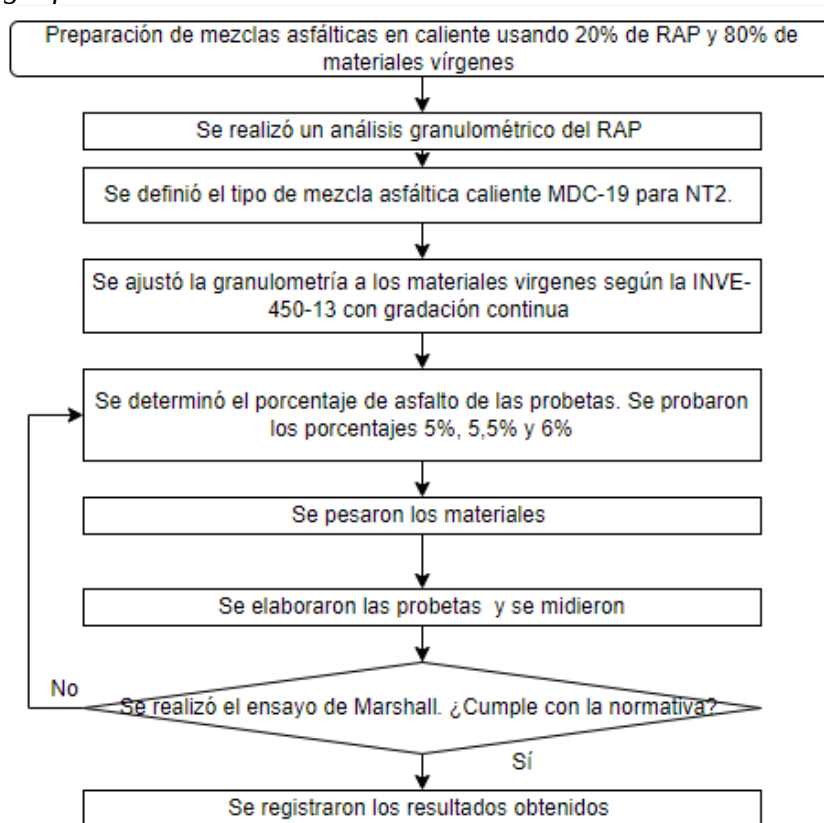
Esta actividad fue realizada por medio de un servicio técnico en el Centro de Investigaciones en Catálisis (CICAT) de la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará. El ensayo se realizó bajo las siguientes condiciones: la temperatura de 150°C y un shear rate: 34,3 1/s⁻¹.

Al finalizar estos ensayos se concluyó la fase 1 y se procedió a realizar los ensayos correspondientes a la segunda fase de este proyecto. Con los resultados obtenidos fue posible realizar una comparación de las propiedades físicas, química y reológicas de un asfalto virgen y de un asfalto envejecido que fue recuperado de obras de rehabilitación vial del área metropolitana de Bucaramanga.

3.2 Fase 2: Análisis del desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP

Con el fin de analizar el desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP, se siguió el procedimiento presentado en la figura 6.

Figura 6. Metodología fase 2

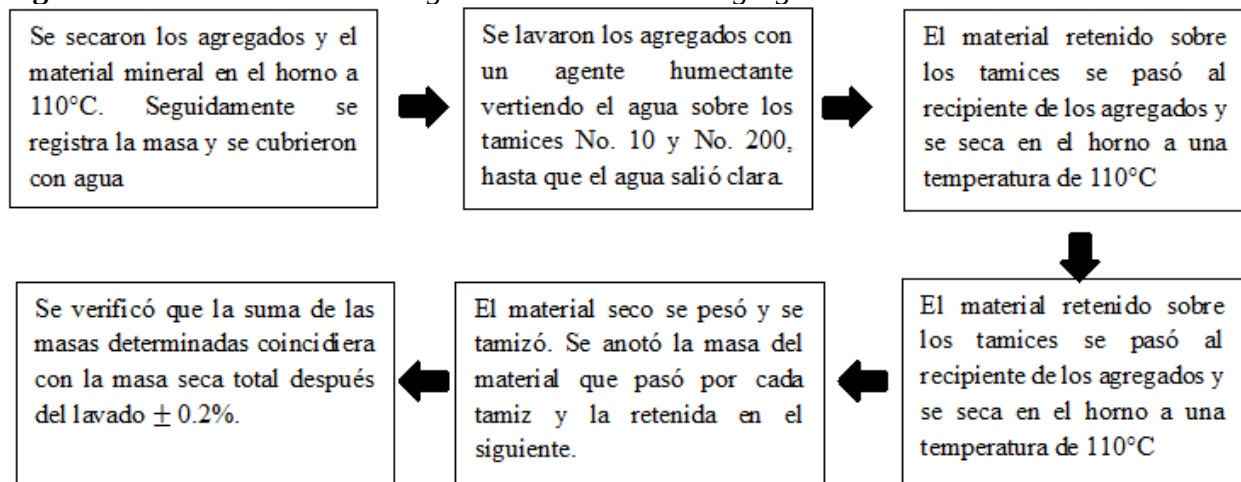


3.2.1 Actividad 2.1. Análisis granulométrico de los agregados extraídos del RAP y definición de las mezclas asfálticas utilizadas

Esta actividad fue realizada con base a la norma I.N.V.E – 782 – 13, la cual describe un procedimiento para determinar la granulometría de los agregados gruesos y finos recuperados de

las mezclas asfálticas, empleando tamices con malla de abertura cuadrada [20]. Esta actividad se les realizó a los agregados obtenidos en las extracciones cuantitativas descritas en la actividad 1.2

Figura 7. *Protocolo del análisis granulométrico de los agregados extraídos del RAP*



Adaptado de la norma INV E – 782 – 13 [20]

