UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA

ANÁLISIS APLICATIVO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN COLOMBIA

Olga Marcela Cueto Ramos

Camilo Andrés Rozo Álvarez

2022

ANÁLISIS APLICATIVO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO (RAP) EN COLOMBIA

PRESENTADO POR

OLGA MARCELA CUETO RAMOS

CAMILO ANDRÉS ROZO ÁLVAREZ

DIRECTOR

ING. GUSTAVO ADOLFO CORREA SOLANO

Universidad Cooperativa de Colombia

UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

SANTA MARTA, MAGDALENA

2022

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN **7**

ABSTRACT **8**

1. INTRODUCCIÓN **9**

2. OBJETIVOS **10**

2.1. OBJETIVO GENERAL 10

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **11**

4. JUSTIFICACIÓN **13**

5. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO **14**

6. MARCO REFERENCIAL **15**

6.1. MARCO CONCEPTUAL 15

6.2. MARCO TEÓRICO 17

6.2.1. El asfalto y sus tipos 17

6.2.2. Propiedades físicas y reológicas del asfalto 18

6.2.3. Mezcla asfáltica 20

6.2.4. Métodos de diseño de mezclas asfálticas 21

6.2.5. Pavimento asfáltico reciclado 22

6.2.6. Métodos y técnicas de reciclaje del pavimento asfáltico 23

6.2.7. Almacenamiento del pavimento asfáltico reciclado 27

6.3. MARCO LEGAL 29

7. METODOLOGÍA **30**

7.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN 30

7.2. RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN 30

8. APLICACIÓN Y USOS PRINCIPALES DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO 34

9. VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS DE RECICLAJE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO 36

10. IMPLEMENTACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO EN COLOMBIA 38

11. REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO 42

12. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO 48

12.1 CONTENIDO DE ASFALTO 48

12.2 GRANULOMETRÍAS 49

12.3 ÍNDICE DE DESGASTE Y RESISTENCIA 54

13. ANÁLISIS DE COSTOS 55

14. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 56

15. CONCLUSIONES 58

16. RECOMENDACIONES 60

17. REFERENCIAS 62

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Pavimento asfáltico reciclado. **22**

Ilustración 2: Reciclado en frío. **24**

Ilustración 3: Reciclado de asfalto en planta procesadora. **25**

Ilustración 4: Implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS **38**

Ilustración 5: Implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia. Fuente: Elaboración propia en ArcGIS **39**

Ilustración 6: Implementación del RAP en Bogotá. **40**

Ilustración 7: Vías intervenidas con RAP en la localidad de Suba-Lisboa, Bogotá **41**

Ilustración 8: Características físicas y mecánicas del RAP. **42**

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1: Selección de información de utilidad. Fuente: Elaboración propia **31**

Esquema 2: Técnica de búsqueda. Fuente: Elaboración propia **32**

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Contenido de asfalto. Fuente: Elaboración propia **48**

Gráfica 2: Curvas granulométricas de informes N°1 y N°3. Fuente: Elaboración propia **50**

Gráfica 3: Curvas granulométricas de informes N°2 y N°5. Fuente: Elaboración propia **51**

Gráfica 4: Curvas granulométricas de informe N°4. Fuente: Elaboración propia **53**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ventajas de las técnicas de reciclaje del pavimento asfáltico. Fuente: Elaboración propia **.....37**

Tabla 2: Distintivo de vías con la implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia. Fuente: Elaboración propia**.....39**

Tabla 3: Revisión informe #1. Fuente: Elaboración propia **.....43**

Tabla 4: Revisión informe #2. Fuente: Elaboración propia **.....44**

Tabla 5: Revisión informe #3. Fuente: Elaboración propia **.....45**

Tabla 6: Revisión informe #4. Fuente: Elaboración propia **.....46**

Tabla 7: Revisión informe #5. Fuente: Elaboración propia **.....47**

Tabla 8: Comparación de granulometrías de informes N°1 y N°3. Fuente: Elaboración Propia **.49**

Tabla 9: Comparación de granulometrías de informes N°2 y N°5. Fuente: Elaboración propia**..51**

Tabla 10: Granulometría de informe N°4. Fuente: Elaboración propia**.....52**

Tabla 11: APU de una estructura de pavimento construida con subbase granular y afirmado virgen. Fuente: Elaboración propia **.....55**

Tabla 12: APU de una estructura de pavimento construida reemplazando la subbase granular en su totalidad con RAP. Fuente: Elaboración propia **.....55**

RESUMEN

La utilización del pavimento asfáltico reciclado para la construcción y rehabilitación de carreteras es un tema que ha venido avanzando en los últimos años, mediante mejoras a las técnicas de reciclaje, obtención y reutilización, generando múltiples ventajas tanto económicas como ambientales al disminuir los procesos de extracción de materiales granulares, costos de producción, logística, entre otros. Sin embargo, el empleo de estas técnicas y el uso del RAP en proyectos viales en Colombia es muy mínimo y solo algunos departamentos la han implementado. Por tal motivo, el siguiente informe busca implantar una perspectiva clara sobre el uso del material asfáltico reciclado, además de impulsar su utilización exponiendo las ventajas de cada una de las técnicas de reciclaje, su viabilidad técnica, el comportamiento físico y mecánico frente a las diferentes aplicaciones, y aquellos lugares en los cuales se ha practicado esta técnica en el país para el mejoramiento de las carreteras.

Palabras clave: Pavimento, reciclaje, asfalto, carreteras, técnicas.

ABSTRACT

The use of recycled asphalt pavement for the construction and rehabilitation of roads is an issue that has been advancing in recent years, through improvements to recycling, obtaining and reuse techniques, generating multiple economic and environmental advantages by reducing the processes of extraction of granular materials, production costs, logistics, among others. However, the use of these techniques and the use of RAP in road projects in Colombia is very minimal and only some departments have implemented it. For this reason, the following report seeks to implement a clear perspective on the use of recycled asphalt material, in addition to promoting its use by exposing the advantages of each of the recycling techniques, its technical feasibility, the physical and mechanical behavior in front of the different applications, and those places in which this technique has been practiced in the country for the improvement of roads.

Keywords: Pavement, recycling, asphalt, roads, techniques.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el pavimento asfáltico reciclado se ha convertido en una alternativa sostenible a la hora de restaurar carreteras en mal estado. El empleo de este material disminuye la utilización de los recursos naturales y de la energía para la fabricación de las mezclas, siendo amigable con el medio ambiente y a su vez brinda beneficios económicos al disminuir los costos en los procesos de producción, colocación y transporte.

La implementación de esta técnica requiere de buenas prácticas, desde la obtención del material mediante las técnicas de reciclaje hasta su disposición final, ya sea en una base granular o para el diseño de una nueva mezcla. Las características físicas y mecánicas juegan un papel muy importante a la hora de elegir la aplicación del pavimento asfáltico reciclado para la construcción y rehabilitación de carreteras.

Dicho esto, el siguiente informe está enfocado en establecer un punto de vista claro sobre la utilización del RAP en Colombia, dando a conocer los lugares en los que se ha implementado esta técnica, las ventajas que posee cada una de las técnicas de reciclaje y la más empleada, el comportamiento físico, mecánico y reológico de las propiedades del material reciclado y los distintos usos que se le pueden dar al material asfáltico reciclado.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Analizar las principales aplicaciones del uso del pavimento asfáltico reciclado (RAP), así como su viabilidad técnica, comportamiento y economía en Colombia.

2.2. Objetivos específicos

- Investigar en que lugares de Colombia se han implementado las técnicas del RAP para proyectos viales de rehabilitación.
- Identificar cuáles son las ventajas de utilizar el pavimento asfáltico reciclado y los diferentes tipos de reciclaje de este.
- Examinar tendencias en comportamientos físicos y mecánicos del material reciclado frente a distintos usos en proyectos viales de rehabilitación en Colombia.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la preservación del medio ambiente ha sido un tema de gran relevancia y sobre todo pieza fundamental en los objetivos planteados por diversas empresas de múltiples sectores, de las ciudades y en general el mundo entero. Por tal razón, la constante búsqueda de alternativas que contribuyan a su conservación es de gran envergadura.

Es acertado decir, que el acrecentamiento de las potencialidades de cada territorio y por lo tanto su productividad, se intensifican conforme se conectan con los demás, generando consigo desarrollo sostenible y competitividad. Teniendo en cuenta lo anterior, Colombia es catalogado como un país en vía de desarrollo, por lo cual su proyección ante la modernización de su infraestructura e incremento de su capacidad es una cuestión de necesidad u obligación, para poder lograr afianzamiento en lo que respecta a las actividades comerciales y los beneficios de estas para la sociedad, hablando en términos de calidad de vida.

Sin lugar a duda, bien es sabido que el territorio colombiano no cuenta en su totalidad con vías en óptimas condiciones que brinden un fácil acceso a los diversos servicios de salud, financieros, de producción agropecuaria, entre otros, y por consiguiente la posibilidad de impulso hacia el desarrollo del país, mejorando la calidad de vida de sus habitantes en aras de generar oportunidades, progreso e ingreso a los diversos departamentos, ciudades y municipios que comprenden su extensión territorial. Lo anterior, genera que se le apunte a la ejecución eficiente de proyectos viales, con un enfoque adecuado en la utilización de los recursos naturales y el correcto manejo de los residuos producidos en los diversos procesos que se desarrollan en las etapas de ejecución infraestructural del país.

El mal estado de las carpetas asfálticas en gran parte hace alusión a las ondulaciones, baches, desplazamientos, entre otros fenómenos generados por múltiples factores, que para su reparación y, por lo tanto, la conservación adecuada de la red vial genera el aumento significativo del gasto de presupuesto del país, además de ciertas problemáticas ambientales. Haciendo hincapié en lo mencionado, se apuesta por nuevas técnicas en reemplazo de las convencionales, que permitan la reducción considerable de costos y logre atenuar los impactos negativos generados en el ambiente en función de la construcción vial del país, promoviendo la sostenibilidad en sector vial y tomando como guía los Objetivos de Desarrollo Sostenible, más enfáticamente al desarrollo del ODS 11 alusivo a ciudades y comunidades sostenibles, para conseguir un mejor futuro para todas las personas. Por ello, se apuesta por la utilización del asfalto reciclado para lograr un aprovechamiento considerable de los diversos materiales empleados y darles una muy buena reutilización.

4. JUSTIFICACIÓN

Estar a la vanguardia de las nuevas tecnologías posibilita estar a un paso más de alcanzar el desarrollo sostenible, así pues, el sector constructivo no está exento de implementar novedosas alternativas de construcción que permitan que se favorezca el crecimiento económico de un territorio.

Como bien es sabido, la preservación de las vías supone un elevado presupuesto e impacto ambiental; es por tal motivo que la importancia radica en la manera adecuada y sostenible con la que se pretenda impulsar hacia el desarrollo de cualquier rincón del territorio colombiano, teniendo en cuenta siempre una buena planificación ante las intervenciones próximas a realizar, de acuerdo con las características propias de la zona a impactar.

