

**Uso del aceite residual de cocina como rejuvenecedor para el RAP proveniente del área metropolitana de Bucaramanga.**

**María Luisa Ramírez Camargo, Leidy Yohanna Silva Silva**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Civil**

**Director**

**Paola Andrea Moreno Yañez**

**Doctora en Ingeniería Química**

**Codirectores**

**Vladimir Plata Chávez**

**Doctor en Ingeniería Química**

**Víctor Gabriel Baldovino Medrano**

**Doctor en Ingeniería Química**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**División de Ingenierías y Arquitectura**

**Ingeniería civil**

**2022**

**Dedicatoria**

A mí madre, Zoraida Camargo por siempre tener fe en mi forma de actuar y por animarme en todos esos momentos importantes.

*María Luisa Ramírez Camargo*

A mis padres Joana Ximena Silva y Manuel Silva por ser incondicionales con su motivación y apoyo en todas las etapas de mi vida, por infundir en mi sus valores y principios que me han permitido cumplir mis metas.

*Leidy Yohanna Silva Silva*

### **Agradecimientos**

A nuestros padres, por su paciencia y apoyo incondicional durante este proceso para alcanzar un logro más.

A nuestra directora, la profesora Paolo Moreno Yáñez por su guía constante, su apoyo y por contagiarnos de su alegría en cada paso de este trabajo.

A nuestro codirector, el profesor Vladimir Plata Chavéz por cooperación y ayuda para resolver los problemas que se nos presentaron en el camino.

Finalmente, a todas las personas que nos colaboraron en este proceso.

## Contenido

Introducción .....	11
1. Uso del aceite residual de cocina como rejuvenecedor para el RAP proveniente del área metropolitana de Bucaramanga.....	12
1.1 Planteamiento del Problema.....	12
2. Justificación .....	14
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo General .....	16
3.2 Objetivos Específicos .....	16
4. Marco Referencial.....	16
4.1 Marco Teórico .....	16
4.1.1 Pavimento .....	17
4.1.2 Asfalto .....	17
4.1.3 RAP .....	19
4.1.4 Rejuvenecedores .....	20
5. Método .....	23
6. Resultados y análisis.....	34
7. Conclusiones.....	46
Referencias.....	48

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1.</b> <i>Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.</i>	19
<b>Tabla 2.</b> <i>Criterios para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall. ...</i>	30
<b>Tabla 3.</b> <i>Propiedades de los aceites. ....</i>	34
<b>Tabla 4.</b> <i>Propiedades del asfalto virgen. ....</i>	36
<b>Tabla 5.</b> <i>Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC. ....</i>	36
<b>Tabla 6.</b> <i>Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC. ....</i>	39
<b>Tabla 7.</b> <i>Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC (T= 150 °C, shear rate =34,3 Hz). ....</i>	41
<b>Tabla 8.</b> <i>Resultados del ensayo Marshall en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con AVC. ....</i>	43
<b>Tabla 9.</b> <i>Resultados del ensayo Marshall en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con ARC. ....</i>	44
<b>Tabla 10.</b> <i>Pruebas de múltiples rangos para las mezclas con mayor estabilidad. ....</i>	45

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1.</b> <i>Metodología general del proyecto.</i> .....	23
<b>Figura 2.</b> <i>Procedimiento de extracción del asfalto.</i> .....	25
<b>Figura 3.</b> <i>Extracción del asfalto envejecido del RAP por medio de la centrifuga.</i> .....	25
<b>Figura 4.</b> <i>Sistema de destilación de 1000 mL.</i> .....	26
<b>Figura 5.</b> <i>Procedimiento de mezcla del asfalto envejecido con el AVC o ARC.</i> .....	27
<b>Figura 6.</b> <i>Mezcla del asfalto envejecido con el AVC o ARC en la placa de calentamiento.</i> .....	27
<b>Figura 7.</b> <i>Procedimiento del ensayo de penetración.</i> .....	28
<b>Figura 8.</b> <i>Procedimiento del ensayo de punto de ablandamiento.</i> .....	29
<b>Figura 9.</b> <i>Ensayo de punto de ablandamiento para asfaltos.</i> .....	29
<b>Figura 10.</b> <i>Procedimiento para determinar el porcentaje de asfalto en las mezclas asfálticas.</i>	31
<b>Figura 11.</b> <i>Mezcla de los agregados con el asfalto.</i> .....	31
<b>Figura 12.</b> <i>Procedimiento para compactar las probetas.</i> .....	32
<b>Figura 13.</b> <i>Aplicación de los golpes de las probetas con el martillo de compactación.</i> .....	32
<b>Figura 14.</b> <i>Procedimiento para realizar el ensayo de estabilidad y flujo.</i> .....	33
<b>Figura 15.</b> <i>Probeta con RAP luego de soportar la carga de falla.</i> .....	33
<b>Figura 16.</b> <i>Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC.</i>	37
<b>Figura 17.</b> <i>Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC.</i>	38
<b>Figura 18.</b> <i>Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC.</i> .....	39
<b>Figura 19.</b> <i>Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC.</i> .....	40
<b>Figura 20.</b> <i>Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC....</i>	41

**Figura 21.** *Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC...* 42

**Figura 22.** *Estabilidad vs flujo para el 5% de asfalto de las mezclas tipo 1 y 2. ....* 44

### **Resumen**

Un problema al usar pavimento asfáltico reciclado (RAP) en mezclas asfálticas en caliente (HMA) es el envejecimiento del asfalto, para contrarrestarlo se añaden rejuvenecedores al RAP. En este trabajo se investigó el uso del aceite virgen de cocina (AVC) y del aceite residual de cocina (ARC) como rejuvenecedores del RAP, al realizar las pruebas de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad dinámica al asfalto del RAP con tres porcentajes de los rejuvenecedores se encontró que con un 5% se restauran las propiedades. Y al analizar el comportamiento mecánico de las mezclas de pavimento con RAP rejuvenecido se concluyó que la restauración del asfalto envejecido no depende de la degradación del aceite.

*Palabras Clave:* Pavimento asfáltico reciclado (RAP), Pavimentos sostenibles, rejuvenecedor, Aceite residual de cocina (ARC).



### **Abstract**

A problem of using reclaimed asphalt pavement (RAP) in hot mix asphalt (HMA) is the ageing of the asphalt, to counteract rejuvenators are added to the RAP. This work investigated the use of virgin cooking oil (VCO) and waste cooking oil (WCO) as rejuvenators of RAP, when testing of the penetration, softening point and dynamic viscosity to the asphalt of the RAP with three percentages of the rejuvenators, it was found that with 5% the properties are restored. And when analyzing the mechanical behavior of pavement mixtures with rejuvenated RAP, it was concluded that the restoration of aged asphalt does not depend on oil degradation.

*Keywords:* Reclaimed asphalt pavement (RAP), Sustainable pavements, rejuvenating, waste cooking oil (WCO).

**Abreviaturas**

HMA: Hot Mix Asphalt - Mezcla asfáltica en caliente.

SARA: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos.

RAP: Reclaimed Asphalt Pavement - Pavimento Asfáltico Reciclado.

AVC: Aceite Virgen de Cocina.

ARC: Aceite Residual de Cocina.

INVIAS: Instituto Nacional de Vías.

MDC: Mezcla Asfáltica Densa en Caliente.

NT: Nivel de Tránsito.

AV: Asfalto Virgen.

AE: Asfalto Envejecido.

ANOVA: Análisis de varianza para comparar múltiples medias.

## Introducción

El deterioro de los pavimentos es un efecto irreversible en las vías que genera grandes residuos además de un costo económico en la reparación y un costo ambiental en la extracción de nuevas materias primas. Debido a esto, diversos países han optado por incluir un porcentaje de pavimento asfáltico reciclado o RAP en nuevas mezclas asfálticas preparadas en caliente (HMA); acompañado de un rejuvenecedor capaz de mejorar las propiedades deterioradas del asfalto envejecido contenido en el RAP [1]. Al incluir rejuvenecedores y RAP se quiere mantener la calidad de la HMA y se busca que esta se comporte de forma similar que una HMA preparada al 100% con materiales vírgenes.

El-Shorbagy *et al.* y Asli *et al.* investigaron el impacto del ARC como rejuvenecedor mediante la evaluación de diversas características y encontraron que puede rejuvenecer las propiedades originales del asfalto envejecido y mejorar la resistencia al agrietamiento por fatiga. [2][3]

El propósito de este proyecto es conocer la eficiencia del AVC y del ARC como rejuvenecedores en mezclas asfálticas, y determinar si la degradación que sufre el AVC debido a que su uso influye en su capacidad de rejuvenecedor. Se determinó de forma cuantitativa el mejoramiento que tienen las propiedades del asfalto envejecido al adicionarle ambos rejuvenecedores, y posteriormente el RAP rejuvenecido se incorporó a mezclas con materiales vírgenes para finalmente conocer el efecto de los rejuvenecedores.

## **1. Uso del aceite residual de cocina como rejuvenecedor para el RAP proveniente del área metropolitana de Bucaramanga**

### **1.1. Planteamiento del Problema**

Las principales causas de la contaminación son la gran generación de desechos y la poca reutilización de estos, uno de los grandes generadores es el sector de la construcción, según la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) en Colombia la industria de la construcción consume el 40% de la energía y el 60% de los materiales extraídos de la tierra, además genera el 30% del CO<sub>2</sub> y el 40% de los residuos. Adicionalmente, se desperdicia el 20% de todos los materiales empleados en la obra [4].

En relación con las vías, estas obras están sometidas a cargas provenientes de vehículos, a diversos eventos climáticos; los cuales a través del tiempo generan desprendimientos, surcos, agrietamientos, y afectaciones a la carpeta asfáltica como el envejecimiento o cambio de los saturados, asfáltenos, resinas y aromáticos (SARA) el cual es un proceso químico que afecta directamente la durabilidad del pavimento [5].

El envejecimiento del asfalto consiste en un envejecimiento a corto plazo durante la mezcla y construcción, y en un envejecimiento a largo plazo durante la vida útil el cual ocurre principalmente debido a la oxidación y la pérdida de volátiles, aumentando así su rigidez. Los pavimentos con asfalto envejecido son más resistentes a la deformación permanente, sin embargo, son susceptibles al desarrollo de grietas [5].