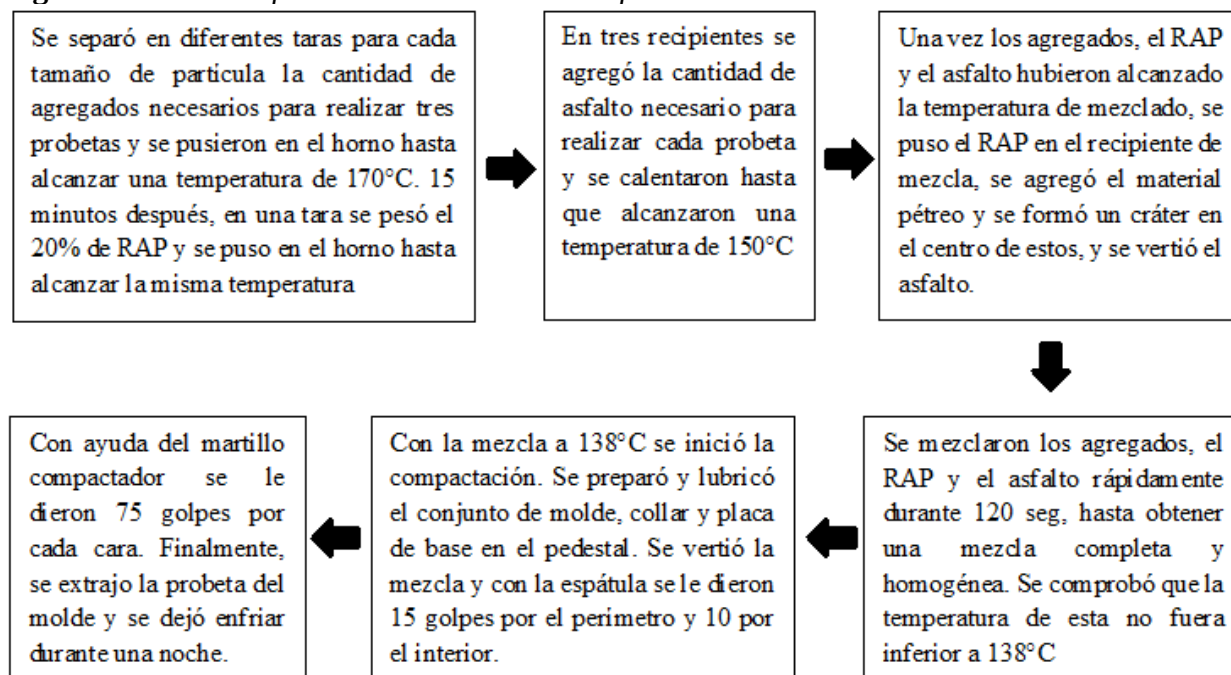
Una vez realizado el ensayo granulométrico a la muestra de agregados extraídos del RAP, se procedió a determinar la cantidad de agregados de cada tamaño que se iba a usar en las mezclas asfálticas. Para realizar esto, se tuvo en cuenta que la granulometría del RAP y se eligió la mezcla correspondiente. Seguidamente se seleccionó la cantidad de material que se quería para cada tamaño, teniendo en cuenta los límites establecidos por la norma, y ajustándolos para que tuvieran el comportamiento de una curva granulométrica.

3.2.1 Actividad 2.2. Elaboración y medición de las probetas, y ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall

Estas actividades fueron realizadas con base a las normas I.N.V.E – 748 – 13, I.N.V.E - 744 – 13 y I.N.V.E – 744 – 13- La norma I.N.V.E – 748 – 13 describe el procedimiento a seguir para la elaboración de probetas de mezclas asfálticas para pavimentación [21], esta norma se ajustó

para incluir un 20% de material reciclado. La norma I.N.V.E – 744 – 13 se refiere a la determinación del espesor de especímenes compactados de mezclas asfálticas de pavimentos [22].

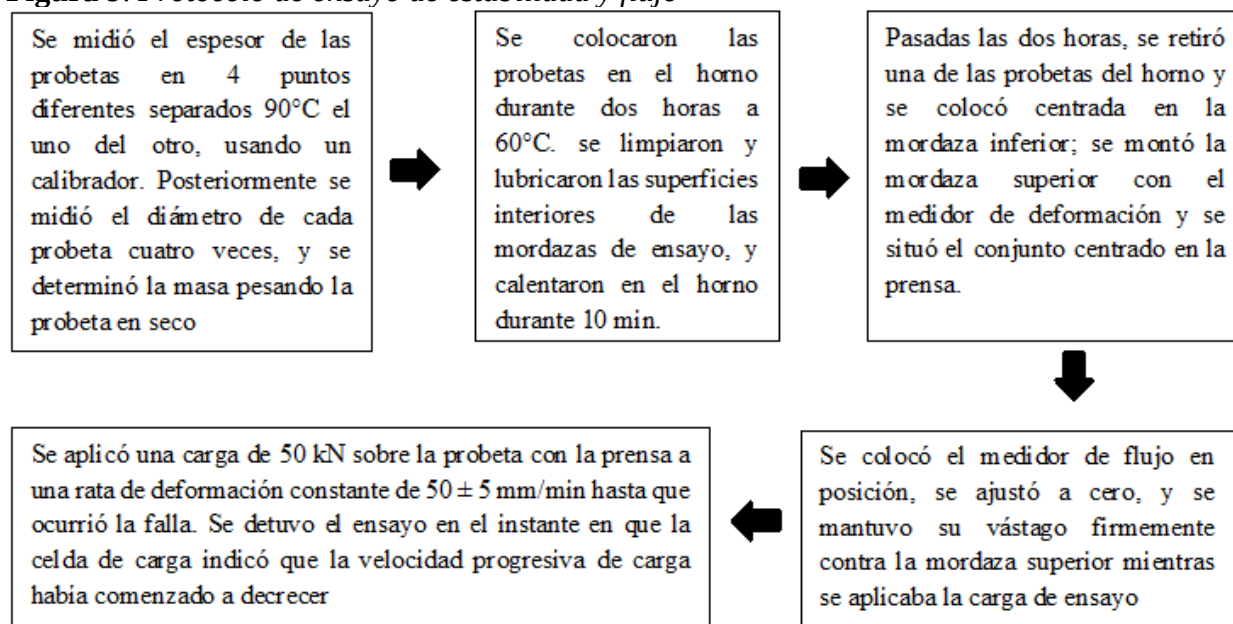
Figura 8. Protocolo para la elaboración de las probetas con RAP