Por consiguiente, se plantea una alternativa ante esta problemática, incorporando nuevas técnicas en aras de impulsar el desarrollo sostenible del país, más enfáticamente haciendo alusión al uso de la mezcla de asfalto reciclado para el aprovechamiento del material, a fin de mejorar las condiciones de las diversas vías en deterioro; distinguiendo las múltiples ventajas y desventajas de la implementación de estas técnicas y evidenciando el alto potencial que posee esta alternativa al ser utilizada en la construcción o restauración de las diversas vías. Del mismo modo, se contribuye a atenuar los problemas ambientales presentes en el país, la explotación tanto de materiales pétreos como la extracción de materiales granulares de los ríos, entre otros, y asimismo exaltando los diversos beneficios económicos, ambientales e ingenieriles del pavimento asfáltico reciclado.

5. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

El presente análisis se enfocará en la aplicación del pavimento asfáltico reciclado para proyectos viales de rehabilitación en Colombia durante los últimos 5 años (2018-2022).

Como se ha mencionado en múltiples ocasiones, la gran mayoría de vías del país no se encuentran en las mejores condiciones, lo que representa un riesgo inminente para los miles de personas que transitan diariamente por estas, motivo por el cual estas deben ser intervenidas para su reparación, significando muchas veces un costo elevado de presupuesto y de impacto ambiental.

Por ende, en el presente proyecto se plantea como alternativa el uso del pavimento asfáltico reciclado, exponiendo sus ventajas, los tipos de reciclaje y su viabilidad técnica, además de revisar cuál es su comportamiento físico y mecánico frente a los distintos usos y los lugares en los cuales se ha implementado esta técnica para proyectos viales de rehabilitación.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se presentan las definiciones y conceptos claves acerca del pavimento asfaltico reciclado.

Asfalto

El asfalto es un material viscoso, que usualmente se utiliza como cementante en mezclas de concreto asfáltico, cuyo principal uso es en la construcción de pavimentos flexibles. (MARILY MONROY LINAREZ, 2020)

Mezcla asfáltica

Es una mezcla en proporciones exactas de asfalto (ligante hidrocarbonato), y materiales minerales compuestos por diferentes tamaños de áridos y finos. (MARILY MONROY LINAREZ, 2020)

Agregados pétreos

Son materiales solidos e inertes que se emplean en la construcción de firmes en carreteras y deben cumplir con una granulometría especifica dependiendo de la norma de cada país. Se emplean para la construcción de productos artificiales mediante su mezcla con ligantes de activación hidráulica tales como cementos, cales o con ligantes asfálticos para el caso de una construcción de carretera. (Emily Guerra Rodriguez, 2019)

Pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico es el tipo de pavimento de mayor uso alrededor del planeta; siendo que este tiene usos desde residenciales, portuarios, aeroportuarios y autopistas, en general. Su elaboración y composición depende de factores como: clima, tráfico, materiales a disposición y su distancia, así como su ubicación geográfica. (ROJAS, 2019)

Pavimento flexible

Constituidos por varias capas, que permiten una distribución de esfuerzos, inducidos por el tránsito, hasta el terreno natural sin que estas sufran deformaciones. Estructuralmente sus capas se colocan en orden descendente, de acuerdo con su capacidad de carga, las cuales son: Carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante. (ROJAS, 2019)

Rehabilitación

Mejoramiento funcional o estructural del pavimento, que da lugar tanto a una extensión de su vida de servicio, como a la provisión de una superficie de rodamiento más cómoda y segura y a reducciones en los costos de operación vehicular. (MARILY MONROY LINAREZ, 2020)

Reciclaje

Se entiende por reciclaje a la operación de transformar materiales residuales en materia prima, a fin de prolongar su vida útil.

6.2. MARCO TEÓRICO

6.2.1. El asfalto y sus tipos

Cemento asfáltico o asfalto natural

Es el último residuo que queda cuando se le hace el proceso de destilación al petróleo, en temperaturas normales lo encontramos en estado sólido, quebradizo e insoluble en agua, con un color entre negro y café oscuro. Tiene muchos usos tales como revestimiento e impermeabilizar tejados y cubiertas, pero su uso más común es en la construcción de pavimentos y para poder mezclarlo con los agregados pétreos debe encontrarse a una temperatura de 140°C. (Emily Guerra Rodriguez, 2019)

Emulsión asfáltica

Consiste en la fina dispersión de gotas de asfalto, estabilizadas en una fase acuosa gracias a la presencia de un agente emulsificante. Entonces se puede decir que está compuesta por tres elementos que son asfalto, agua y un agente 23 emulsificante. Los agentes emulsificantes pueden contener otros aditivos ya sean estos estabilizantes, promotores de adherencia o de control de rotura. (Padilla, 2019)

Asfalto liquido

Es un compuesto de resinas asfálticas y solventes, de secado lento y fácil aplicación que facilita la adherencia de otros productos asfálticos impermeabilizantes. El asfalto líquido se utiliza como imprimador de superficies muy porosas e irregulares, adecuándolas al proceso de impermeabilización. (ACERO, 2020)

6.2.2. Propiedades físicas y reológicas del asfalto

Para el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras las principales propiedades empleadas son:

Penetración

La penetración determina una medida de dureza o consistencia del asfalto, se mide en décimas de milímetro mediante una aguja normalizada que penetra la muestra de asfalto en condiciones especificadas, este ensayo nos define si la muestra es líquida, semisólida o sólida. (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Viscosidad

Es la resistencia que ofrece el cemento asfáltico a la deformación por el rozamiento de las moléculas por lo cual, mientras más elevada sea la viscosidad más lento será el movimiento. El asfalto debe actuar como adhesivo entre el agregado pétreo que conforma la carpeta de rodadura y por ser termoplásticos, ya que al calentarse disminuye su consistencia y endurece cuando se enfrían. (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Ductilidad

Es la capacidad del asfalto a sufrir alargamientos, estos alargamientos se miden antes de producirse la rotura de la probeta de material asfáltico, la cual es estirada por ambos extremos con una velocidad constante, el asfalto al estar sometido a variaciones de temperatura es necesario que tenga una ductilidad adecuada para alargarse sin presentar grietas, no es adecuado tampoco que se presente una ductilidad excesiva ya que existe el riesgo de la aparición de ondulaciones por efecto de las cargas del tráfico. (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Punto de ablandamiento

Se define como el cambio gradual en la consistencia del asfalto por la variación de temperatura aplicada a la muestra, hasta alcanzar un punto de fluidez o consistencia determinada, para determinar esta propiedad se emplea el ensayo del anillo y bola. (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Durabilidad

Se define como la magnitud de conservación de las características iniciales de un asfalto, cuando este es expuesto a procesos de degradación y envejecimiento. Para determinar la durabilidad se realizan pruebas rutinarias en base a la comparación de parámetros reológicos del asfalto, estas son la Prueba de Película Delgada en Horno (TFOT) o la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO). (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Susceptibilidad a la temperatura

Esta define la variación que existe en la consistencia del asfalto ante la presencia de cambios de temperatura, la temperatura influye en la viscosidad del asfalto, ya que al elevarse la temperatura la viscosidad disminuye, y al disminuir la temperatura el asfalto es más viscoso o duro, por tanto, el asfalto es un material termoplástico. (Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, 2021)

Granulometría de los agregados extraídos de las mezclas asfálticas

Los resultados del ensayo permiten la conformidad de la granulometría con la especificación aplicable y suministra datos útiles para el control de la producción de los diferentes agregados usados en la fabricación de mezclas asfálticas. (Bedoya, 2021)

6.2.3. Mezcla asfáltica

La mezcla asfáltica es una mezcla en proporciones exactas de asfalto (ligante hidrocarbonato), y materiales minerales compuestos por diferentes tamaños de áridos y finos. Mientras las capas granulares resisten la acción del tráfico, la función de la mezcla asfáltica es resistir los efectos abrasivos, impermeabilizar la superficie y proporcionar una capa de rodadura cómoda y segura a los usuarios que la utilicen. Estas mezclas garantizan resistencia al tráfico demandante, impermeabilidad para que el agua no desestabilice la estructura vial, y debe ser trabajable para que sea factible su instalación en obra. (MARILY MONROY LINAREZ, 2020)

Tipos de mezclas asfálticas según su temperatura

Mezcla asfáltica en caliente

Se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de cemento asfáltico y agregados mineral, combinados de tal manera que todas las partículas de agregado estén cubiertas de ligante. (ROJAS, 2019)

Mezcla asfáltica en frío

Las mezclas asfálticas en frío son una combinación de aglutinantes asfálticos emulsionados o recortados y su principal campo de aplicación es en la construcción y en la conservación de carreteras secundarias. (ROJAS, 2019)

6.2.4. Métodos de diseño de mezclas asfálticas

Existen múltiples métodos para diseñar mezclas asfálticas en caliente, como lo son el Hveen, Hveen modificado, SUPERPAVE y Marshall, este último es el más practicado en Colombia y por tal motivo a continuación se expondrá en que consiste dicho método.

Método Marshall

Este método determina el procedimiento para realizar los ensayos de estabilidad y flujo de mezclas en caliente utilizando el aparato Marshall.

Dichos ensayos demuestran la resistencia con respecto a la deformación de los especímenes ante las cargas vehiculares empleando el aparato Marshall y permite evaluar la dosificación óptima de emulsión asfáltica (CA) para mezclas convencionales y modificadas. Se deberá tener en cuenta un tamaño mayor o igual a 25,4 mm de los agregados pétreos. (MAYRA ALEJANDRA FORERO TRIANA, 2020)

6.2.5. Pavimento asfáltico reciclado

Es el término que se le da al producto granular que se obtiene, cuando se remueve por medio del fresado la carpeta asfáltica y parte de las capas subyacentes de una estructura de pavimento deteriorada. Este material recuperado, se destina para la construcción de nuevas estructuras de pavimentos o para el mantenimiento del patrimonio vial de una región. (Cristian Camilo Peña Urrea, 2021).

El pavimento asfáltico reciclado RAP (por sus siglas en inglés) se define como el material de pavimento retirado y/o procesado, el cual contiene asfalto y agregados. Este material se obtiene cuando el pavimento asfáltico en uso es retirado para la rehabilitación o reconstrucción de la vía. (ROJAS, 2019).