La producción de residuos de pavimentos es un fenómeno inevitable por ende se recurre al reciclaje y a la reutilización de estos en otros procesos. Se conoce como RAP al material obtenido como parte del procedimiento de remoción de una capa asfáltica, la cual es utilizada

posteriormente en la reconstrucción o repavimentación de un tramo vial [6]. Cabe resaltar que el asfalto contenido en el RAP no posee las mismas propiedades físicas, mecánicas y reológicas que el de un asfalto contenido en un pavimento nuevo puesto que ha sufrido un envejecimiento, a causa de esto es necesario utilizar un rejuvenecedor que sea capaz de restablecer sus propiedades originales.

Los rejuvenecedores son capaces de reactivar y restaurar las propiedades originales del asfalto envejecido. El uso del AVC y del ARC como rejuvenecedores es una propuesta ecológica ampliamente estudiada ya que ambos poseen componentes de aceites ligeros similares al asfalto. Estudios recientes demostraron que el AVC y el ARC tienen un excelente potencial para ser utilizados como rejuvenecedores en la industria de una HMA [7].

En Colombia, según el Ministerio de Ambiente entre los años 2007 y 2014, se consumieron en promedio 513 mil toneladas anuales de aceites vegetales, de los cuales una tercera parte se convirtió en desecho [8]. El ARC termina vertido en los cuerpos de agua superficial alterando el ecosistema al causar erosión, pérdidas de fertilidad en los suelos y destrucción de hábitats de animales, a nivel urbano, obstruye las redes de alcantarillado y ocasiona dificultades en la disposición y sobrecostos a las plantas de tratamiento de agua [8]. Debido a lo anterior, utilizar ARC como un rejuvenecedor del RAP ayudaría a solucionar los problemas que este ocasiona al ambiente, además al experimentar con AVC como rejuvenecedor se busca comprobar si su deterioro influye sobre las propiedades del asfalto.

El uso del RAP en el reciclaje de pavimentos junto con el AVC y ARC como rejuvenecedores es una estrategia que diversos países se han dedicado a investigar, como, por ejemplo, en EE.UU., Leiva y Vargas afirman que la utilización de RAP en carreteras es importante para ayudar a compensar el aumento del precio de las materias primas, mejorar la

sostenibilidad de la infraestructura de transporte, preservar los recursos naturales y reducir la cantidad de escombros de construcción [9]. En China Li *et al.* encontraron que al agregar rejuvenecedores a los asfaltos envejecidos se disminuye la rigidez y se restauran las propiedades mejorando así la vida útil de los pavimentos [10].

Por lo tanto, en este trabajo se quiere conocer el efecto que el AVC y ARC produce sobre el asfalto contenido en el RAP evaluando propiedades mecánicas y reológicas como la penetración, el punto de ablandamiento y la viscosidad.

## 2. Justificación

La creación de pavimentos es una de las actividades constructivas que tiene mayor impacto sobre el medio ambiente, debido a la gran cantidad de CO<sub>2</sub> producido por el uso de recursos naturales no renovables para su construcción y mantenimiento, así como también el proceso de fresado para la carpeta asfáltica del pavimento flexible, el cual se realiza cuando ya ha cumplido con su vida útil, el fresado genera una gran cantidad de residuos al desechar la carpeta asfáltica. En la colocación de una nueva carpeta de HMA, el uso del RAP es viable para hacer de la construcción de pavimentos un proceso sostenible, disminuir los costos de producción y de contaminación.

El reciclaje de pavimentos asfálticos tiene un enfoque valioso por razones técnicas, económicas y ambientales. El uso de RAP se ha destacado sobre los materiales vírgenes ante el aumento del costo del asfalto, la escasez de agregados de calidad y la necesidad de preservar el medio ambiente [11]. El envejecimiento del asfalto es un fenómeno que hace que el pavimento no conserve sus propiedades a lo largo de su vida útil, se caracteriza por el endurecimiento

provocado por la pérdida de componentes volátiles, la oxidación progresiva del asfalto durante la construcción y el deterioro constante de dicho material. [12]

Muchas agencias han reportado ahorros significativos cuando se utiliza RAP en nuevas mezclas asfálticas, pero este puede causar problemas en el rendimiento del pavimento, por lo tanto, se han investigado diversos agentes que permitan revertir el proceso de envejecimiento del asfalto, entre los que se destacan el AVC y el ARC [3]. Utilizar estos rejuvenecedores ecológicos evita el uso de rejuvenecedores comerciales, y es una oportunidad de reciclaje para el ARC.

Las propiedades de los aceites dependen de diversos factores como el proceso de degradación y la temperatura durante la fritura, la presencia de impurezas y la calidad, que se determina por la presencia de ácidos grasos libres y otros componentes [13]. Un factor que puede influir en el rendimiento de los aceites como rejuvenecedores del asfalto contenido en el RAP, es la diferencia en la degradación del ARC con respecto al AVC.

Este proyecto de investigación se justifica en la necesidad de determinar la influencia del ARC y del AVC como rejuvenecedor del RAP sobre el rendimiento de una nueva mezcla asfáltica con el fin de que su comportamiento sea similar al de una mezcla asfáltica de materiales vírgenes, alcanzando las mismas propiedades físicas, mecánicas y reológicas, principalmente se pretende que este proceso pueda usarse en la construcción de pavimentos asfálticos del área metropolitana de Bucaramanga.

Actualmente, los proyectos que se enfatizan en la sostenibilidad son muy importantes y pertinentes, debido al gran impacto que tiene la construcción de obras civiles sobre el medio ambiente, y específicamente en la infraestructura del transporte, por eso, es preciso el desarrollo de materiales sostenibles y reciclados como el uso del RAP rejuvenecido con AVC y ARC en nuevas mezclas asfálticas para disminuir el impacto ambiental, sin ver un decrecimiento en la

eficiencia del comportamiento del pavimento. Finalmente, este proyecto se realiza con el fin de obtener el título universitario.

### **3. Objetivos**

#### **1.2. 3.1 Objetivo General**

Establecer la influencia de la degradación del aceite residual de cocina en su desempeño como rejuvenecedor de las propiedades del asfalto proveniente del RAP del área metropolitana de Bucaramanga.

#### **1.3. 3.2 Objetivos Específicos**

Analizar las propiedades físicas, químicas y reológicas del aceite virgen y aceite residual de cocina para su uso como rejuvenecedor en el RAP.

Establecer el porcentaje adecuado para restaurar las propiedades físicas y reológicas del asfalto proveniente del RAP utilizando aceite virgen y residual de cocina.

Determinar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas por el método Marshall utilizando asfalto proveniente del RAP rejuvenecido con aceite virgen y residual de cocina.

### **4. Marco Referencial**

#### **1.4. 4.1 Marco Teórico**

Este proyecto busca demostrar la influencia de los niveles de aceites residuales de cocina sobre el asfalto recuperado, por lo cual se plantea un marco teórico enfocado en los términos necesarios para comprender el desarrollo de los procesos que se describirán más adelante y un listado pequeño de países que han realizado investigaciones afines. El marco cuenta con la siguiente estructuración: Pavimentos, asfalto, RAP, rejuvenecedores y antecedentes.



#### ***4.1.1 Pavimento***

Un pavimento es una estructura vial formada por una o varias capas de materiales seleccionados, capaz de resistir las cargas impuestas por el tránsito y la acción del medio ambiente y de transmitir al suelo esfuerzos y deformaciones tolerables por éste. [14]

Hay dos tipos de pavimentos, rígidos y flexibles. Un pavimento es rígido debido a la consistencia de la superficie de rodadura, por lo cual se produce una buena distribución de las cargas, dando, así como resultado tensiones muy bajas en la subrasante. Y un pavimento flexible es aquel donde la superficie de rodadura suele tener menor rigidez, debido a esto se deforma con mayor facilidad y es susceptible a que se produzcan mayores tensiones en la subrasante. Las capas que forman un pavimento flexible son: carpeta asfáltica, base y subbase, las cuales se construyen sobre la capa subrasante [15].

#### ***4.1.2 Asfalto***

Es un material aglutinante de color oscuro, constituido por mezclas complejas de hidrocarburos no volátiles de alto peso molecular, originarios del petróleo crudo, en el cual están disueltos, pueden obtenerse por evaporación natural de depósitos localizados en la superficie terrestre, denominados asfaltos naturales, o por medio de procesos de destilación industrial cuyo componente predominante es el bitumen [15].

Los asfaltos que se usan como aglutinante en las mezclas en caliente deben cumplir con las exigencias de calidad dadas por las normas de la Sociedad Americana de Ensayos y Pruebas de Materiales (ASTM) y las especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

Las principales características que debe cumplir un asfalto para su uso en pavimentos asfálticos son la durabilidad, la adhesión, cohesión y endurecimiento; para medirlas se deben realizar los siguientes ensayos:

- INV-E 706 “Penetración de materiales bituminosos”.
- INV-E-712 “Punto de ablandamiento de materiales bituminosos”.
- INV-E-717 “Determinación de la viscosidad del asfalto empleando un viscosímetro rotacional” a una temperatura de 135 °C.

**4.1.2.1 Mezclas asfálticas.** Consisten en la combinación de asfalto, agregados y en algunos casos aditivos. Su proceso de producción se realiza con asfaltos a temperaturas alrededor de 150°C a 160°C, dependiendo de su viscosidad, con el fin de darle trabajabilidad a la mezcla y garantizar el total recubrimiento de todas las partículas del agregado. Estas mezclas asfálticas son utilizadas tanto en capas de rodadura como en capas inferiores de la estructura vial. Su instalación se realiza a elevadas temperaturas [16]. Los métodos y lineamientos aplicables a las mezclas asfálticas son:

- Método de Marshall, con la normatividad INV-E-748 de “Resistencia de Mezclas asfálticas en caliente empleando el apartado Marshall”, donde se determinan la densidad, estabilidad y flujo.
- El artículo 450 de “Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)” para determinar el tipo de mezcla y el tránsito [17].

Debido a las diversas clasificaciones que se les dan a las mezclas asfálticas es importante seleccionar el diseño de mezcla adecuado dependiendo de ciertas especificaciones. En principio, las mezclas pueden ser fabricadas en caliente o en frío; y, según su granulometría pueden ser

densas, semidensas o gruesas. La mezcla empleada en este trabajo es la MDC-19, la cual, se define como “Mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, con agregado de tamaño máximo 19 mm”. En la tabla 1 se muestra la granulometría de la mezcla densa MCD-19 tipo INVIAS que se usa para construir capas de rodaduras en vías con tráfico medio y alto [18].