Adaptado de la norma INV E – 748 – 13 [21]

Para realizar la mezcla con 100% de materiales vírgenes se siguió el mismo procedimiento, pero sin usar el material reciclado.

Al siguiente día se procedió a realizar el ensayo de determinación del espesor de probetas y estabilidad y flujo, esta actividad fue realizada con base a la norma I.N.V.E – 748 – 13. La norma I.N.V.E – 748 – 13 describe el procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación [21]. Esta actividad se les realizó a las probetas obtenidas al seguir el procedimiento descrito en la figura 10.

Figura 9. *Protocolo de ensayo de estabilidad y flujo*

Adaptado de la norma INV E – 748 – 13 [21]

Esta fase concluyó con la realización del ensayo de estabilidad y flujo, el cual permitió comparar el comportamiento mecánico de dos tipos de mezclas asfálticas, la primera de materiales 100% vírgenes y la segunda de 80% materiales vírgenes y 20% materiales reciclados.

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados en los laboratorios, siguiendo la metodología planteada para cumplir con los objetivos del proyecto. Estos se dividen en las dos fases planteadas en la metodología.

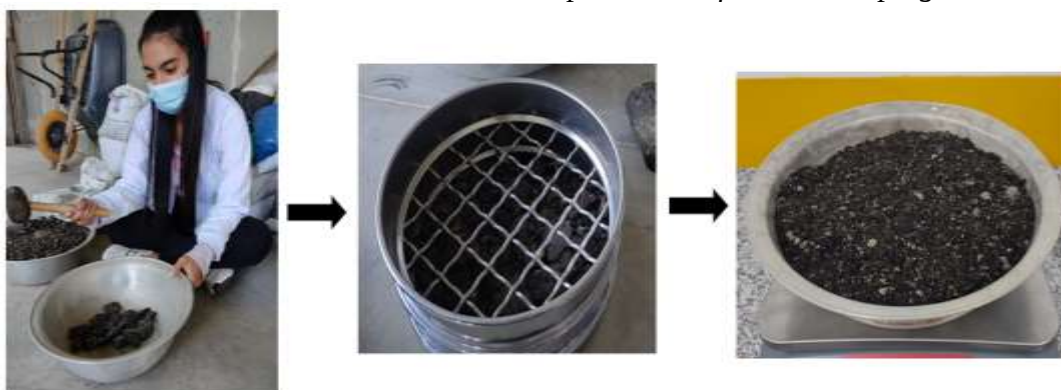
4.1. Fase 1: Caracterización del desempeño físico, químico y reológico del asfalto proveniente del RAP

Al culminar esta fase se obtuvieron las características que posee el asfalto envejecido obtenido del RAP proveniente del área metropolitana de Bucaramanga. Los resultados se presentan a continuación.

4.1.1 Actividad 1.1. Obtención y preparación de las muestras de RAP

Con las muestras secas totalmente, se procedió a golpearlas para disminuir su tamaño y realizar el tamizaje obteniendo tamaños menores a una pulgada, este proceso se muestra a continuación.

Figura 10. *Proceso de disminución del tamaño de partícula inferior a una pulgada*



La cantidad total de RAP conseguido fue de 63 kg.

4.1.2 Actividad 1.2: Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos

Una vez separado el asfalto del RAP se procedió a realizar el cálculo de contenido de asfalto, para hacer esto se adaptó la fórmula planteada en la norma I.N.V.E – 732 – 13 [16] a la siguiente:

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \left[\frac{W_1 - (W_3 + W_4)}{W_1} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde: W1: Masa de la porción de ensayo

W3: Masa del agregado mineral extraído

W4: Masa del material mineral en el extracto

Estos ensayos se hicieron 5 veces, y posteriormente se realizó un análisis estadístico los resultados obtenidos se consignaron en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de las extracciones del asfalto del RAP

Extracción	1	2	3	4	5
W1 (g)	996,6	996,8	996,8	996,7	1000
W3 (g)	885,9	918	887,3	900,7	859,6
W4 (g)	53,7	27,7	49,9	44,7	80,7
Porcentaje de Asfalto	5,7	5,1	6,0	5,2	6,0
Promedio porcentaje del asfalto	5,6				
Desviación Estándar (g)	0,4				
Coefficiente de Variación (%)	7,6				

La extracción cuantitativa del asfalto permitió determinar que el contenido de asfalto promedio presente en muestras de RAP provenientes de obras de mantenimiento y rehabilitación del Área Metropolitana de Bucaramanga es del $5,6 \pm 0,4\%$. Este valor es consistente con lo reportado por Ahmed et al., quienes indican que los materiales RAP consisten en 4–6% de aglutinante de asfalto en peso de agregado [2]. Así mismo, con Leiva et al, quienes amplían este rango a 3-7% de aglutinante de asfalto en peso de agregado, y también recomiendan que la desviación estándar máxima para el contenido de asfalto sea de 0,5% [4].

4.1.3 Actividad 1.3. Destilación simple para separar el asfalto del solvente

Finalizado el proceso de extracción se procedió a destilar el cloruro de metileno para así obtener el asfalto envejecido. Esto se realizó con el siguiente montaje de destilación y filtración.