Ilustración 1*: Pavimento asfáltico reciclado.*

Fuente*: https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/pavimento-asfaltico-reciclado/*

Como se sabe las propiedades del RAP dependen principalmente de las propiedades de los materiales que lo componen y el tipo de mezcla asfáltica (capa de rodadura, capa de base, etc.). Pueden existir grandes diferencias entre mezclas asfálticas en lo que respecta a la calidad del agregado, tamaño y consistencia. El RAP puede tener un contenido de asfalto típicamente en el

rango de 3% a 7% por peso. El asfalto adherido al agregado es más rígido que el asfalto virgen debido a la oxidación y el envejecimiento del pavimento. (Jaramillo Soto Washington Patricio, 2022)

El hecho de que un pavimento se encuentre en mal estado no significa que no sirva, siempre y cuando se realice un tratamiento, este pavimento envejecido puede adquirir características semejantes a un pavimento nuevo. (Benites, 2020)

6.2.6. Métodos y técnicas de reciclaje del pavimento asfáltico

Mediante el reciclado se busca transformar el pavimento degradado en una estructura con calidad y capacidad homogénea, que cuente con las características de soportar cargas como al inicio de su construcción. Las técnicas y metodologías que se han desarrollado para el reciclaje de pavimentos obedecen, a un desarrollo básico de conceptos empíricos y a comprobaciones de campo las cuales tienen que ser experimentadas directamente durante el proceso de ejecución. (JARA TRUJILLO RAQUEL ROCIO, 2020)

Los métodos utilizados en los procesos de reciclaje de pavimento asfáltico pueden variar según la temperatura, (en frío o caliente), si son reciclajes in situ o en planta, por fresado o por escarificación, según las capas o profundidades recicladas, entre otros. Estos determinan el proseguir de cada método obteniendo de diferentes formas el material deseado. (Morales, 2021)

Reciclado en caliente

Se define como la recuperación de capas bituminosas de firmes dañados o de mezclas nuevas que no han sido utilizados, su ejecución consiste en retirar el pavimento envejecido mediante un fresado o demolición, posteriormente se procesa el material mezclándolo con proporciones

adecuadas de áridos vírgenes, betún nuevo y agentes rejuvenecedores. (Gerson Yeampier Cabanillas Hualpa, 2020)

Reciclado en frío

Es el reciclado del pavimento asfaltico sin la aplicación de calor sobre la estructura, esta técnica emplea equipos mecánicos como camiones cisterna, fresadora, unidades de trituración y cribado, mezcladoras, pavimentadoras y rodillos. (MORI, 2018)

El reciclado en frío depende directamente del tipo de material reciclado y de acuerdo con ello se puede considerar el tipo de tratamiento a utilizarse. (Padilla, 2019)

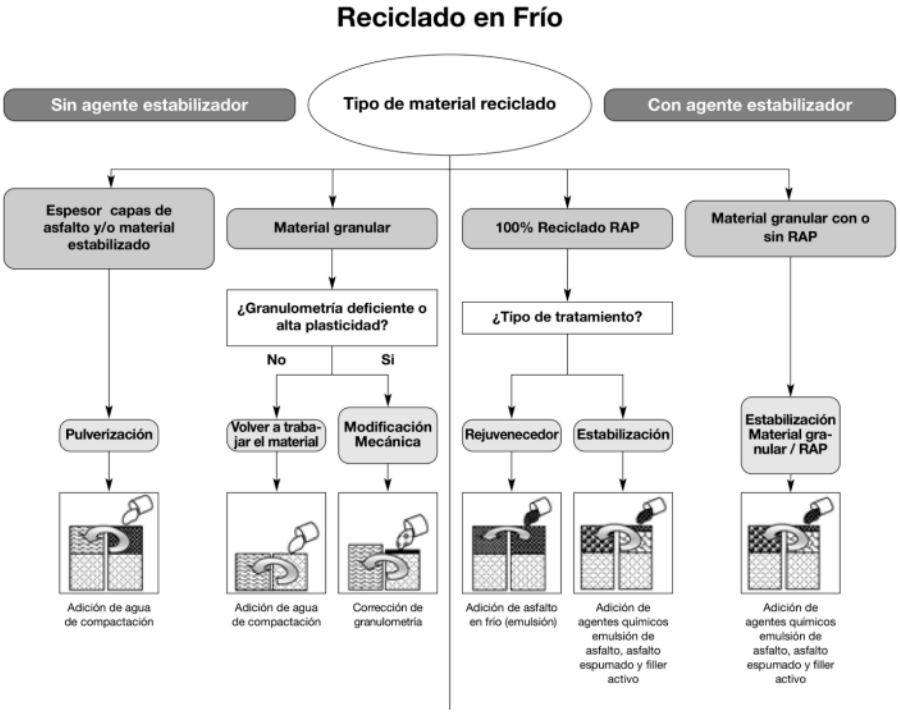


Ilustración 2: *Reciclado en frío.*

Fuente: *https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/8142/1/142216.pdf*

Reciclado en planta (Caliente o frío)

Una vez extraído el material de las carreteras o pistas, se procede a transportarlo a las plantas de tratamiento en donde se realizará un proceso de trituración para homogeneizar el material, mezclándolo ya sea en caliente con materiales pétreos vírgenes y betún o en centrales de mezclas en frío, obteniendo así la mezcla bituminosa compuesta de material reciclado que puede ser llevada a la zona donde se pretende colocar la mezcla. (Morales, 2021)

Ilustración 3: *Reciclado de asfalto en planta procesadora.*

Fuente*:* *https://asfaltomadrid.com/asfalto-verde-reciclado/*

Reciclado in situ

Consiste en poder reutilizar los materiales procedentes de las capas del pavimento asfaltico que ya han estado en servicio y que por diversos factores y envejecimiento natural estas ya han perdido algunas propiedades con respecto a su construcción inicial, como la cohesión, textura, composición, geometría, etc., pero a través de esta técnica se busca una mezcla homogénea a través de un nuevo ligante (emulsión bituminosa) y ciertos porcentajes de agua y aditivos (cemento y cal), se busca que estas den como resultado una mezcla con capacidades de soporte y

calidad al igual que su construcción inicial, el nuevo mezclado pueden ser utilizados para integrar nuevas capas del mismo pavimento. (MORI, 2018)

Recuperación full – depth

Cuando un pavimento asfáltico tiene una insuficiente resistencia estructural, la recuperación full – depth con emulsión asfáltica puede ser la solución. El espesor de una recuperación full – depth depende del espesor del pavimento existente, de las condiciones del suelo de la subrasante y del tráfico futuro. Para la aplicación de este método toda la sección del pavimento y en ciertos casos un volumen considerable del material procedente de capas subyacentes, se mezclan con emulsión asfáltica para obtener una base estabilizada, haciendo que los problemas que se presenten en la base puedan ser corregidos. (Jaramillo Soto Washington Patricio, 2022)

Fresado del pavimento asfáltico

Mediante este método se puede obtener el material del pavimento asfáltico en las capas y profundidades deseadas por el encargado del proyecto, mediante el uso de una máquina fresadora la cual consiste en un rodillo destinado a realizar la trituración del material mediante giros rotatorios y con un constante avance de la máquina. (Morales, 2021)

Se procede a utilizar la máquina fresadora siguiendo las recomendaciones del encargado del proyecto y si es el caso el material obtenido se puede reutilizar de manera inmediata realizando el proceso de mezclado con los agentes mejorantes del asfalto y colocándolo en el sitio de extracción mediante una sola pasada mejorando así, los tiempos de ejecución. (GALINDO, 2019)

Escarificación del pavimento asfáltico

Mediante este método se puede desprender el material de la carpeta asfáltica ya deteriorada hasta la subrasante, haciendo uso del escarificador que generalmente se ubica en la motoniveladora, que es una maquinaria versátil a la hora de retirar el material existente, ya que cuenta con fuerza y potencia que garantizan un buen desempeño y precisión. Posteriormente con el material obtenido se procede a retirarlo, tratarlo y reutilizarlo si es el caso. (Morales, 2021)

El procedimiento consiste en utilizar la herramienta de escarificación mediante el avance de la herramienta de la maquinaria de forma paralela a la superficie del terreno la cual genera un área de corte con una profundidad mayor que el ancho de escarificación. (GALINDO, 2019)

6.2.7. Almacenamiento del pavimento asfáltico reciclado

La correcta implementación de material de RAP dentro de la mezcla asfáltica implica el desarrollo de técnicas adecuadas para el almacenamiento y procesamiento del RAP, en busca de lograr un material más homogéneo. Debe considerarse que largos periodos de almacenamiento de material de RAP aceleran los procesos de oxidación debido a la exposición directa del aire, lo cual revela la necesidad de controlar el almacenamiento del material recuperado. (Argüello, 2019)

Además, reciclar el asfalto crea un ciclo de reutilización que optimiza el uso de los recursos naturales y permite mejorar la industria del pavimento asfaltico. Para la producción de mezclas asfálticas de calidad con altos contenidos de RAP, es necesario manejar adecuadas prácticas de gestión de materiales. (Bellen, 2019)

La construcción de vías por medio del pavimento reciclado brinda beneficios que mejoran los rendimientos, costos y preservación del medio ambiente. Esta práctica reduce el almacenamiento de los materiales fresados en botaderos autorizados y la utilización racional de los recursos naturales que deben ser explotados para extraer el material, es decir que habrá una disminución de la explotación de canteras. (Juana del Pilar Álvarez, 2021)

6.3. MARCO LEGAL

El pavimento asfáltico reciclado, dentro de la normatividad colombiana se encuentra en el artículo 460 de las normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013a) en donde se establece parámetros de aceptación para este material fresado. Adicionalmente en la sección 450 del IDU se encuentran las especificaciones para el reciclaje de pavimento asfáltico estabilizados con emulsión asfáltica. (Suarez, 2020)

Ensayos

Los ensayos para determinar las propiedades físicas del asfalto se encuentran en las secciones 700 y 800 de las normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías, más específicamente:

- INV E-706-13 Penetración de materiales bituminosos
- INV E-716-13 Viscosidad absoluta
- INV E-702-13 Ductilidad de los materiales asfálticos
- INV E-709-13 Punto de ignición
- INV E-712-13 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos
- INV E-720-13 Efectos del calor y aire sobre el asfalto en lamina delgada y rotatoria
- INV E-732-13 Extracción de asfalto
- INV E-218 y 219 Resistencia al desgaste (máquina de los ángeles)
- INV E-213-13 Granulometría de los agregados

7. METODOLOGÍA

7.1. Tipo de investigación

El presente informe se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo no experimental, por medio de la realización de una revisión bibliográfica sistemática. Dicha revisión se basa en una investigación metódica en aras de acopiar la información necesaria y acertada del tema en estudio, más enfáticamente sobre el pavimento asfáltico reciclado, con la ambición de profundizar y comprender todos los conceptos y conocimientos de la temática en investigación.

Este tipo de estudio enfocado en lo cuantitativo no experimental comprende la recolección de datos fundamentados en fuentes bibliográficas de carácter científico y teórico. En otras palabras, se trata de un análisis pretérito y expositivo de la información recolectada de diversas fuentes bibliográficas, investigaciones y estudios. Sin embargo, cabe mencionar la importancia que posee la búsqueda confiable de información, ya que da pie a el desarrollo óptimo de la investigación; es por ello, que el presente informe se sustenta en la recopilación de datos e información suministrada por informes, monografías, múltiples tesis de pregrado y posgrado, además de numerosa bibliografía presente en bases de datos académicas y en general fuentes primarias.