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

TAMIZ (U.S. Standard)									
1 ½”	1”	¾”	½”	3/8”	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
% PASA									
		100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8

Adaptado de la tabla 450-6 del INVIAS [17].

#### 4.1.3 RAP

Mediante la sustitución de una parte de los materiales vírgenes con RAP en la capa intermedia y superficial del pavimento, se obtienen mayores beneficios económicos, ya que en estas capas se utiliza el asfalto que es el material más costoso. El uso de RAP también conserva la energía, preserva los recursos naturales y reduce la cantidad de escombros de construcción que se coloca en los vertederos. Además, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del uso de RAP se presenta principalmente por la distancia más corta o nula de acarreo del RAP para formar las nuevas mezclas [9].

Los siguientes ensayos se realizan para la extracción del asfalto en el pavimento, y para la determinación de la granulometría:

- INV-E-732 “Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos”, describe los métodos para la determinación cuantitativa del asfalto en HMA y en muestras tomadas de pavimentos.

- INV-E-782 “Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas” 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.

#### **4.1.4 Rejuvenecedores**

Para minimizar el efecto del envejecimiento del asfalto, se debe incluir un rejuvenecedor en la mezcla recuperada para restaurar la proporción original de asfaltenos y máltenos en el asfalto envejecido. Según Behnood existen dos tipos de agentes rejuvenecedores [5]:

- Los agentes suavizantes, se utilizan principalmente para reducir la viscosidad del asfalto envejecido, reponer los volátiles y aceites dispersantes mientras promueve la adhesión.
- Los agentes rejuvenecedores de tipo orgánico son aptos para recuperar las propiedades físicas del asfalto envejecido.

En los últimos años, el uso de rejuvenecedores de tipo orgánico se aplica en HMA para sellar virutas y prolongar la vida útil de las carreteras. Con la demanda de rejuvenecedores, se ha investigado la aplicación de productos de desecho como el aceite residual de motor y el ARC [10].

**4.1.4.1 Aceite residual de cocina (ARC).** El ARC es aquel que se desecha de los restaurantes, industrias alimentarias y hogares luego de su uso. Este aceite residual cuenta con unas propiedades químicas que mejorarían las condiciones del asfalto envejecido [13].

El uso del ARC como rejuvenecedor se ha contemplado en diversos países. Por ejemplo, en Egipto se hicieron pruebas para medir las propiedades físicas y químicas del asfalto

envejecido y rejuvenecido, como la prueba de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad. En general, esta investigación mostró que el ARC puede rejuvenecer el asfalto del grupo 30/40 a las propiedades del grupo 60/70 del asfalto [2].

**4.1.4.1.1 Diferentes niveles de degradación en el ARC.** La degradación del aceite está relacionada con variables del proceso de fritura, tales como si el proceso es continuo o discontinuo, la temperatura, el tiempo de fritura y la velocidad de reposición del aceite. El alimento que se fríe también influye por su propia composición lipídica, los macro y micronutrientes que contiene. Los procesos de fritura en los aceites generan diversas reacciones que afectan su composición y dificultan predecir la evolución de su comportamiento, ya que el número de variables involucradas es mayor [19].

Durante el proceso de fritura, el aceite sufre una serie de reacciones tales como hidrólisis, oxidación, polimerización, etc.

- **Hidrólisis:** al momento de freír en aceite caliente, el vapor de agua proveniente del alimento reacciona con los triglicéridos produciendo su hidrólisis, produciendo ácidos grasos libres, monoglicéridos, diglicéridos y glicerol. Los triglicéridos que poseen ácidos grasos de cadena corta son más sensibles a la hidrólisis que aquellos que tienen cadena larga [19].
- **Oxidación:** las reacciones de oxidación de los aceites se producen fundamentalmente en los ácidos grasos insaturados de los triglicéridos, descomponiéndolos y formando peróxidos a partir del rompimiento de los enlaces. El oxígeno atmosférico reacciona con el aceite en la superficie de contacto y ataca a los dobles enlaces y como consecuencia se pueden producir olores desagradables en los aceites [19].

- Polimerización: los hidroperóxidos formados se descomponen rápidamente formando compuestos de bajo peso molecular, favoreciendo la formación de compuestos diméricos, a partir de ellos, se generan oligómeros de mayor peso molecular. Entre los compuestos que pueden formarse están: triglicéridos cíclicos monoméricos, dímeros y polímeros de triglicéridos [19].

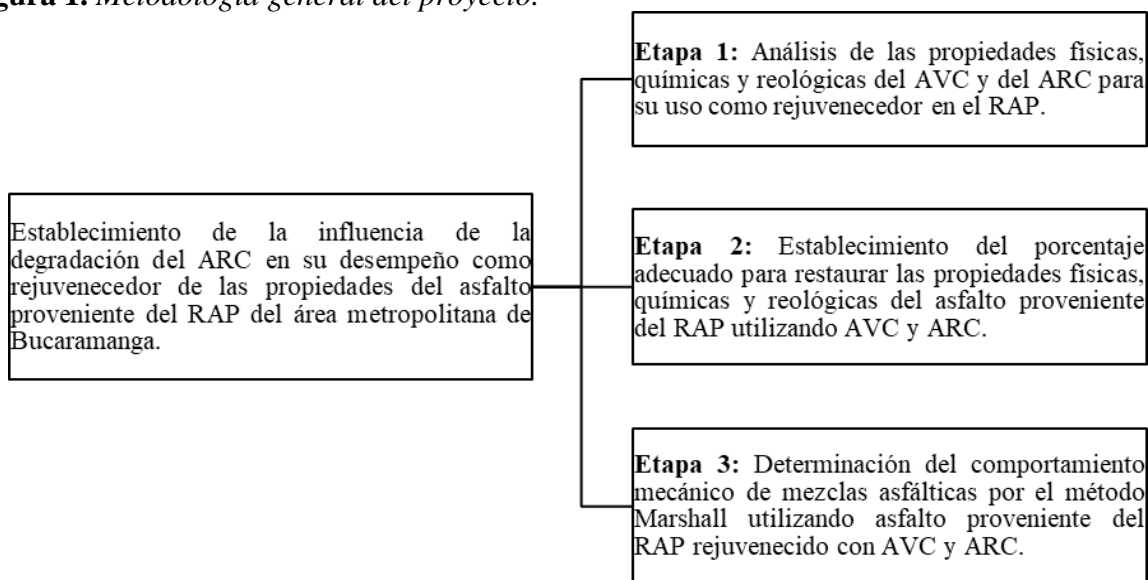
Existen ciertos parámetros que permiten determinar la calidad de los aceites vegetales, tales como:

- Índice de acidez: corresponde a la suma de los ácidos grasos no combinados, resultado de la hidrólisis. El índice de acidez se reporta en mg de KOH o NaOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres de 1 g de aceite o grasa. Generalmente, el AVC contiene ácidos grasos libres en pequeñas cantidades. Para el consumo, el aceite no puede contener ácidos grasos libres más allá de un límite dado, ya que se consideran como impureza [20].
- Índice de peróxidos: una de las causas del deterioro de un aceite es la rancidez, producida por la oxidación. El grado de oxidación se establece mediante el índice de peróxidos, el cual se reporta en miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de aceite (mEq/kg) [20].
- Viscosidad dinámica: es la propiedad de los fluidos que se caracteriza por su resistencia a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas. En el sistema internacional se mide en pascales por segundo, pero la unidad más utilizada es el centipoise (cP), equivalente a 1 mPa\*s [21].

## 5. Método

La metodología de este proyecto consistió en 3 etapas correspondientes a determinadas actividades para cada objetivo específico del proyecto.

**Figura 1.** Metodología general del proyecto.



A continuación, se describe como se realizó cada etapa del proyecto:

1. Etapa 1: análisis de las propiedades físicas, químicas y reológicas del AVC y del ARC para su uso como rejuvenecedor en el RAP.

Con el fin de realizar el análisis comparativo entre las propiedades del AVC y el ARC, se seleccionó el aceite comercial "Gota de oro", el cual consiste en una mezcla de aceites vegetales, aceite de soya y oleína de palma. Para conseguir el ARC de alta degradación, el AVC seleccionado se sometió a un proceso de cocción, se prepararon papas fritas a una temperatura de 180 °C por un tiempo de 4 horas durante 4 días. Este proceso fue realizado por la joven investigadora María Angélica Corzo, durante la ejecución del proyecto "Desarrollo de una ruta de valorización del aceite residual de cocina para su reutilización como rejuvenecedor de

pavimento asfáltico reciclado (RAP)” en la etapa 1: “Estudio de la relación entre el proceso de cocción y las propiedades del aceite residual de cocina, y caracterización del RAP” dirigido por Vladimir Plata Chávez y Paolo Andrea Moreno Yáñez, durante el año 2020. Las muestras de AVC y ARC fueron caracterizadas midiendo las siguientes propiedades:

- Índice de acidez por medio de la norma AOCS Cd3d-63.
- Índice de peróxidos por medio de la norma AOCS Cd8-53.
- Viscosidad dinámica a partir de la norma ASTM D2196.

Los resultados obtenidos en las tres pruebas nombradas anteriormente fueron utilizados en este proyecto de grado para comparar y analizar las propiedades de los aceites.

**2.** Etapa 2: establecimiento del porcentaje adecuado para restaurar las propiedades físicas y reológicas del asfalto proveniente del RAP utilizando AVC y ARC.