Figura 11. *Proceso de destilación del asfalto*

De este proceso se recuperaron 600 g de asfalto envejecido.

4.1.4 Actividad 1.4. Penetración de materiales bituminosos

La penetración se define como la consistencia de un material bituminoso expresada por medio de la distancia, en décimas de milímetro [17]. Los datos obtenidos en el laboratorio se muestran a continuación.

Tabla 3. *Penetración del asfalto virgen y envejecido*

Grado	Asfalto Virgen	Asfalto Envejecido
	Penetración (mm)	Penetración (mm)
Promedio	6,48	3,82
Desviación estándar	0,2	0,53
Coefficiente de Variación	3,12%	12,88%
Valor- p	0,0012	

La penetración del asfalto virgen fue de $6,48 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, lo cual indica que es un asfalto 60/70. Esta penetración está en el rango suministrado por la empresa MPI. Este valor es consistente con Li et al. quienes obtuvieron una penetración igual [23], y se encuentra, en el mismo rango que Mullapudi [24] y Zhang [25]. A su vez, la penetración del asfalto envejecido es de $3,82 \text{ mm} \pm 0,53$

mm, lo cual indica que es un asfalto 30/40. Este valor es consistente con lo obtenido por Li et al. en una muestra envejecida, en la cual la penetración fue de 3,90 mm [23], y con Aghazadeh et al. los cuales reportaron una penetración de 3,80 mm [26]. Con el aumento de los tiempos de envejecimiento, la penetración disminuye debido a la reacción de oxidación que origina un aumento en las micelas de asfáltenos [27]. El valor-p es menor a 0,05 lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos variables con un nivel del 95% de confianza.

4.1.5 Actividad 1.5. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos

El punto de ablandamiento se considera como el valor medio de las temperaturas a las cuales los dos discos se ablandan lo suficiente para que la bola de acero envuelta en el ligante asfáltico caiga a una distancia de 25 mm [19]. Los datos obtenidos en el laboratorio se muestran a continuación.

Tabla 4. *Punto de ablandamiento del asfalto virgen y envejecido*

Grado	Asfalto Virgen		Asfalto Envejecido	
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Promedio	48,1	13,5	59,7	16,3
Desviación estándar	0,9	0,3	1,2	0,2
Coeficiente de Variación	1,8%	2,2%	2,1%	1,2%
Valor- p	0,0000			

El punto de ablandamiento del asfalto virgen es de $48,1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, este valor está en el rango de $48^{\circ}\text{C} - 54^{\circ}\text{C}$ suministrado por la empresa MPI. Este valor es consistente con Yu et al. [28] y Zhang [25] et al. los cuales reportaron un punto de ablandamiento de $48,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. A su vez, el punto de ablandamiento del asfalto envejecido es de $59,7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este valor es consistente

con Aghazadeh et al. los cuales reportaron un punto de ablandamiento de 61 °C [26] y con Zhang et al. quienes reportaron un punto de ablandamiento de 62,5 °C [25]. Con el aumento de los tiempos de envejecimiento, la temperatura del punto de ablandamiento aumenta debido a la reacción de oxidación que origina un aumento en las micelas de asfáltenos.[27]. El valor-p es menor a 0,05 lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa.

4.1.6 Actividad 1.6. Viscosidad dinámica

La viscosidad es una propiedad importante ya que la utilidad de los aglutinantes de asfalto como materiales de pavimentación depende de la resistencia al cambio de sus propiedades físicas en el rango de temperaturas que se encuentran en un pavimento típico.[29] A continuación, se muestran los resultados de viscosidad dinámica para un asfalto virgen y envejecido.

Tabla 5. Viscosidad dinámica ($T=150^{\circ}\text{C}$, shear rate: 34,3 1/s-1)

Grado	Asfalto Virgen	Asfalto Envejecido
	Viscosidad a 150°C (cP)	Viscosidad a 150°C (cP)
Promedio	247,44	845,20
Desviación estándar	0,53	111,31
Coeficiente de Variación	0,22%	13,17%
Valor- p	0,0055	

La viscosidad del asfalto virgen es de 247,44 cP $\pm$ 0,53 cP. Este valor es del mismo orden de magnitud que el reportado por Ji et al. [30] (405,5 cP a 135 °C y Aghazadeh et al. [26] (425 cP a 135°C y 100 cP a 165°C). Ambos autores siguieron la norma ASTM D 4402 – 02, usando un viscosímetro rotacional. A su vez, la viscosidad del asfalto envejecido es de 845,20 cP $\pm$ 111,31 cP. Por otra parte, el valor-p es menor a 0,05 lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa.