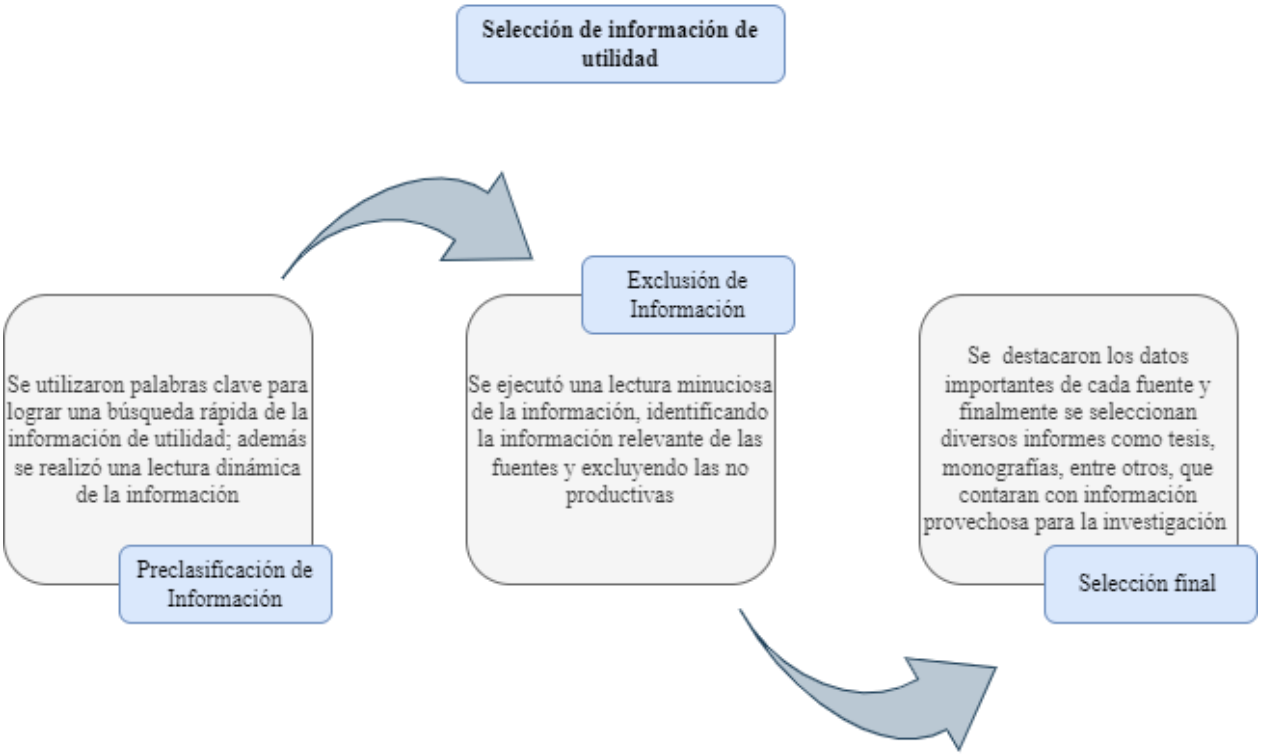
7.2. Recopilación y análisis de información

En primera instancia, como punto de partida para llevar a cabo la ejecución de la investigación se puso en consideración primeramente lo expuesto en el planteamiento de problema, a fin de identificar el curso de la investigación y, asimismo, determinar las diversas técnicas de recopilación de datos, con el interés de seleccionar prósperamente la información de utilidad, su técnica de búsqueda y finalmente la recolección óptima de la información o datos provechosos en la investigación.

Dicho lo anterior, se expone a continuación las fases desarrolladas para llevar a cabo correctamente las técnicas, instrumentos de acopio y análisis de información del tema es estudio.

I. Selección de información de utilidad

En esta fase se recopiló la información procedente de informes, artículos, monografías, entre otros que resultaron de gran provecho. Sin embargo, es importante detallar el proceso de selección previo de la información que se realizó para determinar su utilidad.



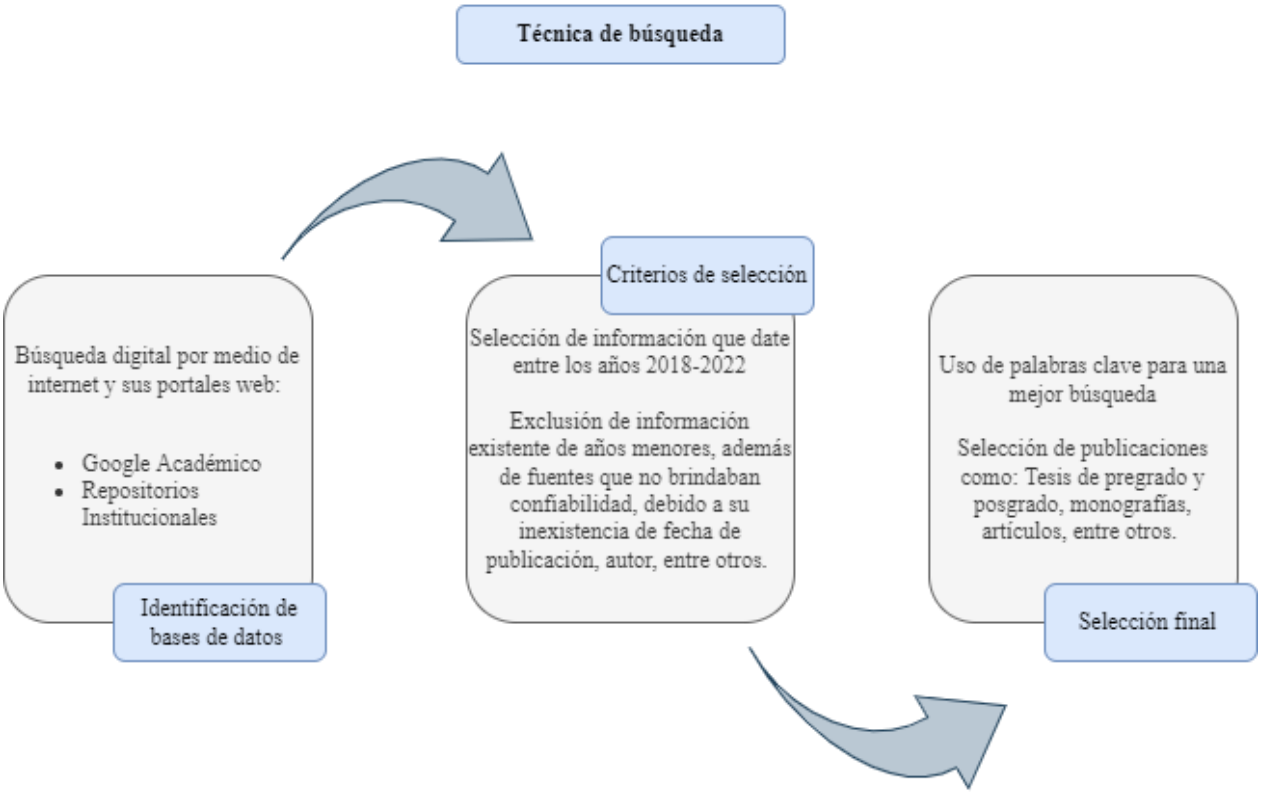
***Esquema 1**: Selección de información de utilidad. **Fuente**: Elaboración propia*

II. Técnica de búsqueda

En esta fase se recopiló la información de manera digital, identificando las bases de datos especializadas que brindaron utilidad. Asimismo, por medio de internet y sus portales web,

además de bases de datos académicas tales como, repositorios institucionales, se tuvo acceso a informes, artículos, tesis, monografías, entre otros, que fueron productivas para la investigación.

Haciendo énfasis en lo anterior, es oportuno mencionar los criterios de selección que se tuvieron en cuenta a la hora de elegir la información; primeramente, se realizó un filtro en la investigación, consultando y seleccionando informes que datan entre los años 2018-2022. De la misma manera, se utilizaron palabras clave acordes con la temática en estudio que posibilitaran una mejor búsqueda de la información requerida, y finalmente, se prescindió de aquellos informes que no brindaban la confiabilidad necesaria para su selección como referencia en la investigación.



***Esquema 2**: Técnica de búsqueda. **Fuente**: Elaboración propia*

III. Recolección óptima de la información

Inmediatamente después de haber culminado la fase anterior con éxito, se procedió a analizar la documentación seleccionada, valorando cada apartado de sus contenidos y recopilando la información de interés. Dicho esto, algunos de los temas o definiciones recolectadas de las diversas fuentes, fueron relevantes para la construcción del marco teórico, conceptual, entre otras definiciones importantes para llevar a cabo exitosamente la ejecución y comprensión de la investigación y su temática a tratar. Además, se seleccionaron 5 trabajos con el fin de revisar y examinar el comportamiento de las características físicas y mecánicas del material reciclado frente a distintos usos en la rehabilitación de carreteras.

8. APLICACIÓN Y USOS PRINCIPALES DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO

El material asfáltico reciclado puede ser destinado para múltiples usos dependiendo de las condiciones en las que este se encuentra, las cuales se determinan y analizan mediante distintos ensayos de laboratorio, como lo pueden ser la granulometría del agregado, la gravedad especifica, entre otros. La utilización de este surge como una alternativa sostenible, desde el punto de vista económico y ambiental, ya que su implementación disminuye la explotación de agregados pétreos y la extracción de materiales granulares de las diversas fuentes hídricas, además se necesita menos energía para producir un firme reciclado con respecto a la construcción de un pavimento convencional.

Dicho esto, con el pavimento asfáltico reciclado pueden construirse y diseñarse estructuras de pavimentos empleando materiales escarificados o fresados que con frecuencia se desecharían. Las principales aplicaciones del RAP se dan en la construcción y el mantenimiento de carreteras de la siguiente forma:

- Material de relleno: El RAP ha sido utilizado como relleno de construcción; no obstante, no se recomienda esta práctica puesto que se subestima el valor económico que puede aportar el mismo. (Argüello, 2019)
- Agregado para base o subbase: El agregado del material asfáltico reciclado es procesado para luego ser mezclado con diferentes materiales vírgenes, dando como resultado la obtención de una base o subbase granular para componer una estructura de pavimento.
- Agregado para bases estabilizadas: El agregado del material asfáltico reciclado es procesado y estabilizado con elementos que mejorar las condiciones físicas del mismo

para luego ser compactado y nivelado con el fin de obtener una base con una gran capacidad mecánica.

- Mezcla asfáltica nueva: Esta nueva mezcla asfáltica puede obtenerse mediante los reciclados realizados en planta o in situ, como se ha descrito en los procedimientos anteriores.
- Adoquines: El material reciclado en pocas ocasiones ha sido destinado para crear bloques de asfalto como adoquines, aunque en algunos estudios anteriores se menciona que estos muchas veces presentaban problemas con la cohesión de las partículas, por lo que solo se recomienda emplearlos para vías con flujo bajo de vehículos.

9. VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS DE RECICLAJE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO

El uso de las diversas técnicas de reciclado de pavimentos asfálticos implica primordialmente el aprovechamiento significativo de los numerosos materiales o recursos disponibles en una obra, además de múltiples beneficios que trae consigo su implementación. Por tal motivo, las principales ventajas de las técnicas de reciclaje del pavimento asfáltico son:

TÉCNICA DE RECICLAJE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO	VENTAJAS
Reciclado en frío	✓ Alta calidad estructural del pavimento. ✓ Óptimo control de calidad en materiales, tales como, emulsión y material granular. ✓ Menor impacto ambiental, gracias al menor consumo energético debido a la no utilización de altas temperaturas ni material granular nuevo, evitando emisiones por transporte y por proceso de fabricación. ✓ Eliminación temporal de fisuras reflejas y otras fallas en pavimento.
Reciclado en caliente	✓ Corrige las deficiencias de origen superficial y estructural. ✓ Elimina fisuras y fallas más delicadas en el pavimento flexible, por tanto, mejora la rugosidad y la resistencia al deslizamiento. ✓ Mezcla asfáltica con mayor resistencia al agua e intemperismo. ✓ Incremento de la capacidad resistente del pavimento.
Reciclado en planta (Caliente o frío)	✓ Mejora la resistencia al deslizamiento. ✓ Produce mezclas asfálticas de mejor calidad. ✓ Se logra un control en la corrección de dosificaciones y calidad de los materiales. ✓ El reciclado en frío puede ejecutarse con o sin aporte de áridos extra.

Reciclado in situ	✓ Admite corregir las características de las mezclas asfálticas superficiales (6 a 7 cm) con deformaciones plásticas. **Frío** ✓ Se requiere de menor energía por la funcionalidad de las maquinarias in-situ. ✓ Reduce la producción de CO_2. ✓ Permite reciclar en mayores espesores de material. **Caliente** ✓ No degrada significativamente los agregados pétreos. ✓ Permite el flujo vehicular con mayor rapidez.

Tabla 1: *Ventajas de las técnicas de reciclaje del pavimento asfáltico.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

10. IMPLEMENTACIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO EN COLOMBIA

En Colombia se ha implantado el sistema de reciclaje de pavimentos en frío para diversos proyectos, se pueden nombrar algunas experiencias al respecto tales como: la vía Puerto López – Puerto Gaitán (Meta), Quibdó – Yuto (Choco), Medellín – Santuario (Antioquia), Cali - Loboguerrero (Valle del Cauca), Manizales - Mesones (Caldas), Autopista Bogotá – Villavicencio (Cundinamarca), entre otras. En la ciudad de Bogotá se ha llevado a cabo algunos trabajos de reciclaje en frío en vías principales, como: Av. Américas, Av. 68, Av. Boyacá, Av. Lara Bonilla. Calle 127 y en algunas vías de las localidades de: Engativá, Los Mártires, Kennedy, Usme, Bosa, entre otras. (DIANA GÓMEZ, 2018)

Del mismo modo, en el departamento de Antioquia también se ha llevado a cabo la implementación de esta técnica en la vía al mar destacándose los tramos: Uramita-Dabeiba-Mutatá-Chigorodó y El Tres-Turbo. (Yury Ortega, 2018)

Ilustración 4: *Implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia.* ***Fuente:*** *Elaboración propia en ArcGIS*

Ilustración 5: *Implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia.* ***Fuente:*** *Elaboración propia en ArcGIS*

	Puerto López - Puerto Gaitán (Meta)		Autopista Bogotá - Villavicencio
	Quibdó - Yuto (Choco)		Manizales - Mesones (Caldas)
	Medellín - Santuario (Antioquia)		Uramita - Dabeiba
	Cali - Loboguerrero (Valle del Cauca)		Mutatá - Chigorodó
	Tuluá – Buga (Valle del Cauca)		Bucaramanga - Pamplona
	Sibaté – Soacha (Cundinamarca)		Pamplona – Cúcuta (Norte de Santander)

Tabla 2: *Distintivo de vías con la implementación del pavimento asfáltico reciclado en Colombia.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

En las figuras mostradas anteriormente, se puede observar que el pavimento asfáltico reciclado es más utilizado hacia el interior del país, principalmente en lugares que cuentan con un clima frío, templado o tropical como lo son los departamentos de Cundinamarca, Caldas, Antioquia y Santander.

Ilustración 6: *Implementación del RAP en Bogotá.*

Fuente: *https://www.radiosantafe.com/2012/06/05/bogota-pavimentara-sus-calles-con-asfalto-reciclado-y-llantas/*

Definitivamente su uso es más frecuente en la ciudad de Bogotá, destacándose su aplicación en las avenidas más importantes de esta y en los municipios pertenecientes al departamento de Cundinamarca como Girardot, Soacha, Sibaté, entre otros. Otra ciudad que resalta con la aplicación del RAP es Medellín, ya que en esta se han realizado múltiples trabajos de restauración y rehabilitación de calles con dicho material, siendo la técnica de reciclaje en frío la más empleada; además de un par de intervenciones en la ruta que conduce al mar en los tramos mencionados anteriormente.

Ilustración 7: *Vías intervenidas con RAP en la localidad de Suba-Lisboa, Bogotá.*

Fuente: *https://journal.universidadean.edu.co/index.php/Revistao/article/view/2422/1982*

En la costa Caribe hasta el momento han sido muy pocos los lugares en los cuales se han empleado las técnicas de reciclaje, aun así, se puede mencionar que en la isla de San Andrés se realizó un reciclaje en frío in situ para la rehabilitación de una vía secundaria y que a principios de la década del 90 se ejecutaron obras de rehabilitación en los tramos de Cereté – Lorica y Lorica – Coveñas en el departamento de Córdoba y Sucre.

11. REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO

Las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas van de acuerdo con la humedad, asfalto y agregado utilizado en su producción, como lo indica la siguiente tabla. (RODRIGUEZ, 2021)

Tipo de Propiedades	Caracteristicas	Rango de valores
FÍSICAS	Peso unitario	1940-2300 Kg/m³ (120-140 Lb/ft³)
	Contenido de humedad	Normal por encima de 5%
	Contenido de asfalto	Máximo: 7% - 8% Normal: 4.5% - 6% Rango Máximo: 3% - 7%
MECÁNICAS	Penetración del asfalto	Normal: 10 – 80 a 25°C (77°F)
	Viscosidad absoluta del concreto asfáltico recuperado	Normal: 4.000 – 25.000 poises a 60°C (140°F)
	Peso unitario compactado	1600 – 2000 Kg/m³ (100-125 Lb/ft³)
	CBR	100% RAP: 20 – 25%

Ilustración 8: *Características físicas y mecánicas del RAP.*

Fuente: *https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8404/1/862206-2021-I-GA.pdf*

Dentro de la revisión documental realizada, se escogieron 5 informes con el fin de realizar un análisis detallado acerca del comportamiento físico y mecánico del material asfáltico reciclado frente a distintos usos, formas de reciclaje y diseño de mezclas asfálticas.

Los resultados obtenidos en dichos informes se presentan a continuación:

Informe N°1	Información	Granulometría y contenido de asfalto	Índice de desgaste (Máquina de los ángeles)	Resistencia a la tracción indirecta	Resultado
Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100% de pavimento asfáltico reciclado. (Rodolfo Arias, 2019)	Las muestras obtenidas para la realización del estudio se tomaron directamente en planta y no proveniente del fresado. **Tipo de mezcla:** en frío.	La granulometría realizada estuvo bien gradada. El porcentaje de asfalto obtenido del ensayo de extracción de asfalto fue de 6,6%.	El índice de desgaste fue de 32,2%, lo cual es satisfactorio ya que se encuentra por debajo del máximo establecido por la norma (40%).	El diseño de mezclas realizado no cumplió con este parámetro, ya que el valor más alto fue de 1,09 MPa y el mínimo debe ser de 2,0 MPa.	El material reciclado cumplió con todas las características físicas ensayadas. También se definió que la tracción indirecta no es un criterio adecuado para el diseño de mezcla con el material reciclado del pavimento asfáltico.

Tabla 3: *Revisión informe #1.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Informe N°2	Información	Granulometría	Fatiga	Ahuellamiento	Resultado
Desempeño del pavimento con mezcla reciclada RAP y grano de caucho reciclado GCR. (Ana Sofía Figueroa Infante, 2020)	La selección del material reciclada fue obtenida de un acopio principal en Bogotá, donde se llevan a cabo procesos de mejoramiento vial a partir del fresado. **Tipo de mezcla:** MDF-25	El material extraído no cumplió con el límite inferior, así que tuvo que ser corregido con la adición de agregado fino virgen. Al final fue escogida la mezcla densa en frío con un TMN de 25 mm.	El resultado del ensayo fue que la mezcla con el material reciclado presenta mayor deformación que la mezcla modificada con GCR.	El material estuvo sometido a condiciones de alto tráfico. La deformación plástica de las 6 briquetas ensayadas dio en promedio 0,30 cm.	La adición de CRL-1 y GCR, mejoraron los resultados de deformación de las mezclas con pavimento reciclado.

Tabla 4: *Revisión informe #2.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Informe N°3	Información	Granulometría y contenido de asfalto	Densidad	Resistencia, Inmersión y desgaste	Resultado
Monografía del uso de RAP (pavimentos asfáltico-reciclados) para la rehabilitación de vías urbanas del municipio de Girardot – Cundinamarca. (MARILY MONROY LINAREZ, 2020)	El material fresado fue obtenido de un acopio ubicado en Siberia, Cundinamarca. La muestra fue de 300 kg de material reciclado. **Tipo de mezcla:** MDC-19 70% de mezcla densa en caliente y 30% de RAP.	La granulometría cumplió, ya que se encontraba dentro de los límites establecidos en la norma. El porcentaje de asfalto obtenido del ensayo de extracción de asfalto fue de 6,31%.	Emplearon dos dosificaciones, una de 95 y otra de 105 l/m^3 de emulsión. Dando como resultado que a mayor cantidad de emulsión la densidad es menor.	Los especímenes elaborados tuvieron un buen desempeño, ya que superaron los esfuerzos mínimos de 20 kg/cm^2. **Desgaste:** 45% para la dosificación de 95 l/m^3 y 41% para la dosificación de 105 l/m^3. Las mezclas en frio no tienen un buen desempeño frente al desgaste.	Como conclusión, el material reciclado en frío es el más viable y empleado en la región. En la evaluación de costos, el empleo de material reciclado en planta reduce los costos de producción ya que aporta volúmenes considerables de agregado.