Para la realización de esta fase se realizaron las siguientes actividades:

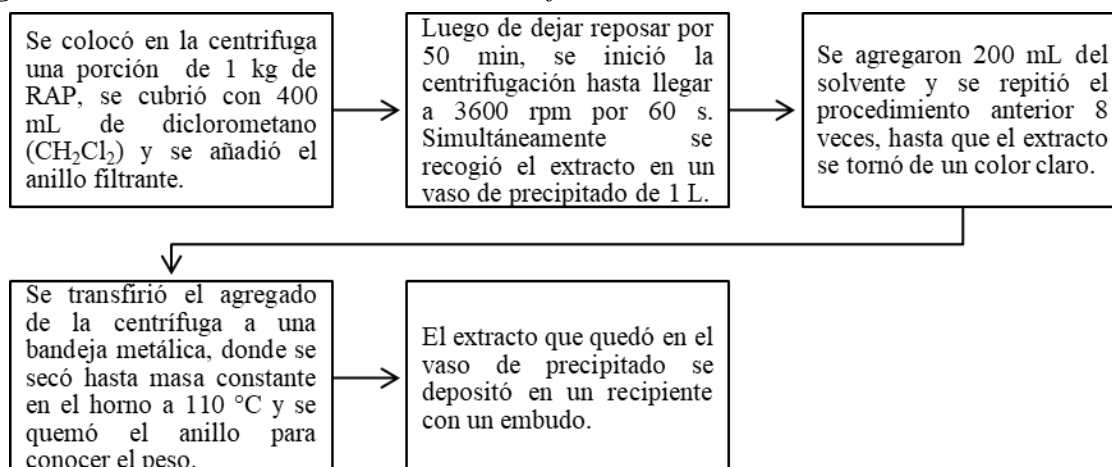
**1.** Recolección y preparación de las muestras de RAP.

Se obtuvieron muestras de RAP como producto del proceso de fresado de tres vías para una rehabilitación vial ubicadas en el Km 4 en la vía Lebrija – Girón y en el Km 3 vía Bucaramanga – Aeropuerto Palonegro. En el laboratorio, se procedió a obtener su peso en seco secando el RAP en el horno a 110 °C. Y finalmente se tamizaron por el tamiz de 1 in.

**2.** Extracción del asfalto presente en el RAP.

El asfalto se extrajo del pavimento siguiendo la norma INV-E-732 de “Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos” utilizando diclorometano, según la figura 2:



**Figura 2.** Procedimiento de extracción del asfalto.**Figura 3.** Extracción del asfalto envejecido del RAP por medio de la centrifuga.

Terminado el procedimiento anterior se calculó el porcentaje de asfalto por medio de la siguiente fórmula, la cual es una adaptación de la formula número 732.5 del INVIAS [22]:

$$\% \text{ de asfalto} = \left[ \frac{W_1 - W_3}{W_1} \right]$$

Donde:

$W_1$ : Masa de la porción de ensayo.

$W_3$ : Masa del agregado del mineral extraído.

Nota:  $W_3$  es la suma de la masa del agregado con el anillo, la masa del mineral y lo que queda en la tela de filtrado.

Con el extracto resultante se procedió a realizar la destilación para obtener el asfalto envejecido. Se empleó un montaje con un balón de 1000 mL, y una temperatura entre los 40°C y 45°C a presión atmosférica. Una vez se evaporó el diclorometano presente en el extracto, el asfalto envejecido en estado líquido se vertió en un recipiente de vidrio previamente tarado.

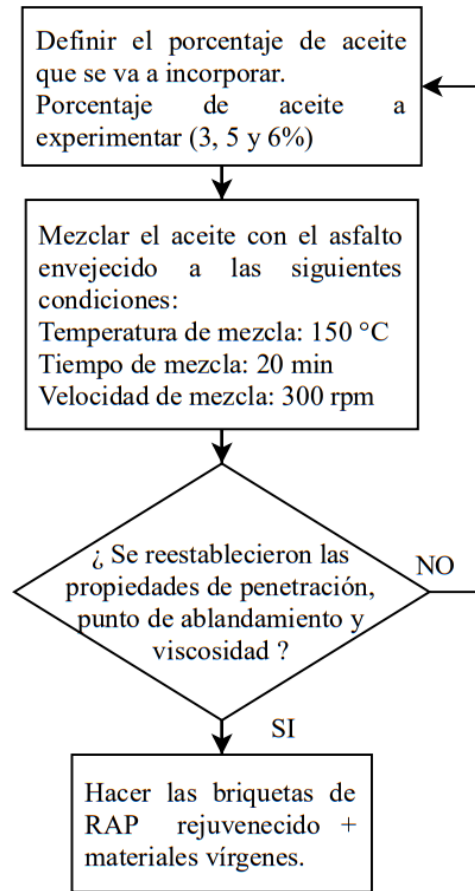
**Figura 4.** *Sistema de destilación de 1000 mL.*



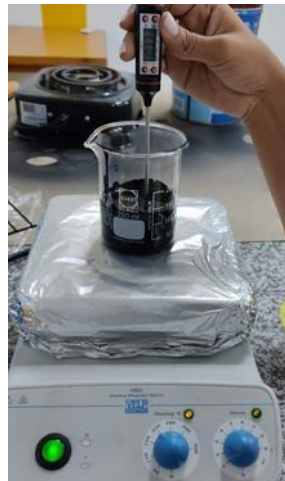
3. Determinación del porcentaje adecuado de AVC y ARC para el restablecimiento de las propiedades del asfalto envejecido.

En la figura 5 se presentan las condiciones utilizadas para llevar a cabo esta actividad.

**Figura 5.** Procedimiento de mezcla del asfalto envejecido con el AVC o ARC.



**Figura 6.** Mezcla del asfalto envejecido con el AVC o ARC en la placa de calentamiento.

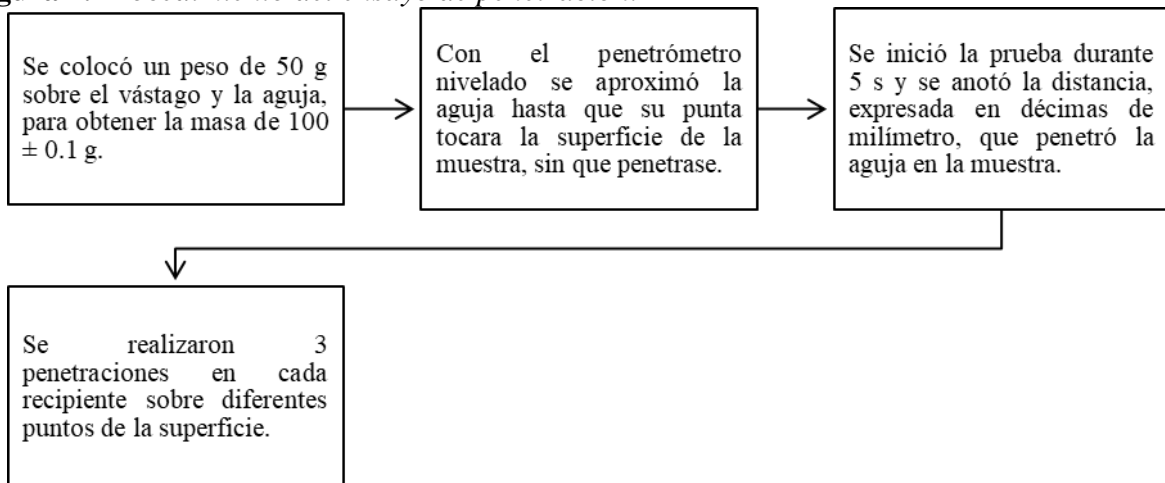


4. Determinación de las propiedades físicas y reológicas del asfalto rejuvenecido con AVC y ARC.

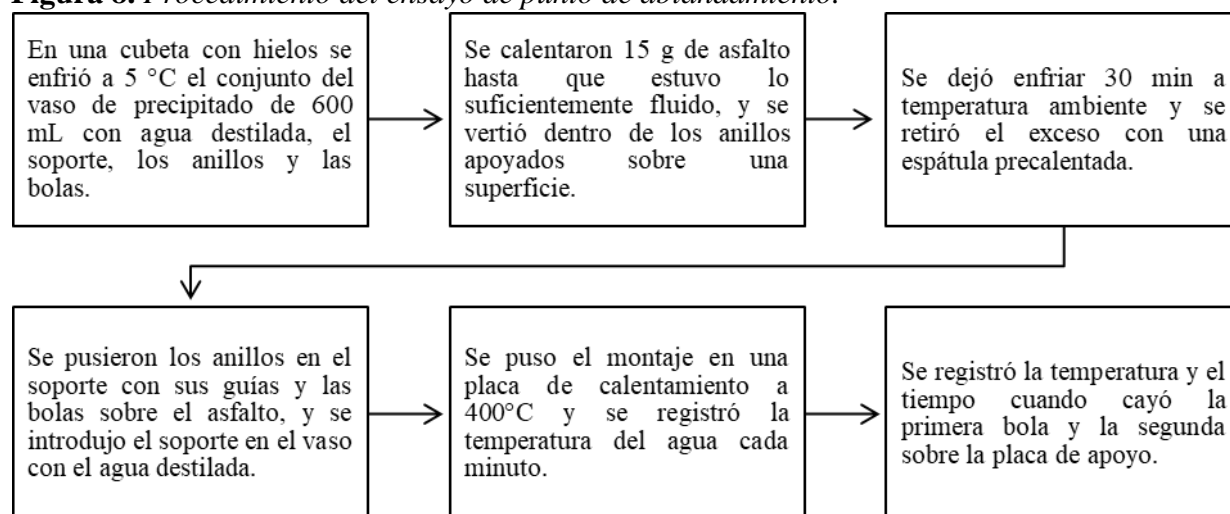
Para cumplir esta actividad se ejecutaron los ensayos de penetración y punto de ablandamiento.

- Penetración: se determinó con la norma INVE 706-13 “Penetración de materiales bituminosos”. Con un penetrómetro de aguja normalizada se penetraron las muestras de asfalto bajo las condiciones especificadas en la figura 7.

**Figura 7.** Procedimiento del ensayo de penetración.



- Punto de ablandamiento: se determinó con la norma INV-E-712 “Punto de ablandamiento de materiales bituminosos”. En la figura 8, se describen la preparación de la muestra y el ensayo realizado.

**Figura 8.** Procedimiento del ensayo de punto de ablandamiento.

*Nota:* El punto de ablandamiento por el método de anillo y bola se expresó como el valor medio de las dos determinaciones realizadas en el último paso descrito.

**Figura 9.** Ensayo de punto de ablandamiento para asfaltos.

Para determinar la viscosidad dinámica del asfalto, se contrató un servicio técnico en el Centro de Investigaciones en Catálisis (CICAT) de la Universidad Industrial de Santander.

Con el fin de determinar el porcentaje de AVC y ARC que restablece las propiedades del asfalto envejecido sin que exista una diferencia estadísticamente significativa con un 95% de confianza con el asfalto virgen, a los resultados de los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y viscosidad se les realizó el análisis de varianza – ANOVA y la prueba de múltiples rangos utilizando Statgraphics Centurion XVI Versión 16.1.03.