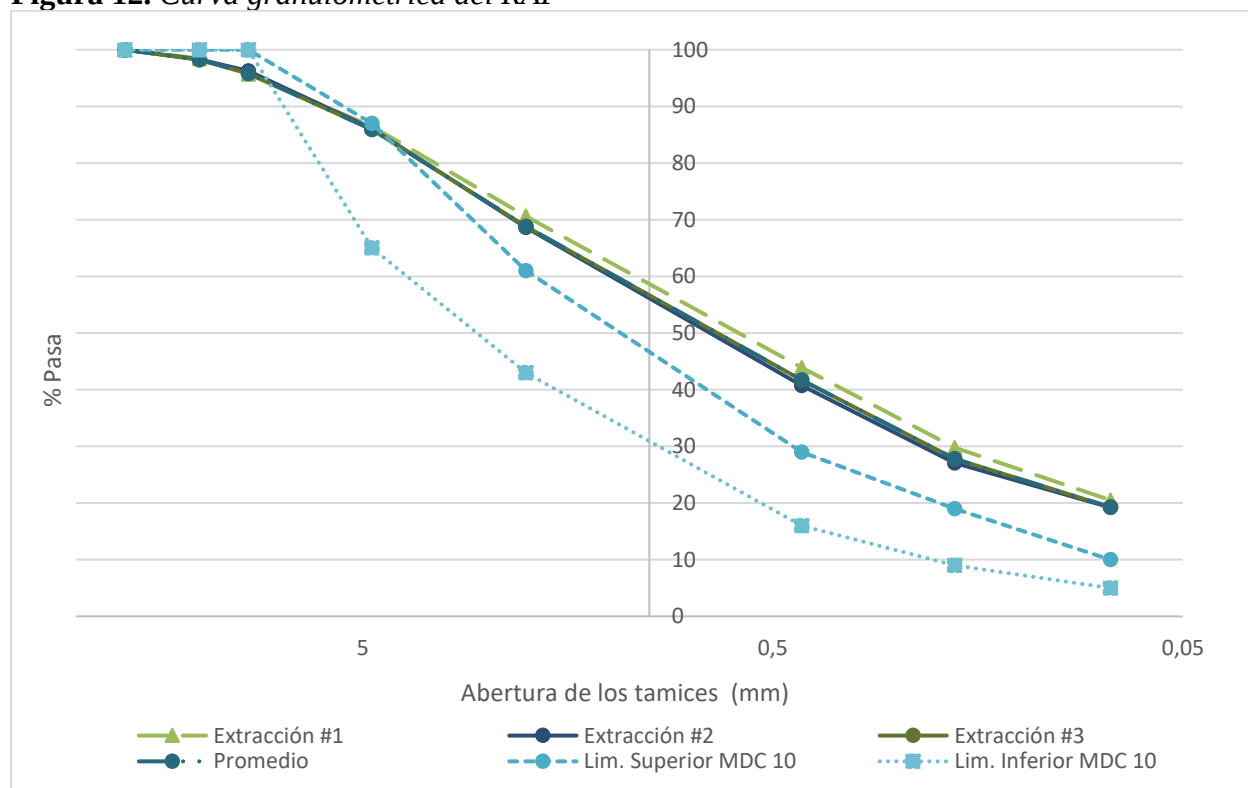
4.2.Fase 2: Análisis del desempeño mecánico por medio del ensayo Marshall de las mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP

Al culminar esta fase se obtuvieron las propiedades mecánicas de las dos mezclas asfálticas preparadas en caliente. Los resultados se presentan a continuación.

4.2.1 Actividad 2.1: Análisis granulométrico de los agregados extraídos de las mezclas asfálticas y definición de las mezclas asfálticas utilizadas

Después de terminada la actividad 1.2, se obtuvieron también agregados a los cuales fue necesario realizarle un análisis granulométrico. Este tuvo como resultado la curva granulométrica mostrada a continuación.

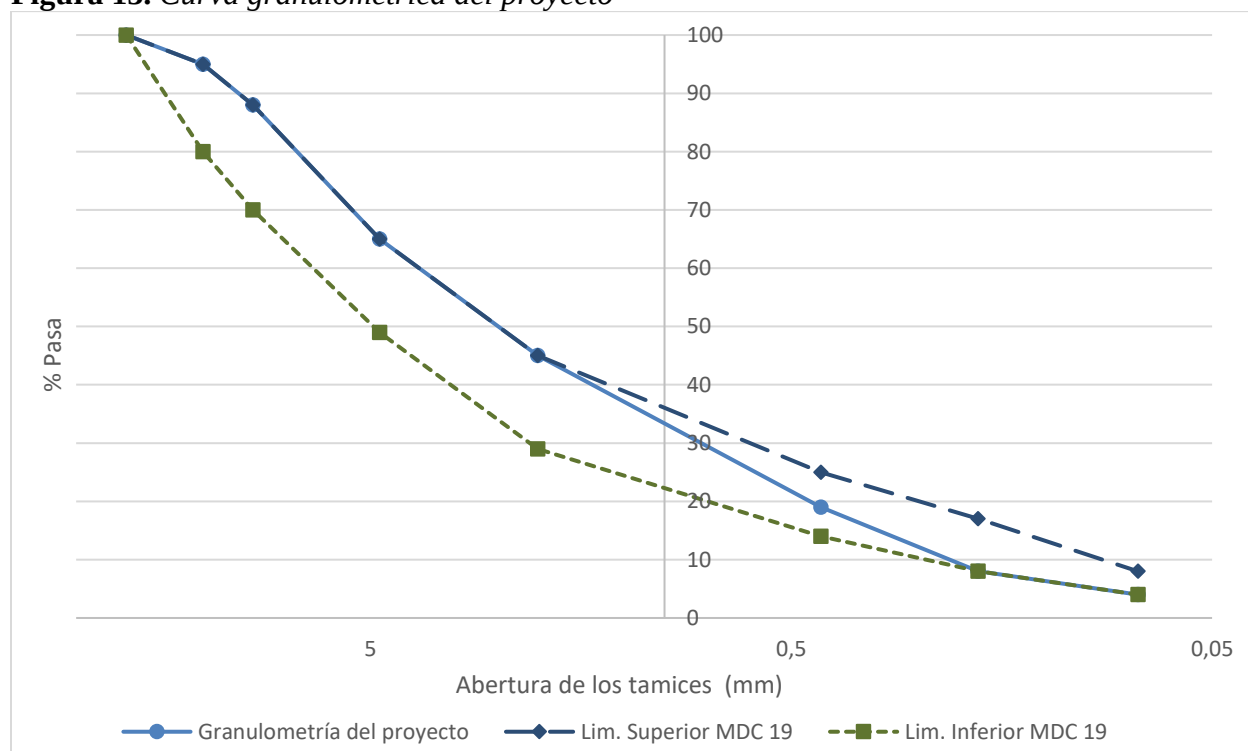
Figura 12. Curva granulométrica del RAP



De la curva granulométrica del RAP se observa que el comportamiento más cercano según los límites de la tabla 450-6 del INVIAS [10] es a una mezcla densa MDC-10 aunque no cumple los límites de este para poderla clasificar como una.