Tabla 5: *Revisión informe #3.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Informe N°4	Información	Granulometría y contenido de asfalto	Diseño Marshall	Ensayos	Resultado
Uso de rejuvenecedor en pavimentos reciclados (RAP) para elaboración de mezcla asfáltica caliente en sitio utilizada como rodadura en carpeta. (DIEGO LUIS CASTIBLANCO PRIETO, 2020)	El material reciclado fue obtenido de un acopio principal por medio de fresado. **Tipo de mezcla:** en caliente.	La granulometría realizada contiene mucho material grueso y pocos finos. El porcentaje de asfalto obtenido del ensayo de extracción de asfalto fue de 4,9%. La curva granulométrica después de la extracción dio como resultado un tipo de mezcla MDC-20.	Utilizaron tres materiales: RAP, rejuvenecedor y emulsión asfáltica para llegar al porcentaje total de asfalto en la mezcla. Realizaron un total de 9 combinaciones de contenido de asfalto y 3 briquetas por cada una de ellas.	Se ejecutaron dos ensayos base, que fueron estabilidad y flujo. El primero logró cumplir con lo requerido para la combinación con rejuvenecedor y cualquier incremento de asfalto; mientras que el segundo, no pudo satisfacer los parámetros establecidos en ninguna de las combinaciones planteadas. Sin embargo, pese a ello el ensayo de ahuellamiento fue satisfactorio, cumpliendo con los valores estipulados en la normativa vigente.	En conclusión, los resultados obtenidos en la mezcla fueron óptimos, inclusive se alcanzaron buenos valores de estabilidad. El comportamiento general de la mezcla fue satisfactorio, brindando cumplimiento en la pluralidad de parámetros exigidos por la normatividad. Sin embargo, se dedujo que, en los parámetros no cumplidos, se puede lograr una mejoría adicionando material nuevo para una adecuada gradación.

Tabla 6: *Revisión informe #4.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

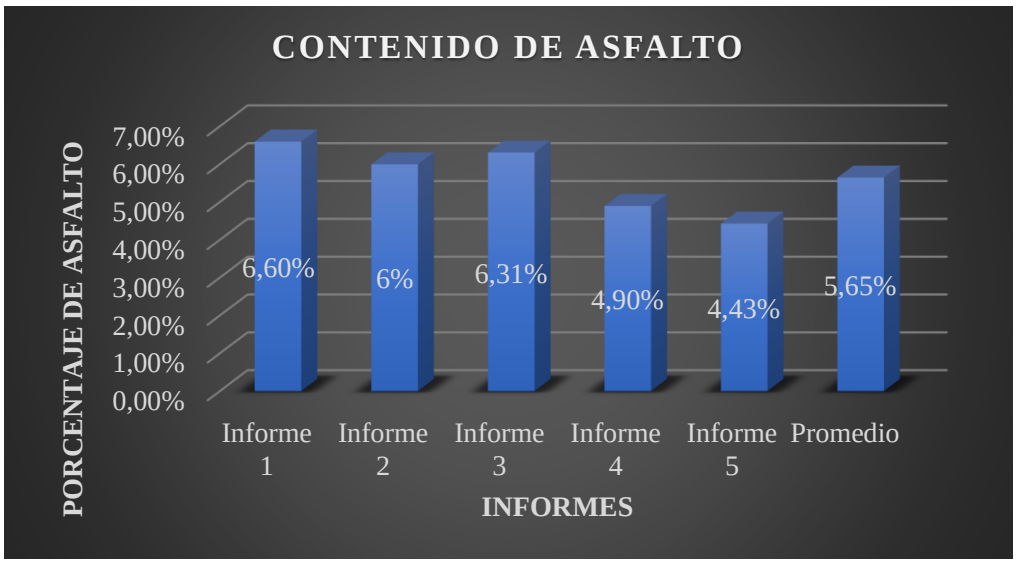
Informe N°5	Información	Granulometría	Índice de desgaste (Máquina de los ángeles)	Otros Ensayos	Resultado
Caracterización de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP), extraído de la autopista sur a la altura de los municipios de Soacha y Sibaté Cundinamarca, con el fin de determinar su uso en capaz granulares no tratadas en una estructura de pavimento. (Cristian Camilo Peña Urrea, 2021)	El material presentó conservación de gran parte de las propiedades ingenieriles, a pesar de que la carpeta asfáltica originaria de la extracción del RAP estuvo en servicio aproximadamente por más de 20 años. **Contenido de asfalto en promedio:** 4,43%	Se realizaron 3 ensayos con diversas masas, los cuales al graficar las correspondientes curvas granulométricas en aras de comparar los limites superiores e inferiores que plantea la normativa, respecto a los resultados obtenidos, fue posible evidenciar un desfase, haciendo pertinente acudir a la ejecución de un ajuste granulométrico adicionando partículas de determinados tamaños, para lograr las curvas deseadas.	Los resultados obtenidos determinaron que el material presentó diversas cualidades mecánicas relevantes que cumplen con la normativa, además de cumplir satisfactoriamente con lo requerido para ser empleado como base granular, subbases y afirmados.	Se logró evidenciar que el RAP examinado tuvo una resistencia a la abrasión óptima, dentro del rango estipulado por la normativa. El ensayo de 10% de finos determinó que el material presentó una apropiada resistencia al fracturamiento, haciendo factible técnicamente su uso como base granular. El CBR no se encontró entre los rangos de admisión de la normativa para bases granulares.	Según el estudio desarrollado, el RAP examinado fue un material con características técnicas semejantes a lo estipulado por la normativa, referente para subbases granulares y afirmados. En consecuencia, de ello, se infirió el material se encontró en condiciones para suplir de manera parcial o total las capas mencionadas anteriormente, en una estructura de pavimento determinada.

Tabla 7: *Revisión informe #5.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

12. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DEL MATERIAL ASFÁLTICO RECICLADO

12.1 Contenido de asfalto

En la siguiente gráfica se muestra una comparación del porcentaje de asfalto obtenido mediante el ensayo de extracción del asfalto en cada uno de los 5 informes revisados anteriormente.



Gráfica 1: *Contenido de asfalto.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Como se puede observar en la gráfica 1, el mayor contenido de asfalto se dio en el informe 1 con un 6,6%, mientras que el menor se dio en el informe 5 con un valor de 4,43%. Al realizar un promedio entre los 5 trabajos se obtuvo un valor de 5,65%, lo que representa que el contenido de asfalto es normal. Los anteriores valores dependen mucho de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado, en general de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica.

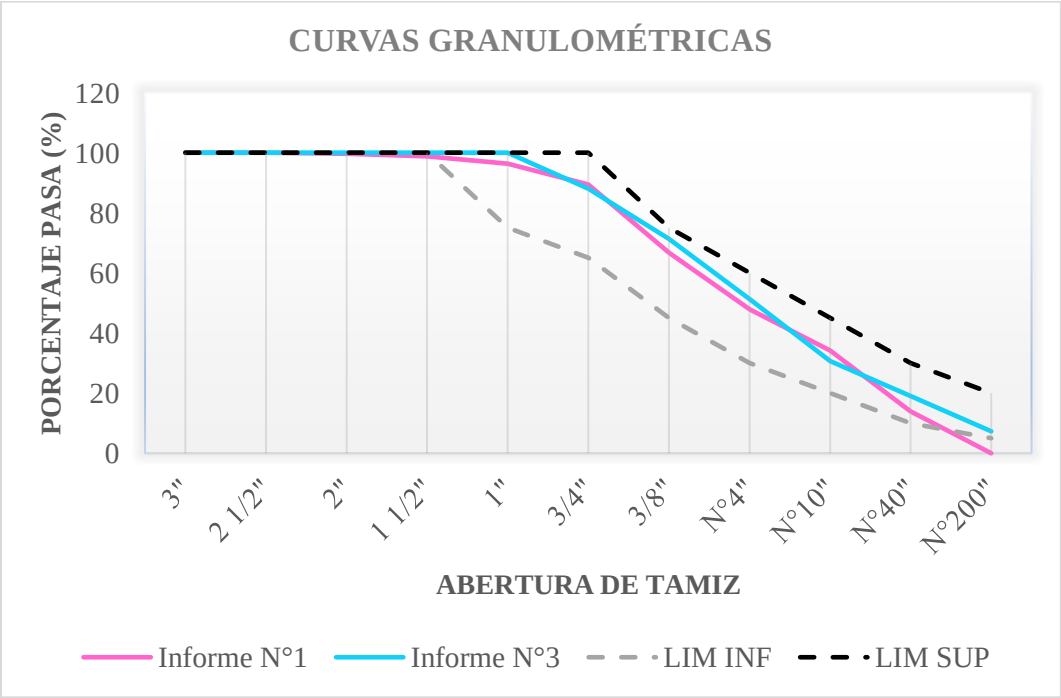
12.2 Granulometrías

A continuación, se evidencian los valores obtenidos en el ensayo granulométrico de los diversos informes analizados, respecto a la normativa INVIAS.

Informe N°1		Informe N°3		Artículo 461-13, Tabla 461-1	
				LIM INF	LIM SUP
TAMIZ	% PASA	TAMIZ	% PASA	% PASA	% PASA
3"	100	3"	100	100	100
2 1/2"	100	2 1/2"	100	100	100
2"	99,6	2"	100	100	100
1 1/2"	98,8	1 1/2"	100	100	100
1"	96,3	1"	100	75	100
3/4"	89,4	3/4"	88	65	100
3/8"	66,7	3/8"	71,3	45	75
N°4"	47,9	N°4"	51,3	30	60
N°10"	34,2	N°10"	30,7	20	45
N°40"	13,9	N°40"	19	10	30
N°200"	0	N°200"	7,3	5	20

Tabla 8: *Comparación de granulometrías de informes N°1 y N°3.* ***Fuente****: Elaboración Propia*

En la gráfica 2 se muestra el comportamiento de las curvas granulométricas de los informes N°1 y N°3 realizadas en los informes revisados.



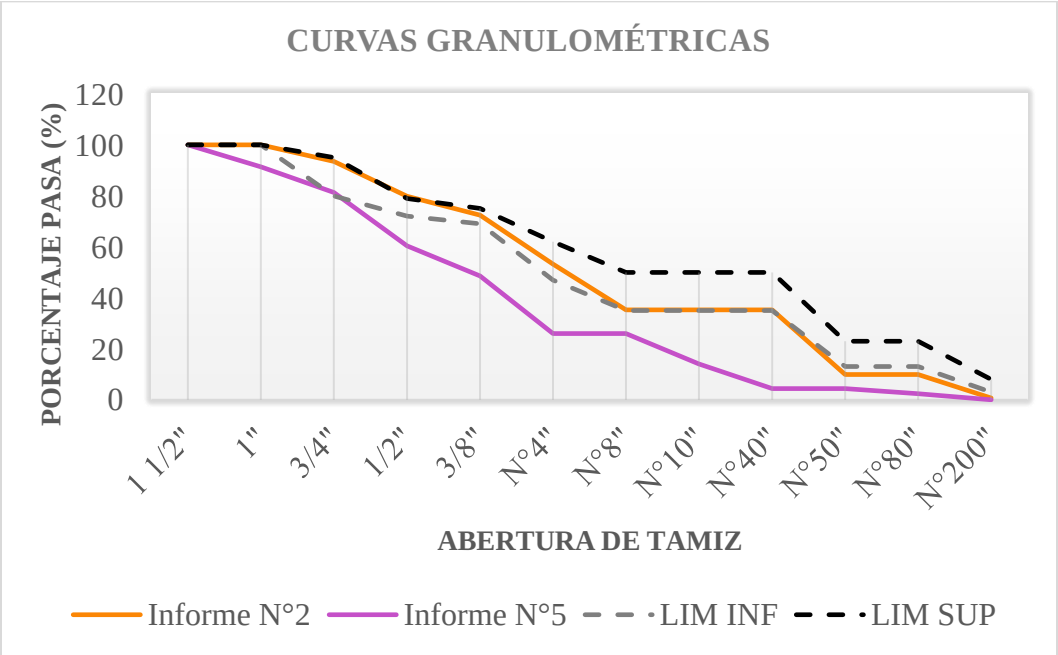
Gráfica 2: *Curvas granulométricas de informes N°1 y N°3.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Como se evidencia en la gráfica, las curvas granulométricas de los respectivos informes cumplieron con los límites establecidos en la norma INVIAS, específicamente en el artículo 461-13 alusivo a los agregados reciclados en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos. Con ello, es acertado decir que ambas investigaciones cuentan con una buena gradación, lo cual contribuyó a su óptimo desempeño en los resultados finales obtenidos.