3. Etapa 3: determinación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas por el método Marshall utilizando asfalto proveniente del RAP rejuvenecido con AVC y ARC.

Para cumplir la última etapa se realizaron probetas de pavimento caracterizadas por medio de la norma INV-E-748 de “Resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el apartado Marshall”.

Para determinar el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas es necesario conocer el porcentaje de asfalto cuyos valores de estabilidad, flujo y la relación de estas características cumple con lo expuesto en la tabla 2.

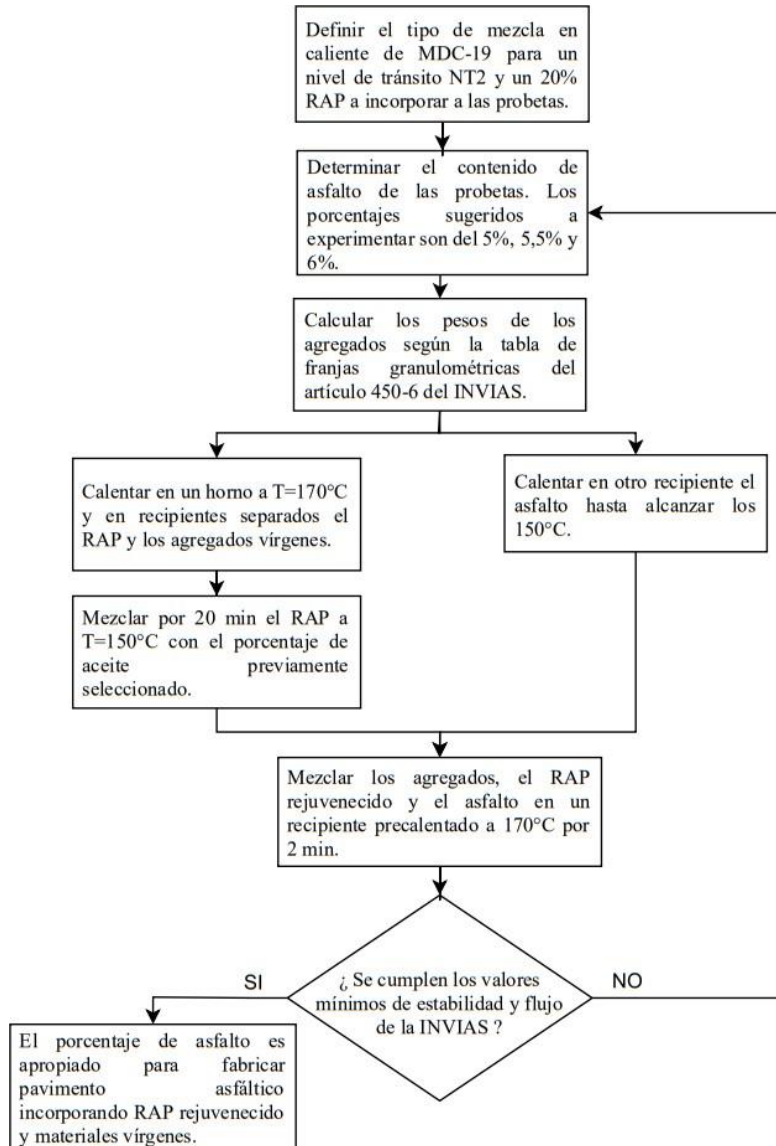
**Tabla 2.** *Criterios para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente por el método Marshall.*

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

Adaptado de la tabla 450-10 del INVIAS [17].

Según el artículo 462 en el diseño de una mezcla asfáltica con RAP, el material reciclado no debe constituir más del 40% del total de la mezcla [17], debido a esto en este proyecto se experimentó con un 20% de RAP. Por lo tanto, para realizar los dos tipos de mezcla, siendo la mezcla 1 con 80% de materiales vírgenes y 20% de RAP rejuvenecido con AVC, y la mezcla 2 con 80% de materiales vírgenes y 20% de RAP rejuvenecido con ARC, se siguió el procedimiento de la figura 10.

**Figura 10.** Procedimiento para determinar el porcentaje de asfalto en las mezclas asfálticas.



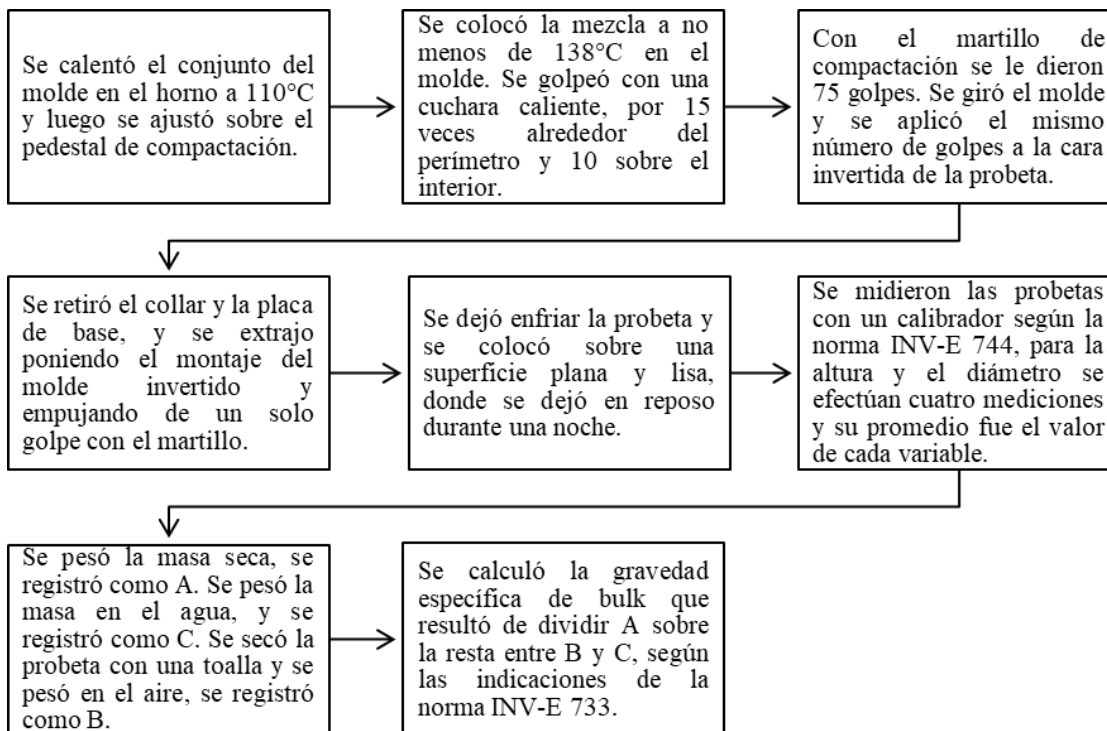
**Figura 11.** Mezcla de los agregados con el asfalto.



La metodología de este ensayo se dividió en varias etapas, la preparación de mezclas, la compactación de probetas y el ensayo de estabilidad y flujo. En la figura 10 solo se tiene en cuenta la preparación de las probetas, por lo que, a continuación, se muestra la metodología de compactación, de ensayo de estabilidad y flujo de las probetas.

### 1. Compactación de probetas.

**Figura 12.** Procedimiento para compactar las probetas.



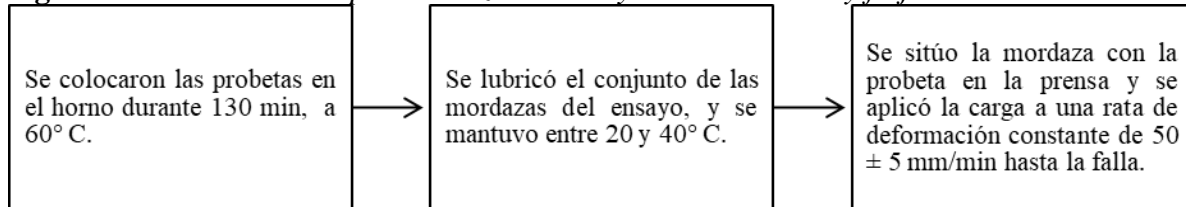
**Figura 13.** Aplicación de los golpes de las probetas con el martillo de compactación.



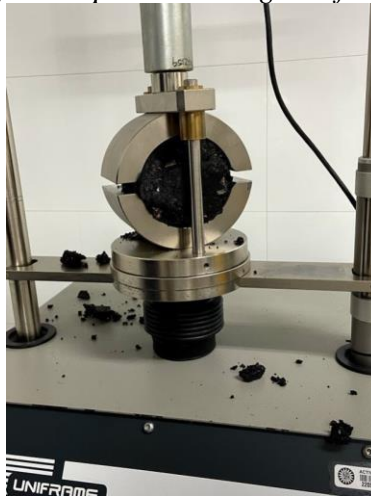


2. Ensayo de estabilidad y flujo: este procedimiento se realizó a todas las probetas en las 24 horas posteriores a la compactación de las probetas.

**Figura 14.** Procedimiento para realizar el ensayo de estabilidad y flujo.



**Figura 15.** Probeta con RAP luego de soportar la carga de falla.



Se elaboraron 18 probetas con tres porcentajes diferentes de asfalto en el pavimento, los cuales fueron: 5, 5,5 y 6%. Las probetas fueron cilíndricas de 102 mm de alto y 63,5 mm de diámetro con una masa de 1500 g. Los resultados se analizaron con el ANOVA o análisis de varianza y la prueba de múltiples rangos utilizando el programa estadístico Statgraphics Centurion XVI Versión 16.1.03.

## 6. Resultados y análisis

A continuación, se describen los resultados de las etapas presentadas en la sección de método.

1. Etapa 1: análisis de las propiedades físicas, químicas y reológicas del AVC y del ARC para su uso como rejuvenecedor en el RAP.

En la tabla 3, se presentan las propiedades del AVC y del ARC obtenidas de acuerdo con lo descrito en la sección de metodología:

**Tabla 3.** *Propiedades de los aceites.*

<b>Propiedad</b>	<b>AVC</b>	<b>ARC</b>	<b>Unidades</b>
Índice de acidez	0,1432	0,6198	mg de KOH/g
Índice de peróxidos	2,7350	12,1212	mEqO <sub>2</sub> /kg
Viscosidad dinámica (40°C)	29,23	41,78	cP

Los aceites son considerados estructuralmente menos complejos que las proteínas ya que están formados en un 95-99% por triglicéridos, los cuales son compuestos relativamente simples y el porcentaje restante es diglicéridos, monoglicéridos, ácidos grasos libres, fosfolípidos esteroides y estéril glucósidos [19].