Con la granulometría del RAP se observó que el agregado máximo fue de $\frac{1}{2}$ " y se decidió elegir la mezcla MDC-19 ya que en esta el agregado máximo también es de $\frac{1}{2}$ ". Como se tenían los agregados clasificados por tamaño, se eligió el porcentaje que se quería que pasara en cada tamiz y posteriormente se halló el peso retenido en cada tamiz, dando como resultado la siguiente figura.

Figura 13. Curva granulométrica del proyecto



Esta curva granulométrica se realizó con gradación continua ya que esta gradación es importante porque los agregados finos ocupan los espacios vacíos que dejan los agregados gruesos

y se necesita menos asfalto para cubrir todas las partículas y para ocupar los vacíos entre los agregados.

Ahora bien, es importante aclarar que para la realización de la segunda mezcla se le tuvo que hacer un ajuste a la curva granulométrica previamente definida para la mezcla 1. Lo que se hizo fue añadir el 20% de la masa de cada probeta en materiales de RAP y el 80% faltante se completó con materiales vírgenes, para que de esta manera la curva obtenida en esta mezcla fuera igual que la de la mezcla 1. Con los agregados listos, se procedió a elegir los porcentajes de asfalto para la elaboración de las probetas; estos fueron el 5%, 5,5% y 6%.

4.2.2 Actividad 2.2: Elaboración y medición de las probetas, y ensayo de estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall

Con la cantidad de agregados listos se elaboraron tres probetas para cada uno del porcentaje de asfalto 5%, 5,5% y 6% para los dos tipos de mezcla: mezcla 1, 100% materiales vírgenes y mezcla 2, 20% RAP y 80% materiales vírgenes, para un total de 18 probetas.

Después se procedió a medir la altura y diámetro de las probetas con base a la norma I.N.V.E – 744 – 13, esto con el fin de determinar el factor de corrección para las medidas de resistencia [22]. Finalmente se llevó a cabo el ensayo de estabilidad y flujo empleando el aparato Marshall según la norma I.N.V.E – 748 – 13 [21]. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 6. Resultados del ensayo Marshall en probetas vírgenes

Grado	5% Asfalto		5,5% Asfalto		6% Asfalto	
	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
Probeta 1	8,35	2,79	7,85	3,04	12,75	2,79
Probeta 2	10,15	2,87	7,55	3,24	12,95	3,20
Probeta 3	9,80	3,08	9,00	2,96	12,30	3,21

Promedio	9,43	2,91	8,13	3,08	12,67	3,07
Desviación estándar	0,95	0,15	0,77	0,14	0,33	0,21
Coeficiente de Variación	10,12%	5,17%	9,41%	4,63%	2,63%	7,00%
Relación estabilidad/flujo	3,24		2,64		4,13	

Con el fin de comprobar que las probetas cumplen con la normativa se revisó la tabla 450-10. [10], la cual se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. *Criterios para el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall*

Característica	Categoría de tránsito NT2
Estabilidad mínima (kN)	7,5
Flujo (mm)	2,0 a 4,0
Relación estabilidad/flujo (kN/mm)	3,0 a 5,0

Adaptada de la INVE-450-13 [10].

De acuerdo con la tabla 7, se concluye que todas las mezclas realizadas con 100% de materiales vírgenes cumplen con la estabilidad mínima de 7,5 kN, ya que la estabilidad obtenida en las probetas es mayor. En cuanto al flujo se encuentran en el rango aceptado. Así mismo, para la relación estabilidad/flujo, el 5% y 6% de asfalto cumplió esta condición, pero el 5,5% de asfalto no la cumplió.

De los tres porcentajes, se seleccionó el 6% de asfalto como mejor resultado, ya que cumple con las condiciones de la norma y además fue el que presentó menor coeficiente de variación. Después de esto, se procedió a repetir el procedimiento para la mezcla 2, 20% RAP y 80% materiales vírgenes. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 8. Resultados del ensayo Marshall en probetas con 20% RAP y 80% materiales vírgenes

Grado	5% Asfalto		5,5% Asfalto		6% Asfalto	
	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)
Probeta 1	8,20	3,13	11,35	4,41	10,90	4,06
Probeta 2	6,90	2,82	13,30	3,87	11,45	4,54
Probeta 3	10,25	3,09	13,90	3,95	13,15	4,48
Promedio	8,45	3,01	12,85	4,08	11,83	4,36
Desviación estándar	1,69	0,17	1,33	0,29	1,17	0,26
Coeficiente de Variación	19,99	5,61	10,38	7,08	9,91	5,99
Relación estabilidad/flujo		2,81		3,15		2,72

Los resultados de la tabla 8 se compararon con la normativa de la tabla 7. Se observa que todas las mezclas preparadas con 20% de RAP y 80% de materiales vírgenes cumplen con estabilidad ya que es mayor a 7,5 kN. En cuanto al flujo, solo la mezcla preparada con 5% de asfalto lo cumple. Así mismo, para la relación estabilidad/flujo, solo la mezcla preparada con 5,5% se encuentra en el rango aceptado.