Informe N°2		Informe N°5		Norma INV E-123-13	
				LIM INF	LIM SUP
TAMIZ	% PASA	TAMIZ	% PASA	% PASA	% PASA
1 1/2"	100	1 1/2"	100	100	100
1"	100	1"	91,43	100	100
3/4"	93,5	3/4"	81,34	80	95
1/2"	79,77	1/2"	60,43	72	79
3/8"	72,44	3/8"	48,53	69	75
N°4"	53,2	N°4"	25,99	47	62
N°8"	35,26	N°8"	25,99	35	50
N°10"	35,26	N°10"	14,09	35	50
N°40"	35,26	N°40"	4,4	35	50
N°50"	9,91	N°50"	4,4	13	23
N°80"	9,91	N°80"	2,36	13	23
N°200"	0,7	N°200"	0	3	8

***Tabla 9**: Comparación de granulometrías de informes N°2 y N°5. **Fuente**: Elaboración propia*

En la gráfica 3 se muestra el comportamiento de las curvas granulométricas de los informes N°2 y N°5 respecto a la norma INV E-123-13



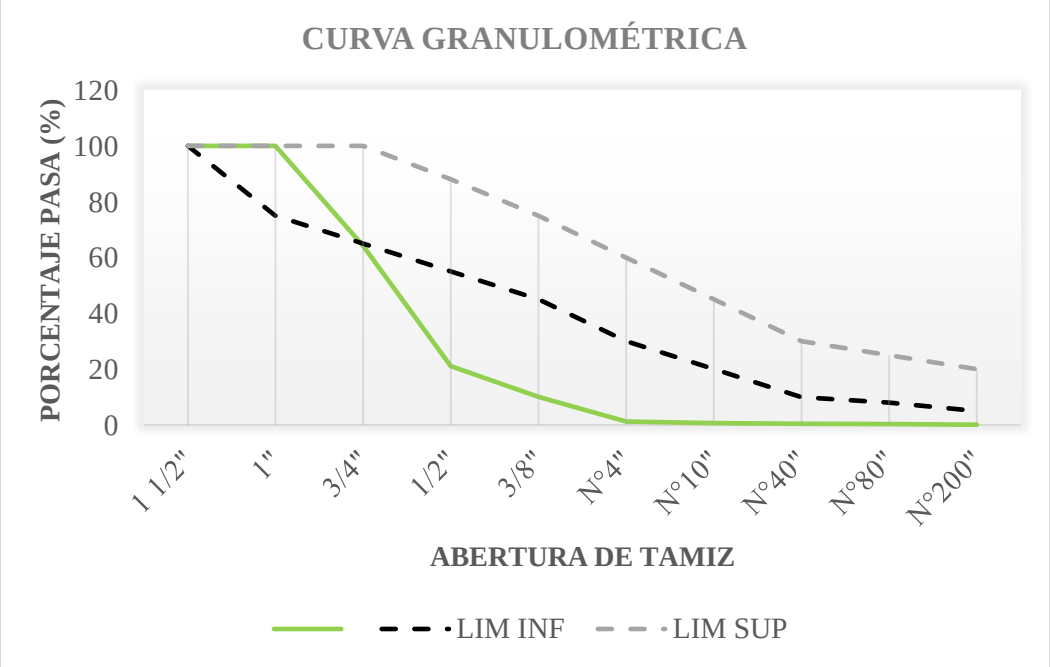
***Gráfica 3**: Curvas granulométricas de informes N°2 y N°5. **Fuente:** Elaboración propia*

Como se evidencia en la gráfica, las curvas granulométricas de los respectivos informes no cumplieron con los límites establecidos en la norma INV E-123-13. Se observa un pequeño desface en la franja granulométrica del informe N°2 respecto al límite inferior y un rotundo incumplimiento de ambos límites de la franja granulométrica del informe N°5. Por lo cual, al no encontrarse dentro de los rangos se acudió a un ajuste mediante la adición de agregado virgen y de partículas con tamaños determinados con el fin de lograr la curva deseada.

Informe N°4		Norma INV E-213-13	
		LIM INF	LIM SUP
TAMIZ	% PASA	% PASA	% PASA
1 1/2"	100	100	100
1"	100	75	100
3/4"	64,2	65	100
1/2"	21,1	55	88
3/8"	10,1	45	75
N°4"	1,2	30	60
N°10"	0,7	20	45
N°40"	0,5	10	30
N°80"	0,3	8	25
N°200"	0,1	5	20

***Tabla 10**: Granulometría de informe N°4. **Fuente**: Elaboración propia.*

En la gráfica 4 se muestra el comportamiento de la curva granulométrica del informe N 4° respecto a la norma INV E-213-13



***Gráfica 4**: Curvas granulométricas de informe N°4. **Fuente:** Elaboración propia*

Haciendo hincapié en la gráfica expuesta anteriormente, es posible evidenciar que la gradación del material no cumple con los límites establecidos por la norma INV E-213-13. Es por tal motivo que se optó por la implementación de partículas de determinados tamaños y agregado virgen, para lograr la curvatura deseada y de tal manera cumplir con lo establecido en la normatividad para lograr un adecuado desempeño y resultado final de la mezcla en la investigación realizada.

12.3 Índice de desgaste y resistencia

En cuanto al desgaste, el comportamiento fue variado, ya que en algunos trabajos se mantuvo por debajo del valor máximo (40%) establecido en la norma INV E-218-13, mientras que, en otras ocasiones, como en los resultados obtenidos por el informe 3, fue superado, llegando a la conclusión de que las mezclas en frío no tienen un buen rendimiento en cuanto al desgaste.

El material reciclado en general tuvo un buen desempeño en cuanto a la resistencia a la compresión, debido a que superaron los esfuerzos mínimos y a su vez a la abrasión, ya que los resultados obtenidos se encontraron dentro del rango establecido por las normas INVIAS.

13. ANÁLISIS DE COSTOS

En la tabla 11 se pueden observar los precios unitarios acerca de las actividades para la construcción de una estructura de pavimento convencional empleando materiales vírgenes, mientras que, en la tabla 12 se evidencian los precios correspondientes al reemplazo de la subbase granular en su totalidad por pavimento asfáltico reciclado. En cada uno de ellos se contempla el suministro, transporte e instalación de los materiales. Estos precios fueron obtenidos del Instituto de Infraestructura y Concesiones de Cundinamarca (ICCU), utilizando como ejemplo al municipio de Chocontá.

Descripción	Unidad	Precio Unitario
Subbase granular	m^3	$ 174.406,00
Base granular	m^3	$ 185.094,00
Afirmado	m^3	$ 83.215,00
Relleno con material del sitio compactado mecánicamente	m^3	$ 23.110,00
Total	$	465.825,00

Tabla 11: *APU de una estructura de pavimento construida con subbase granular y afirmado virgen.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

Descripción	Unidad	Precio Unitario
Fresado concreto asfaltico (E=5-12 cm)	m^2	$ 6.176,00
Base granular	m^3	$ 185.094,00
Afirmado	m^3	$ 83.215,00
Relleno con material del sitio compactado mecánicamente	m^3	$ 23.110,00
Total	$	297.595,00

Tabla 12: *APU de una estructura de pavimento construida reemplazando la subbase granular en su totalidad con RAP.* ***Fuente:*** *Elaboración propia*

14. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al analizar la información acopiada mediante el apoyo de diversas fuentes primarias para el desarrollo óptimo de la revisión sistemática, fue posible evidenciar la viabilidad y generación de ahorro de costos que produce la implementación de la técnica de reciclado de pavimentos asfálticos, puesto que permite aprovechar los diferentes materiales que se sitúan en las vías, justo después de haber cumplido con su vida útil, haciendo posible el mejoramiento y rehabilitación de las carpetas asfálticas de las vías en servicio, contribuyendo con la conservación de los recursos naturales y a su vez, apostando por lograr forjar ciudades y comunidades sostenibles, como se estipula en el objetivo de desarrollo sostenible número 11.

En la revisión bibliográfica realizada donde fueron analizados 5 informes, todos ellos relacionados con investigaciones, diseños y desempeño general del pavimento asfáltico reciclado (RAP), se pudo observar en los distintos resultados obtenidos de la fase de caracterización de sus muestras, más enfáticamente en los resultados granulométricos, que la gradación de las muestras fue muy desigual, puesto que los tamaños de las partículas eran muy variados y solo los resultados del informe N°1 y el informe N°3, cumplieron con los limites estipulados por la norma INVIAS en el artículo 461-13. Dicho esto, los informes restantes no cumplieron con lo establecido y tuvieron que recurrir a la adición de agregado virgen y partículas determinadas para lograr la curvatura deseada y cumplir con los limites superior e inferior de la norma INV E-213-13 y E-123-13 para alcanzar un resultado óptimo. Con ello es acertado decir, que la gradación de las partículas es un factor de gran envergadura, ya que esta disparidad granulométrica produce un comportamiento mecánico diferente de las mezclas y fue evidenciado en los resultados finales obtenidos de cada uno de los informes.

Por otro lado, haciendo énfasis en la variabilidad que presenta el RAP por ser originariamente un material recuperado de un pavimento, cuenta con propiedades en su materia que están sujetas al nivel de daño que ha sufrido el pavimento en el transcurso de su vida de servicio, lo cual trae consigo el acrecentamiento de la dispersión en el comportamiento de la mezcla en estudio; por lo cual es oportuno decir, que genera dificultad a la hora de controlar el contenido asfalto, los vacíos de aire presentados en la mezcla, la granulometría, entre otros aspectos más, cuando hay presencia de porcentajes altos de RAP. Sin embargo, haciendo alusión al contenido de asfalto utilizado en cada una de las investigaciones analizadas, se pudo observar una tendencia de valores que se mantienen entre un rango de 4% a 7% aproximadamente, obteniendo finalmente un contenido de asfalto normal, con un promedio de 5,65% del material. Dicho lo anterior, se puede decir que esto se debe en gran parte a los ajustes realizados en la gradación de las partículas para la obtención deseada de las granulometrías que cumplan con lo establecido.