Cuando el aceite se somete a altas temperaturas en presencia de aire y humedad durante el proceso de fritura, se producen las reacciones de degradación, donde los dobles enlaces del aceite se rompen y, por lo tanto, su composición de ácidos grasos cambia, el nivel de ácidos grasos libres y el grado de saturación aumentan. El cambio en la composición de los ácidos grasos influye en el índice de acidez, el índice de peróxidos y en la viscosidad. Estas propiedades se usan para medir y controlar la calidad del aceite [23].

En la Tabla 3 se observa que el índice de acidez, el índice de peróxidos y la viscosidad dinámica del ARC son mayores que los del AVC. Estos valores son los esperados, puesto que

indican una degradación en las propiedades del aceite debido a las reacciones de hidrólisis, polimerización y oxidación ocurridas durante la cocción. El incremento del índice de acidez del ARC posiblemente se debe a la conversión de los triglicéridos en ácidos grasos libres. El índice de acidez posee relación con la viscosidad del aceite ya que entre mayor es el índice de acidez mayor es el contenido de ácidos grasos libres, luego, la viscosidad aumenta en el ARC [20].

El índice de peróxidos depende de la cantidad de tiempo que el aceite está en contacto con el oxígeno durante la cocción, por lo tanto, a mayor tiempo de cocción habrá una mayor posibilidad de incrementar este índice. Los peróxidos son partículas altamente reactivas e inestables que van a seguir reaccionando si se les permite, es decir, pueden continuar degradando u oxidando el aceite. Y aumentan el valor de viscosidad al generar productos secundarios de oxidación como los ácidos grasos libres [20].

A pesar del aumento de las propiedades, se observa que el índice de acidez y la viscosidad no tuvieron un incremento en el orden de magnitud y en el índice de peróxidos el aumento fue de un solo orden de magnitud.

De acuerdo con el INVIAS Art. 462, es posible agregar rejuvenecedores al RAP para restablecer sus propiedades, y deben ser un material orgánico cuyas características químicas y físicas permitan devolverle al asfalto envejecido las condiciones necesarias para el buen comportamiento de la nueva mezcla [22].

Se considera que a pesar del aumento de las propiedades del ARC con respecto al AVC es posible utilizar los dos como rejuvenecedores, puesto que se han realizado estudios alrededor del mundo sobre la reutilización del ARC altamente degradado [13]. Por ejemplo, en la investigación de Li *et al.* se utiliza como rejuvenecedor el ARC con una viscosidad de 59 cP a 60 °C [24], que es similar a la viscosidad del ARC de la tabla 3, que es de 41,78 cP a 40 °C.

2. Etapa 2: establecimiento del porcentaje adecuado para restaurar las propiedades físicas y reológicas del asfalto proveniente del RAP utilizando aceite virgen y residual de cocina.

En esta sección, se reportan los resultados de la metodología correspondiente a la caracterización del asfalto virgen (AV) y el asfalto envejecido (AE), extraído de los 63 kg de RAP recolectados para esta etapa. De acuerdo con Manufactura y procesos industriales LTDA, el AV tiene las propiedades de penetración y punto de ablandamiento que se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4.** *Propiedades del asfalto virgen.*

Propiedad	Especificación		Reporte de control de calidad
	Mínimo	Máximo	
Penetración (mm)	6	7	6,7
Punto de ablandamiento (°C)	48	54	49,2

Adaptado de Reporte de calidad de asfaltos de penetración 60-70 MPI, Manufactura y procesos industriales LTDA, 2021.

Seguidamente, en la tabla 5 se muestran los valores obtenidos de la penetración de las respectivas mezclas, los datos de AV y AE se tomaron de la investigación “Comparación de mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP” [25].

**Tabla 5.** *Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC.*

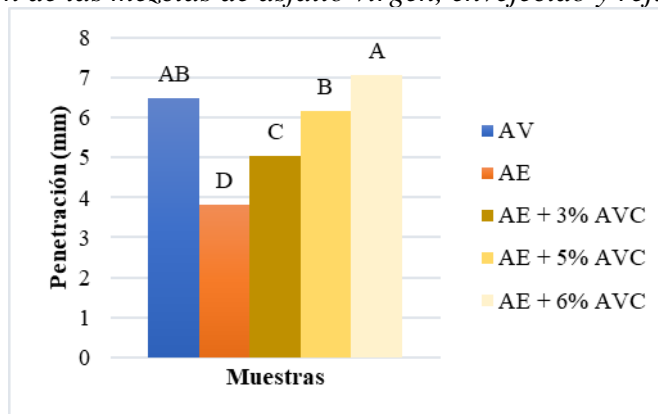
Mezclas	Promedio (mm)	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
AV	6,48	0,20	3,12
AE	3,82	0,53	13,88
AE + 3% AVC	5,05	0,28	5,51
AE + 5% AVC	6,18	0,33	5,38
AE + 6% AVC	7,07	0,08	1,08
AE + 3% ARC	4,43	0,10	2,35
AE + 5% ARC	6,05	0,00	0,00
AE + 6% ARC	7,35	0,38	5,14

Nota: AV: Asfalto virgen, AE: Asfalto envejecido, AVC: Aceite virgen de cocina, ARC: Aceite residual de cocina.

En la figura 16, se observa la penetración del AV y el AE en comparación con las muestras que contienen mezclas de AE + AVC. Se observa que la penetración del AV fue de  $6,48 \pm 0,2$  mm, la cual, se encuentra entre los valores mínimos y máximos de la tabla 4, la penetración del AV es mayor que la del AE, lo cual es coherente con el proceso de envejecimiento puesto que se alteran las propiedades de forma progresiva en el transcurso de la vida útil.

De acuerdo con la prueba ANOVA, existe una diferencia estadísticamente significativa entre al menos dos medidas (valor-p = 0,0000). Con el fin de averiguar si entre estas medidas existen grupos homogéneos, se realizó la prueba de múltiples rangos y se asignaron los grupos A, B, C y D, de los cuales, los que no poseen diferencias estadísticamente significativas entre sí, se les asignó el mismo grupo homogéneo. De acuerdo con los resultados la penetración obtenida de las mezclas de AE con porcentajes de 5% y 6% de AVC no tienen una diferencia estadísticamente significativa con la penetración del AV.

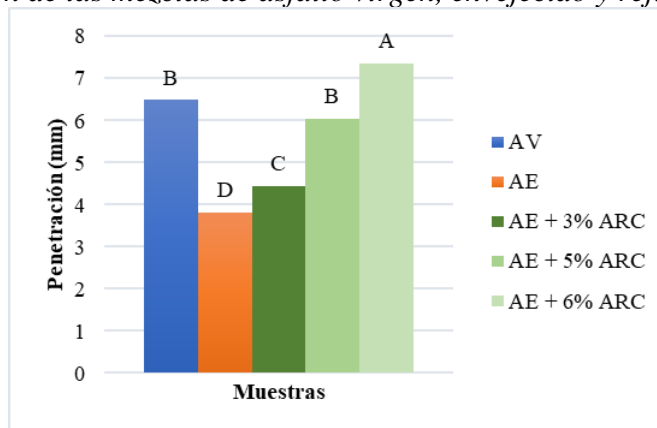
**Figura 16.** Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC.



La penetración del AV y AE en comparación con las muestras que contienen mezclas de AE + ARC se muestra en la figura 17. Para los datos que fueron obtenidos con ARC, por medio

de la prueba ANOVA se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre al menos dos medidas de penetración (valor-p = 0,0000). En la prueba de múltiples rangos se asignaron los grupos homogéneos A, B, C y D, de acuerdo con los resultados la penetración obtenida de la mezcla de AE con el 5% de ARC no tienen una diferencia estadísticamente significativa con la penetración del AV. Para los dos tipos de aceite, AVC y ARC, el 5% es el porcentaje que restaura la penetración del AE, adicionalmente se observa que, a mayor porcentaje de aceite añadido hay una mayor penetración, esto demuestra su potencial como rejuvenecedor para el asfalto contenido en el RAP.

**Figura 17.** Penetración de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC.



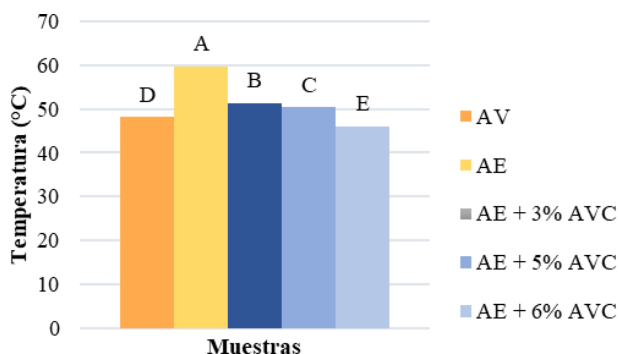
En la tabla 6 se muestran los valores obtenidos de punto de ablandamiento para las mezclas de asfalto con los aceites como rejuvenecedor, los datos correspondientes a AV y AE se tomaron de [25]. Así mismo, el punto de ablandamiento del AV fue de  $48,1 \pm 0,95$  °C, el cual, se encuentra entre los valores mínimos y máximos de la tabla 4, en comparación el AE tiene un valor mayor ya que equivale a  $59,73 \pm 1,33$  °C.