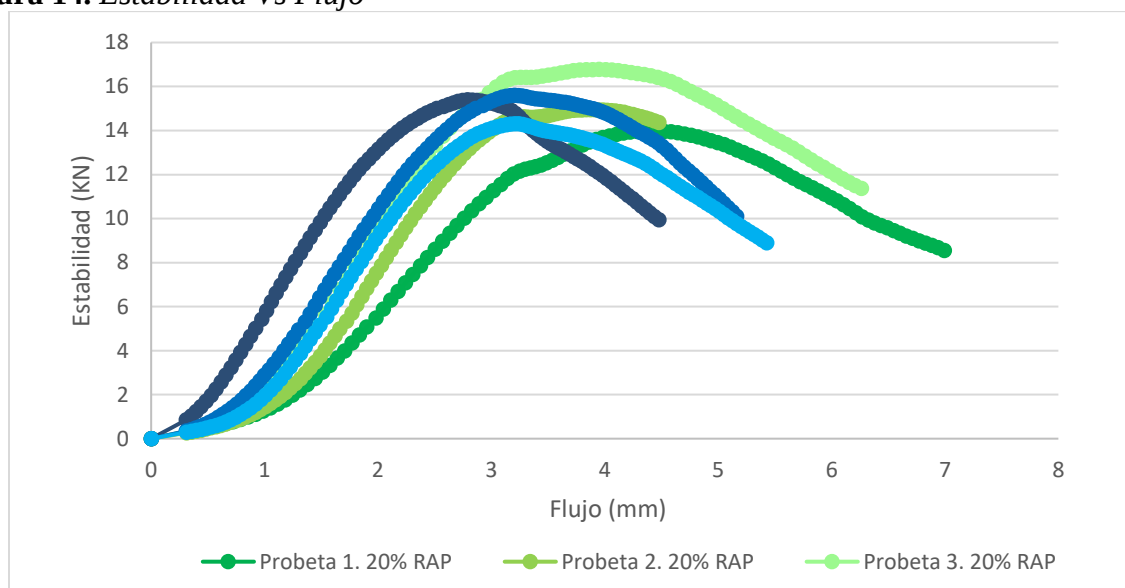
De los tres porcentajes, se descartó la mezcla preparada con 6% de asfalto ya que esta incumplía el flujo y la relación estabilidad/flujo. Con el fin de seleccionar la mezcla restante adecuada, se calculó el porcentaje de desviación de los resultados con su límite más cercano. Para la mezcla preparada con 5% de asfalto, la relación de estabilidad/flujo tuvo un porcentaje de desviación del 6,33% con respecto al límite inferior y la mezcla preparada con 5,5% de asfalto el flujo tuvo un porcentaje de desviación del 2,00% con respecto al límite superior. Por consiguiente, se seleccionó la mezcla preparada con 5,5% de asfalto como la más adecuada.

Estos valores de estabilidad son similares con Wang et al. [31] quienes obtuvieron una estabilidad de 11,1 kN en la mezcla virgen y 12,3 kN en una mezcla con una adición de 30% de

RAP. También, con Aghazadeh et al. [26] quienes obtuvieron una estabilidad alrededor de 11,77 kN en la mezcla virgen y 12,26 kN en una mezcla con una adición de 20% de RAP. Por otro lado, con respecto al flujo, Wang et al. [31] reportaron un valor de 3,2 mm para la mezcla virgen y 3,8 mm para la mezcla con 30% de RAP. Se observó que al igual que en este estudio, la adición de RAP aumenta el flujo.

Una vez identificados los porcentajes de asfalto que produjeron la mejor respuesta para cada mezcla, los cuales fueron 6% para la mezcla virgen y 5,5% para la mezcla con RAP, se procedió a elaborar la figura 14 y un análisis estadístico para la estabilidad.

Figura 14. Estabilidad Vs Flujo



Este análisis dio como resultado un valor- p de 0,8286, lo que indica que no existe una diferencia estadísticamente significativa. Para el flujo, el valor- p fue de 0,009, lo que indica que existe una diferencia estadísticamente significativa. Cabe resaltar que, en el reciclaje de mezcla en caliente, una tasa de uso relativamente baja de RAP (menos del 30%) tiene un efecto limitado sobre las propiedades mecánicas de la mezcla de asfalto de reciclaje final. [32].

5. Conclusiones

Al realizar las comparaciones del desempeño físico, químico, reológico y mecánico de las dos mezclas asfálticas realizadas en este proyecto se puede concluir que usando un 20% de RAP en una mezcla asfáltica se puede obtener un pavimento apto para la construcción de nuevas carreteras.

Al analizar las muestras de RAP provenientes del AMB, se encontró que el contenido de asfalto en ellas es del $5,6 \pm 0,4\%$. Este asfalto se caracterizó por medio de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad dinámica, dando como resultado un valor de penetración menor en el asfalto envejecido que en el asfalto virgen; por otro lado, los valores de punto de ablandamiento y viscosidad son mayores en el asfalto envejecido que en el asfalto virgen. Los resultados obtenidos anteriormente se justifican en la medida en que el endurecimiento del asfalto es provocado por su proceso de envejecimiento, lo que indica que se puede penetrar menos. Así mismo, para que este asfalto envejecido vuelva a tener la misma fluidez se requiere de mayor temperatura, lo que está directamente relacionado con su punto de ablandamiento y viscosidad.

Al finalizar el ensayo de estabilidad y flujo por medio del ensayo Marshall, se puede concluir que los mejores resultados se obtuvieron al usar un 5,5% de asfalto en la mezcla con el 20% RAP y 80% de materiales vírgenes. Este valor es similar al conseguido al usar un 6% de asfalto en una mezcla de 100% de materiales vírgenes. Después de realizar un análisis estadístico (ANOVA), los resultados arrojaron que mientras la estabilidad no tuvo diferencias entre las dos mezclas, el flujo si las tuvo. A pesar de estas diferencias se puede observar que una de las mezclas estuvo en el rango y la otra muy cercano a él. Con lo anterior se puede deducir que se puede utilizar tanto una mezcla 100% de materiales vírgenes como una mezcla con 20% de RAP y 80% de materiales vírgenes.