En adición a lo anterior, otro aspecto influyente en la variabilidad del desempeño del pavimento asfáltico reciclado va acorde al almacenamiento que se le dé a este. Puesto que la adecuada implementación de RAP dentro del diseño de mezcla asfáltica involucra la buena ejecución de técnicas para el respectivo almacenamiento y procesamiento del material asfaltico reciclado, en aras de obtener un producto homogéneo y contribuir a controlar dicha variabilidad, teniendo en cuenta su exposición a la intemperie y contacto directo con el aire, que genera aceleración de la oxidación en el material.

15. CONCLUSIONES

- ✓ La implementación del pavimento asfáltico reciclado trae consigo diversos beneficios ambientales como la disminución de los procesos de explotación y trituración de agregados pétreos. Además, es una alternativa viable y económica, ya que su aplicación adecuada da como resultado una estructura perdurable, de alta calidad y de costos de producción y logística inferiores a los de un pavimento convencional. Impulsar el uso del material reciclado para el mejoramiento y restauración de la malla vial contribuye al desarrollo sostenible, cultural y económico del país.

- ✓ En Colombia la utilización del RAP es más común en la región Andina, destacándose principalmente los departamentos de Cundinamarca, Antioquia, Caldas, Santander y Tolima, siendo la técnica de reciclaje en frío la más empleada.

- ✓ El reciclaje in situ brinda mayores beneficios económicos que el reciclaje en planta, debido a que evita costos por el transporte, almacenamiento y reproducción del material asfáltico.

- ✓ Las características físicas y mecánicas del material asfáltico reciclado que fueron analizadas en cada uno de los informes revisados dieron resultados satisfactorios, ya que cumplieron con las especificaciones y requisitos establecidos en la norma del Instituto Nacional de Vías, demostrando que el material reciclado tiene las propiedades adecuadas para ser reutilizado en la rehabilitación y mejoramiento de las carreteras.

- ✓ El material reciclado puede ser destinado a diversos usos, dependiendo de las características y propiedades físicas y mecánicas previamente evaluadas. Aunque su utilización es más frecuente y eficiente en la conformación de bases y subbases granulares, ya que se ha demostrado que el material presenta un buen comportamiento y con la adición de nuevos materiales se garantiza la calidad de la vía.

- ✓ La temperatura es uno de los factores que más influencia tiene sobre las mezclas asfálticas, por tal motivo, este agente debe ser analizado con precisión ya que puede afectar las propiedades físicas y mecánicas del asfalto, principalmente la estabilidad, viscosidad y densidad, lo cual puede generar una disminución en el periodo de vida útil de la estructura.

16. RECOMENDACIONES

- ✓ Teniendo en cuenta la variabilidad y no homogenización que presenta el RAP, es recomendable que se realicen adecuadamente las caracterizaciones del material, a fin de estudiar y examinar que sus propiedades cumplan con los requisitos estipulados por la norma INVIAS, para dar garantía de su desempeño futuro y ejecutar a tiempo los ajustes que sean necesarios para lograr un óptimo funcionamiento durante la vida útil del material.

- ✓ Al enfatizar en lo expuesto por la norma del Instituto Nacional de Vías, es oportuno decir que no se cuenta con información suficiente en lo que respecta a las técnicas de reciclaje y en general a todo lo relacionado con el pavimento asfaltico reciclado. Por tal motivo, se recomienda la realización y puesta en práctica de un manual específico para este tipo de técnica y de tal manera ahondar en esta importante temática ya que su implementación trae consigo múltiples beneficios que pueden contribuir al desarrollo de una nación.

- ✓ Mantener una baja variabilidad del RAP es un factor de suma importancia, debido a que es un material recuperado de un pavimento que ya ha cumplido con su vida útil. Dicho esto, es recomendable llevar a cabo buenas prácticas en su almacenamiento, a fin de obtener un material un poco más homogéneo y aminorar la dispersión que pueda generarse en el comportamiento final de la mezcla en desarrollo.

- ✓ Si bien es cierto que las propiedades físicas y reológicas del asfalto son fundamentales para lograr un buen diseño, construcción y por lo tanto un buen comportamiento de la estructura y los materiales que la constituyen, es recomendable que se ejecuten ensayos reológicos en el asfalto que compone el material reciclado, a fin de lograr establecer cual tipo de asfalto posibilita un aumento en el porcentaje de material reciclado en la estructura a desarrollar.

17. REFERENCIAS

ACERO, P. C. (2020). Asfalto Liquido . *PROAGRIN C.A DISTRIUIDOR DE PRODUCTOS DE ACERO* , 1-2.

Ana Sofía Figueroa Infante, E. F. (2020). *Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR.* Bogotá, Colombia: Universidad de la Salle.

Argüello, F. M. (2019). *MEZCLAS ASFÁLTICAS CON RAP: PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RECICLADOS.* Costa Rica: PITRA-LanammeUCR.

Bedoya, Y. E. (2021). *Análisis de la información sobre la disponibilidad y las metodologías para determinar las propiedades de pavimento asfáltico recuperado (RAP) para ser utilizado como insumo en la preparación de nuevas mezclas asfálticas en caliente.* Bucaramanga: Universidad Santo Tomás.

Bellen, M. G. (2019). *UTILIZACION DE GRANULOS DE CAUCHO TRITURADO DE NEUMATICOS FUERA DE USO EN MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO CON EMULSION Y MATERIAL FRESADO.* Quito: Pontificia Universidad Catolica Del Ecuador.

Benites, W. V. (2020). *APLICACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES RECICLADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS PAVIMENTOS ECONÓMICOS EN EL PERÚ-2020.* Trujillo, Perú: Universidad Privada Del Norte .

Cristian Camilo Peña Urrea, L. F. (2021). *Caracterizacion de una muestra de pavimento asfáltico reciclado (RAP) extraido de la Autopista Sur a la altura de los municipios de Soacha y*

Sibaté Cundinamarca con el fin de determinar su uso como capa granular no tratada en una estructura de pavimento. Bogotá.

DIANA GÓMEZ, J. R. (2018). *ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL ACEITE USADO DE MOTOR EN LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON CONTENIDO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO.* IBAGUÉ: UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA.

DIEGO LUIS CASTIBLANCO PRIETO, J. C. (2020). *USO DE REJUVENECEDOR EN PAVIMENTOS RECICLADOS (RAP) PARA ELABORACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE EN SITIO UTILIZADA COMO RODADURA EN CARPETA.* BOGOTÁ DC: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS.

Emily Guerra Rodriguez, D. P. (2019). *Diseño de una mezcla Marshall para carpeta de rodadura empleando material fresado proveniente de Tecnopavimentos S.A y comparacion con mezcla asfaltica convencional.* Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga .

Galeas Verdezoto Bryan Mauricio, S. S. (2021). *Diseño de mezcla asfáltica tibia, mediante la utilización de asfalto.* Quito: UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.

GALINDO, A. (2019). *TÉCNICAS DE FRESADO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES APLICADOS EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA.* Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

Gerson Yeampier Cabanillas Hualpa, N. D. (2020). *CARACTERIZACIÓN DEL USO DE MÉTODOS RECICLABLES EN LA RESTAURACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES, CAJAMARCA 2020.* Cajamarca, Perú: Universidad Privada Del Norte .

JARA TRUJILLO RAQUEL ROCIO, P. P. (2020). *REUTILIZACIÓN DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RECICLADOS EN FRÍO, COMO ALTERNATIVA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS PROVISIONALES EN ASENTAMIENTOS HUMANOS EN LA CIUDAD DE LIMA – PERÚ*. Lima: Universidad Ricardo Palma.

Jaramillo Soto Washington Patricio, P. J. (2022). *Análisis comparativo del desempeño de mezclas asfálticas en frío con material reciclado (RAP) utilizando emulsión asfáltica y emulsión asfáltica modificada con aceite de motor desechado de vehículos.* Quito: Universidad Central Del Ecuador.

Juana del Pilar Álvarez, N. A. (2021). *Análisis de la variación de los costos económicos y las ventajas ambientales, que tiene la implementación de pavimentos asfálticos reciclados en la construcción de la Vía Distribuidora del Sur en Envigado (Antioquia).* Bogotá: Corporación Universitaria Unitec.

MARILY MONROY LINAREZ, J. F. (2020). *MONOGRAFÍA DEL USO DEL RAP (PAVIMENTOS ASFÁLTICOS RECICLADOS) PARA LA REHABILITACIÓN DE VÍAS URBANAS DEL MUNICIPIO DE GIRARDOT-CUNDINAMARCA.* GIRARDOT.

MAYRA ALEJANDRA FORERO TRIANA, M. A. (2020). *DISEÑO MARSHALL Y VERIFICACIÓN DE ADHERENCIA DE UNA MEZCLA.* BOGOTÁ: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

Morales, R. J. (2021). *ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN, ALMACENAMIENTO Y USO DEL MATERIAL DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO EN LAS DIFERENTES OBRAS VIALES.* Medellin: Universidad De Antioquia .

MORI, F. L. (2018). *PROPUESTA TÉCNICA DE APLICACIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE RECICLADO PARA REHABILITACIÓN VIAL - PACHACAMAC.* Lima: Universidad Peruana Los Andes.

Padilla, P. C. (2019). *Criterios de estandarización de emulsiones asfálticas para el reciclado en frío de pavimentos en el Distrito Metropolitano de Quito.* Quito: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ.

Rodolfo Arias, B. Y. (2019). *Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de transito de Colombia utilizando 100 % de pavimento asfaltico reciclado.* Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia.

RODRIGUEZ, J. L. (2021). *APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DEL SECTOR INDUSTRIAL EN LA PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL.* BOGOTÁ D.C: FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA .

ROJAS, H. A. (2019). *Evaluación del pavimento asfáltico reciclado como sustituto de agregado virgen en mezclas asfálticas en caliente.* COSTA RICA.

Rojas, R. V. (2020). *EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ELABORADAS CON RAP PROVENIENTE DE DESECHOS DEL INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO Y DE LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO VIAL QUE ESTÁN SIENDO APLICADAS EN VÍAS RURALES DE BOGOTÁ.* BOGOTÁ.

Suarez, C. O. (2020). *Aprovechamiento de llantas usadas e inclusión de pavimento asfáltico reciclado (RAP) para estructuras de pavimento en vías de bajo tránsito.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Vias, I. N. (2022). *Especificaciones generales de construccion de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras.* Bogotá D.C.

Yury Ortega, V. A. (2018). *Resultados de la aplicación de reciclado de pavimento asfáltico en los CIV de la localidad de Bosa y Suba.* Bogotá: Facultad de Ingeniería-Universidad EAN.