**Tabla 6.** Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC.

Mezclas	Promedio (°C)	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
AV	48,10	0,95	1,98
AE	59,73	1,33	2,23
AE + 3% AVC	51,33	0,58	1,12
AE + 5% AVC	50,33	0,38	0,75
AE + 6% AVC	46,03	0,75	1,63
AE + 3% ARC	51,88	0,08	0,15
AE + 5% ARC	49,90	1,65	3,31
AE + 6% ARC	46,18	1,22	2,63

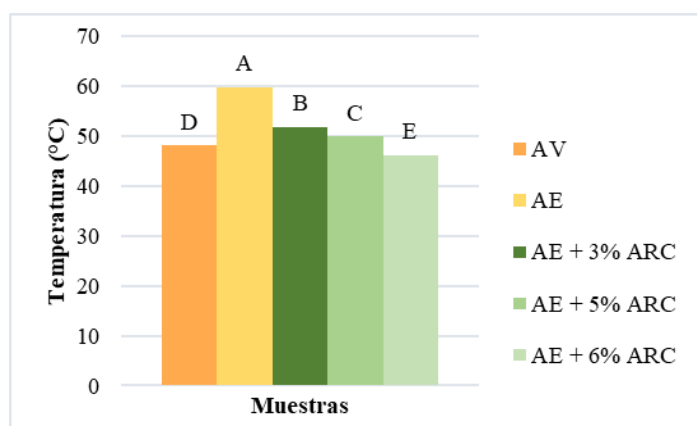
Nota: AV: Asfalto virgen, AE: Asfalto envejecido, AVC: Aceite virgen de cocina, ARC: Aceite residual de cocina.

De la misma forma que con la penetración, el punto de ablandamiento del AV y AE en comparación con las muestras de AE + AVC se encuentran en la figura 18. Para las muestras obtenidas con AVC, en la prueba ANOVA se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre todas las medidas de punto de ablandamiento (valor-p = 0,0000). En la prueba de múltiples rangos se asignaron los grupos homogéneos A, B, C, D y E, y de acuerdo con los resultados todas las mezclas tienen una diferencia estadísticamente significativa. Sin embargo, se evidencia que el punto de ablandamiento de la mezcla de AE + AVC en un 3% y 5% se restaura, alcanzando el rango reportado en la tabla 4.

**Figura 18.** Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC.

En la figura 19 se muestra el punto de ablandamiento del AV y AE en comparación con las muestras que contienen mezclas de AE y ARC, en la prueba ANOVA se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre todas las medidas del punto de ablandamiento (valor-p = 0,0000). Además, en la prueba de múltiples rangos al asignar los grupos homogéneos A, B, C, D y E se encontró que todas las mezclas tienen una diferencia estadísticamente significativa. Se evidencia que el punto de ablandamiento de la mezcla de AE + ARC en un 3% y 5% se restaura, alcanzando el rango reportado en la tabla 4.

**Figura 19.** Punto de ablandamiento de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC.



En la tabla 7 se presenta la viscosidad dinámica, a una temperatura de 150°C y con una tasa de deformación o shear rate de 34,3 Hz, para las muestras de AV, AE y las mezclas de aceites con asfalto envejecido. Se observa que el promedio de la viscosidad del AE con respecto al del AV aumenta, esto se debe al envejecimiento del asfalto. Al adicionar los aceites rejuvenecedores en los porcentajes de 3%, 5% y 6%, la viscosidad disminuyó considerablemente, también se evidencia que a mayor porcentaje de aceite añadido la viscosidad se reduce acercándose de forma significativa al valor del asfalto virgen.

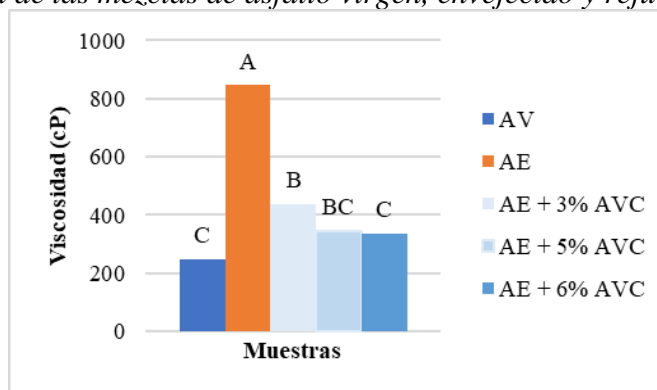


**Tabla 7.** Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC y ARC ( $T= 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $shear\ rate = 34,3\text{ Hz}$ ).

Mezclas	Promedio (cP)	Desviación Estándar	Coefficiente de variación
AV	247,44	0,53	0,22
AE	845,20	111,31	13,17
AE + 3% AVC	438,05	5,63	1,29
AE + 5% AVC	345,88	1,29	0,37
AE + 6% AVC	335,62	1,67	0,50
AE + 3% ARC	393,88	27,95	7,10
AE + 5% ARC	387,80	25,10	6,47
AE + 6% ARC	325,78	25,06	7,69

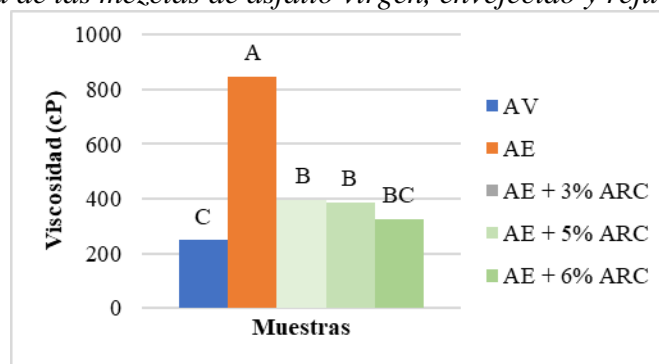
Nota: AV: Asfalto virgen, AE: Asfalto envejecido, AVC: Aceite virgen de cocina, ARC: Aceite residual de cocina.

En la figura 20 se muestra la viscosidad del AV y AE en comparación con las mezclas de AE + AVC, en la prueba ANOVA se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre al menos dos medidas (valor-p = 0,0000). Posteriormente, en la prueba de múltiples rangos se asignaron los grupos homogéneos A, B y C. Se observa que la viscosidad de la mezcla de AE + AVC en un 5% y 6% se encuentra en el mismo grupo homogéneo que el AV, y en la tabla 7 se observa que este porcentaje es el que más se acerca al valor de la viscosidad del AV.

**Figura 20.** Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con AVC.

Se observa en la figura 21 la viscosidad del AV y AE en comparación con las mezclas de AE + ARC. Con la prueba ANOVA se encontró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre al menos dos medidas (valor-p = 0,0000). Se encontró que al asignar los grupos homogéneos A, B y C, la viscosidad de la mezcla de AE + ARC en un 6% se encuentra en el mismo grupo homogéneo que el AV ya que este porcentaje es el que más se acerca al valor de su viscosidad.

**Figura 21.** Viscosidad de las mezclas de asfalto virgen, envejecido y rejuvenecido con ARC.



De acuerdo con los análisis presentados se estableció un porcentaje de 5% para restaurar las propiedades físicas y reológicas del asfalto proveniente del RAP utilizando AVC y ARC. Un valor similar fue encontrado por Aghazadeh et al, quienes demostraron que un contenido de ARC de 5,1% puede rejuvenecer el asfalto envejecido del grupo 30/40 a un nivel de 50/70, con un valor de penetración de 6,3 mm y un punto de ablandamiento de 55,3 °C [26].

3. Etapa 3: determinación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas por el método Marshall utilizando asfalto proveniente del RAP rejuvenecido con AVC y ARC.

En primer lugar, el RAP es una combinación de agregado y asfalto, según Al-Qadi *et al.* las mezclas recicladas con un contenido de RAP superior al 20% tienen menor vida útil que las mezclas vírgenes. Cuando el porcentaje de RAP supere el 15% del total de la HMA se deben

determinar las propiedades del AE ya que podrían afectar el grado del aglutinante y el rendimiento de la mezcla [11].

En esta etapa, se añadió un 20% de RAP rejuvenecido con AVC y ARC en las mezclas asfálticas. Se ensayaron 18 probetas, de dos tipos de mezclas con tres porcentajes de asfalto y tres probetas por cada uno, siendo la mezcla 1 de 80% de materiales vírgenes y 20% de RAP rejuvenecido con AVC, y la mezcla 2 de 80% de materiales vírgenes y 20% de RAP rejuvenecido con ARC, cuyos resultados de estabilidad y flujo del ensayo Marshall se muestran en la tabla 8 y 9, respectivamente. Cabe resaltar que las mezclas se realizaron con el porcentaje de aceite seleccionado en la etapa 2, el cual fue el 5% tanto para el AVC, como para el ARC. Los valores de estabilidad fueron multiplicados por el factor de corrección, que dependió del volumen de cada probeta y se encuentra en la tabla 748-1 del INVIAS [22].

Al comparar los datos de la tabla 2 con los valores de los diferentes porcentajes de asfalto en la tabla 8 correspondiente a la mezcla que contiene RAP rejuvenecido con AVC, se encontró que los promedios de la estabilidad son mayores al dato mínimo de 7,5 kN que establece el INVIAS. Para el flujo, los promedios se encuentran en el rango permitido de 2-4 mm. En cuanto a la relación estabilidad y flujo, las probetas con un 5% de asfalto se encuentran entre los valores del rango de 3-5 kN/mm, a diferencia de las probetas con un 5,5% y 6%, las cuales tienen valores por debajo del rango.

**Tabla 8.** Resultados del ensayo Marshall en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con AVC.

% Asfalto	5%			5,5%			6%		
	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)
Promedio	11,83	3,10	3,82	8,67	3,61	2,40	8,03	3,08	2,61
Desviación estándar	10,43	0,13	0,03	1,17	0,93	0,66	0,91	0,02	0,28
Coefficiente de variación	3,59	4,32	0,84	13,47	25,87	27,26	11,30	0,79	10,55

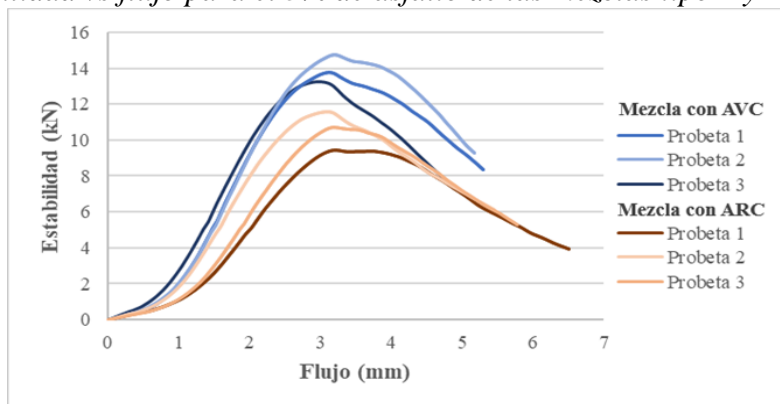
En la tabla 9, los datos de estabilidad y flujo de cada uno de los promedios se encuentran entre los valores permitidos por el INVIAS. Con respecto a la relación estabilidad y flujo, el porcentaje de asfalto que presenta el menor porcentaje de desviación (7.3%) con respecto al límite inferior establecido por el INVIAS, es del 5%.