Referencias

- [1] A. M. El-shorbagy, S. M. El-badawy, y A. R. Gabr, «Materiales de construcción», vol. 220, pp. 228-237, 2019.
- [2] R. B. Ahmed y K. Hossain, «Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, p. 116985, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116985.
- [3] O. Reyes-Ortiz, E. Berardinelli, A. E. Alvarez, J. S. Carvajal-Muñoz, y L. G. Fuentes, «Evaluation of Hot Mix Asphalt Mixtures with Replacement of Aggregates by Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Material», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 53, pp. 379-388, 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.889.
- [4] F. Leiva y A. Vargas, «Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP)», *Infraestruct. Vial*, vol. 19, n.º 33, pp. 35-44, 2017, doi: 10.15517/iv.v19i33.32921.
- [5] H. Majidifard, N. Tabatabaee, y W. Buttlar, «Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil», *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 6, n.º 4, pp. 396-406, 2019, doi: 10.1016/j.jtte.2018.11.002.
- [6] M. Dávila y P. Magaldi, «EFECTO DEL ACEITE RECICLADO DE COCINA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE MD-19 (60-70)», 2018.
<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23400/1/Efecto-del-aceite-reciclado-de-cocina-sobre-las-propiedades-físicas-y-mecánicas-de-MAC-MD-19-%2860-70%29.pdf>.
- [7] A. de la Fuente, «Diseño de una mezcla asfáltica de alto rendimiento para baches

- superficiales y profundos: tramo carretero Villahermosa - Teapa», Universidad de las Américas Puebla, 2007.
- [8] X. Vargas y F. Reyes, «El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos», *Ing. e Investig.*, vol. 30, n.º 3, pp. 27-44, 2010, [En línea]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v30n3/v30n3a03.pdf>.
- [9] A. Padilla, «Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista», 2004. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14&isAllowed=y>.
- [10] INVIAS, «Norma INV E – 450 – 13 Mezclas Asfálticas en caliente de gradación continua (Concreto asfáltico)», 2013.
- [11] EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN, «Norma de construcción pavimento asfáltico», pp. 1-9, 2017, [En línea]. Disponible en: https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-contratistas/normas-tecnicas/NC_MN_OC05_04_Pavimento_asfaltico_compressed.pdf?ver=tirV5QjM1g8CP
CM96-zlrg%3D%3D#:~:text=Esta norma tiene como propósito,de acuerdo a las dimensiones.
- [12] Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S., «Tipos de Mezclas Asfálticas», 2020. <https://ctu.com.co/mezcla-asfaltica-mdc-19/>.
- [13] F. Miranda y J. Aguiar, «Mezclas Asfálticas Con Rap: Pavimentos Asfálticos Reciclados», *PITRA-LanammeUCR*, vol. 10, n.º 1, p. 9, 2019.
- [14] D. Castiblanco y J. Campo, «USO DE REJUVENECEDOR EN PAVIMENTOS

- RECICLADOS (RAP) PARA ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE EN SITIO UTILIZADA COMO RODADURA EN CARPETA DIEGO», 2020.
<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24248/CastiblancoPrietoDiegoLuis2020.pdf;jsessionid=4F0E8B3B32081F6D09649C23086263BE?sequence=1>.
- [15] A. Behnood, «Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review», *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 171-182, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.209.
- [16] INVIAS, «Norma INV E – 732 – 13 Extracción cuantitativa del asfalto», 2013.
- [17] INVIAS, «Norma INVE-706-13. Penetración de materiales bituminosos», 2013.
- [18] H. Gutiérrez y R. de la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, 2.^a ed. 2008.
- [19] INVIAS, «Norma INVE-712-13. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos», 2013.
- [20] INVIAS, «Norma INVE-782-13. Análisis granulométrico de los agregados extraídos de las mezclas asfálticas», 2013.
- [21] INVIAS, «Norma INVE-748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall», 2013.
- [22] INVIAS, «Norma INVE- 744-13. Espesor o altura de especímenes compactados de mezclas asfálticas», 2013.
- [23] H. Li, B. Dong, W. Wang, G. Zhao, P. Guo, y Q. Ma, «Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt», *Appl. Sci.*, vol. 9, n.º 9, pp. 1-20, 2019, doi: 10.3390/app9091767.
- [24] R. S. Mullapudi, K. G. Deepika, y K. S. Reddy, «Relationship between Chemistry and Mechanical Properties of RAP Binder Blends», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, n.º 7, p.

- 04019124, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002769.
- [25] J. Zhang, X. Zhang, M. Liang, H. Jiang, J. Wei, y Z. Yao, «Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage», *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, p. 117778, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117778.
- [26] P. Aghazadeh Dokandari, D. Kaya, B. Sengoz, y A. Topal, «Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement», *World Congr. Civil, Struct. Environ. Eng.*, pp. 1-12, 2017, doi: 10.11159/icsenm17.142.
- [27] H. Asli, E. Ahmadiania, M. Zargar, y M. R. Karim, «Investigation on physical properties of waste cooking oil - Rejuvenated bitumen binder», *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 398-405, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042.
- [28] X. Yu, F. Dong, B. Xu, G. Ding, y P. Ding, «RAP Binder Influences on the Rheological Characteristics of Foamed Warm-Mix Recycled Asphalt», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, n.º 9, p. 04017145, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001993.
- [29] A. K. Apeagyei, «Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n.º 1, pp. 47-53, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.058.
- [30] J. Ji *et al.*, «Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 29, n.º 3, pp. 1-10, 2017, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001769.
- [31] J. Wang, W. Zeng, Y. Qin, Y. Zhang, S. Huang, y J. Xu, «Properties of Mixtures with High Percentages of Reclaimed SBS–Modified Asphalt Pavement», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, n.º 1, p. 04018354, 2019, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002532.
- [32] A. Dony, J. Colin, D. Bruneau, I. Drouadaine, y J. Navaro, «Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating

agent», *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp. 175-181, 2013, doi:
10.1016/j.conbuildmat.2012.11.031.