**Tabla 9.** Resultados del ensayo Marshall en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con ARC.

% Asfalto	5%			5,5%			6%		
	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)	Estabilidad (kN)	Flujo (mm)	E/F (kN/mm)
Promedio	8,82	3,17	2,78	7,70	3,17	2,43	8,65	3,20	2,70
Desviación estándar	1,03	0,07	0,38	0,90	0,48	0,55	1,52	0,12	0,57
Coefficiente de variación	11,68	2,30	13,62	11,74	15,09	22,68	17,54	3,76	21,19

A partir del análisis de las tablas 8 y 9, se puede decir que el 5% del asfalto en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con AVC, como en la mezcla con 20% de RAP rejuvenecido con ARC, es el único porcentaje dentro de los tres ensayados, que posee las mejores características con respecto a los valores de estabilidad, flujo y la relación estabilidad sobre flujo del INVIAS en la tabla 2. En la figura 22 se muestra la estabilidad vs el flujo del porcentaje de asfalto del 5%.

**Figura 22.** Estabilidad vs flujo para el 5% de asfalto de las mezclas tipo 1 y 2.



Con el valor de estabilidad se realizó el análisis de los datos mediante Statgraphics para 4 mezclas, las dos primeras fueron de “100% materiales vírgenes con un 6% de asfalto” y “80% materiales vírgenes y 20% RAP con un 5,5% de asfalto”, se obtuvieron de la investigación

“Comparación de mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP” [25]. Y las otras dos mezclas fueron las correspondientes a la tabla 8 “80% materiales vírgenes + 20% RAP rejuvenecido con AVC”, y a la tabla 9 “80% materiales vírgenes + 20% RAP rejuvenecido con ARC” ambas con un 5% de asfalto. Teniendo en cuenta los valores mínimos de la tabla 2, la estabilidad de las 4 mezclas cumple con el valor mínimo de estabilidad.

Según el análisis de los resultados, de acuerdo con la prueba ANOVA, existe una diferencia estadísticamente significativa entre todas las mezclas (valor-p = 0,0017). Para la prueba de múltiples rangos se asignaron los grupos homogéneos A y B como se muestra en la tabla 10 y de acuerdo con los resultados la mezcla de “80% materiales vírgenes y 20% RAP” y la

mezcla de “80% materiales vírgenes + 20% RAP rejuvenecido con AVC” no tienen una diferencia estadísticamente significativa con la mezcla de “100% vírgenes”. Aghazadeh et al, realizaron un estudio similar, en el cual se compararon mezclas rejuvenecidas con un 5,1% de ARC con diferentes porcentajes de RAP, como el 20% que proporcionando un rendimiento mecánico adecuado [26].

**Tabla 10.** Pruebas de múltiples rangos para las mezclas con mayor estabilidad.

Mezclas	Media	Grupos homogéneos
80% Vírgenes (5%) + 20% RAP con ARC	8,82	A
80% Vírgenes (5%) + 20% RAP con AVC	11,83	B
100% Vírgenes (6%)	12,67	B
80% virgen (5,5%) + 20%RAP	12,85	B

## 7. Conclusiones

Al analizar las propiedades de índice de acidez, índice de peróxidos y viscosidad dinámica, se observó que estas son mayores en el aceite residual de cocina en comparación con el aceite virgen debido a los procesos de hidrólisis, oxidación y polimerización que ocurren durante el proceso de fritura. Sin embargo, se analiza que es posible utilizar ambos rejuvenecedores para restaurarle las propiedades al asfalto envejecido e incluirlo en nuevas mezclas asfálticas.

Con base al análisis se dedujo que, a mayor porcentaje de aceite virgen o aceite residual de cocina añadido, la penetración aumenta, el punto de ablandamiento y la viscosidad dinámica disminuyen, esto indicó que los aceites funcionan como rejuvenecedores del asfalto envejecido. Tanto para el aceite virgen como para el aceite residual de cocina, el porcentaje que logró restaurar las propiedades físicas y reológicas del asfalto contenido en el RAP en comparación con las del asfalto virgen fue el de 5%.

En los resultados del ensayo de Marshall los dos tipos de mezcla, con AVC y con ARC, lograron que la mezcla asfáltica con 20% de RAP rejuvenecido tuviese las propiedades mecánicas, estabilidad y flujo requeridas. Al realizar la prueba de múltiples rangos se compararon las medias de estabilidad de las mezclas de pavimento virgen, envejecido y rejuvenecido, se observó que la mezcla con ARC no se encontraba en el mismo grupo homogéneo que las demás, lo cual demostró que este tipo de aceite tiene una influencia en el comportamiento mecánico de la mezcla, pero no es significativo ya que el valor de estabilidad cumple con el criterio del INVIAS; convirtiéndose así en una mezcla apta para su uso en carreteras.

La restauración de las propiedades del asfalto envejecido no depende de la degradación del aceite. Esto es una gran ventaja ya que hace posible incluir el aceite residual de cocina en el asfalto sin un tratamiento previo y posibilita el uso de los dos tipos de aceite como rejuvenecedores en pavimentos del área metropolitana de Bucaramanga.

### Referencias

- [1] L. Talens Peiró, L. Lombardi, G. Villalba Mé Ndez, and X. Gabarrell I Durany, “Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO),” *Energy*, vol. 35, pp. 889–893, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.07.013.
- [2] A. M. El-shorbagy, S. M. El-badawy, and A. R. Gabr, “Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 220, pp. 228–237, 2019, doi: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.180.
- [3] H. Asli, E. Ahmadiania, M. Zargar, and M. R. Karim, “Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 398–405, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.jtte.2018.01.001.
- [4] ENEC, “Flujo Materiales de Construcción – Estrategia Nacional de Economía Circular,” 2017. <https://economiecircular.minambiente.gov.co/index.php/lineas-de-accion/flujo-materiales-de-construccion/>.
- [5] 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.
- [6] J. Benítez, “Diagnóstico del estado actual del reciclaje de pavimentos en Colombia y recomendaciones para su implementación efectiva,” Universidad de los Andes, 2013.
- [7] T. Baghaee Moghaddam and H. Baaj, “The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 114, pp. 805–816, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.015.
- [8] MINAMBIENTE, “Documento de soporte preliminar para la gestión de aceites de cocina



- usados,” 2017. [Online]. Available: <http://www.andi.com.co/Uploads/Documento%20Soporte%20Tecnico%20ACU%20-Ajustes%20-29-09-17.pdf>
- [9] F. Leiva Villacorta and A. Vargas Nordbeck, “Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP),” *Infraestruct. Vial*, vol. 19, no. 33, pp. 35–44, 2017, doi: 10.15517/iv.v19i33.32921.
- [10] H. Li, B. Dong, W. Wang, G. Zhao, P. Guo, and Q. Ma, “Effect of waste engine oil and waste cooking oil on performance improvement of aged asphalt,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 9, pp. 1–20, 2019, doi: 10.3390/app9091767.
- [11] I. L. Al-Qadi, M. Elseifi, and S. H. Carpenter, “Reclaimed asphalt pavement - A literature review,” 2007. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/2142/46007>.
- [12] T. Lopez-Montero and R. Miró, “El envejecimiento en mezclas asfálticas,” Madrid, 2015. [Online]. Available: [https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05\\_UP-cataluña\\_CT-2015\\_Final.pdf](https://www.ptcarretera.es/wp-content/uploads/2017/07/05_UP-cataluña_CT-2015_Final.pdf).
- [13] R. B. Ahmed and K. Hossain, “Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 230, pp. 1–11, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116985.
- [14] K. Buitrago, “Auscultación, calificación del estado superficial y evaluación económica de la carretera sector del municipio de Neiva en el proyecto de la ampliación y rehabilitación de la calle 6 (Huila),” Universidad Cooperativa de Colombia, 2019.
- [15] R. Miranda, “Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos,” Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2010.
- [16] J. Buitrago and A. Gonzales, “Caracterización del RAP e identificación de su influencia

- en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente,” Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [17] INVIAS, “Capítulo 4- Pavimentos asfálticos,” 2012. Accessed: May 17, 2021. [Online]. Available: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14348/3/Anexo E. Norma INVIAS - Capitulo 4.pdf>.
- [18] Compañía de Trabajos Urbanos, “MD-12 - Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S.,” 2020. <https://ctu.com.co/mezcla-asfaltica-mdc-19/> (accessed May 08, 2021).
- [19] M. D. Juárez and N. Sammán, “El deterioro de los aceites durante la fritura,” *Rev. Esp. Nutr. Comunitaria*, vol. 13, no. 2, pp. 82–94, 2007, [Online]. Available: <https://www.renc.es/imagenes/auxiliar/files/0032007.pdf>.
- [20] I. Sánchez and M. Figueroa, “Extracción y caracterización fisicoquímica de aceite fijo obtenido por Expresión de 5 especies nativas y cultivadas en Guatemala,” Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2013.
- [21] A. M. Domingo, “Apuntes de mecánica de fluidos,” Madrid, 2013. [Online]. Available: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>.
- [22] INVIAS, “Sección 700 - Normas de ensayo de materiales para carreteras,” 2012. Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos>.
- [23] H. Sanli, M. Canakci, and E. Alptekin, “Characterization of Waste Frying Oils Obtained from Different Facilities,” *World Renew. Energy Congr.*, vol. 57, pp. 479–485, 2011, doi: 10.3384/ecp11057479.
- [24] H. Li *et al.*, “Research on the development and regeneration performance of asphalt rejuvenator based on the mixed waste engine oil and waste cooking oil,” *Int. J. Pavement*

- Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 336–346, 2019, doi: 10.1007/s42947-019-0040-1.
- [25] C. Segura, L. Guarín, L. Camargo, L. Silva, V. Plata, and P. Moreno, “Comparación de mezclas asfálticas preparadas en caliente utilizando materiales vírgenes y RAP,” 2021, p. 1, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.889.
- [26] P. Aghazadeh Dokandari, D. Kaya, B. Sengoz, and A. Topal, “Implementing waste oils with reclaimed asphalt pavement,” *World Congr. Civil, Struct. Environ. Eng.*, pp. 1–12, 2017, doi: 10.11159/icsenm17.142.