

**APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DEL SECTOR INDUSTRIAL EN LA  
PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA LA INFRAESTRUCTURA  
VIAL.**

**JULIETH LIZETH POLANIA RODRIGUEZ**

**PROYECTO INTEGRAL DE GRADO POR OPTAR AL TITULO:  
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

**ORIENTADOR:**

**JUAN CAMILO CELY  
INGENIERO QUIMICO**

**ASESOR:**

**CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS  
INGENIERO MECANICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C**

**2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

**Firma del director de la especialización**

---

**Firma del Calificador**

Bogotá D.C, Febrero de 2021

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claústro

(Dr.) Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

(Dr.) Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

(Dra.) María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

(Dr) Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

(Dra.) Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingeniería

(Dr.) Julio César Fuentes Arismendi

Directora de Programa

(Dra.) Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **DEDICATORIA**

A Dios y mi familia gracias por la fuerza dada en cada uno de los pasos dados en el ámbito personal y profesional. A mi familia por su inagotable apoyo en cada uno de los objetivos que me propongo, por enseñarme que con la disciplina y constancia, se logra lo imposible.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis mas sinceros agradecimientos al:

Ingeniero Juan Camilo Celys y al Ingeniero Claudio Alberto Moreno

Por la paciencia, persistencia y dedicación en la elaboración de la monografía.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN .....	22
1. INTRODUCCIÓN .....	23
2. OBJETIVOS .....	25
3. CAPITULO I: GENERALIDADES DE PAVIMENTOS .....	26
3.1. Pavimentos .....	26
3.2. Tipos de pavimentos .....	27
3.2.1. Pavimento rígido: .....	27
3.2.2. Pavimento flexible: .....	28
3.3. Mezclas Asfálticas .....	29
3.3.1. Clasificación de mezclas asfálticas .....	30
3.3.2. Características de la mezcla asfáltica .....	32
3.3.3. Tipos de mezclas asfálticas .....	33
3.4. Mezcla Asfáltica Recuperada.....	34
3.4.1. Tipos de reciclaje de pavimentos asfálticos .....	36
3.4.2. Características físico- mecánicas de las Mezclas Asfálticas Recuperadas – RAP.....	37
4. CAPITULO II: IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR MEZCLA ASFÁLTICA 38	
4.1. Norma y Medidas de Control en la Construcción de Carreteras en Colombia.....	39
4.2. Aspectos e Impactos Ambientales generados por mezcla asfáltica. ....	41
4.2.1. Contaminación Al Suelo .....	43
4.2.2. Contaminación Atmosférica.....	45
4.2.3. Contaminación Al Agua.....	50
4.2.4. Consumo de Energía .....	51
5. CAPITULO III: IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RESIDUOS SOLIDOS INDUSTRIALES.....	55
5.1. Residuos industriales .....	56
5.1.1. Ceniza Volante de Carbón - CFA .....	65
5.1.2. Ceramica - CW.....	67
5.1.3. Polvo de Horno de Cemento – CKD.....	67
5.1.4. Escoria de Cobre .....	68
5.1.5. Escoria de Hierro de Alto Horno – BF.....	69

5.1.6. Escoria de Acero del Horno Básico de Oxígeno – BOF .....	69
5.1.7. Barro Rojo70	
5.1.8. Polvo de Caucho.....	70
5.1.9. Polvo de Vidrio - GWP .....	71
5.1.10. Residuos de Construcción y Demolición .....	72
5.2. Alternativas de Recuperación de Mezcla Asfáltica .....	73
6. CAPITULO IV: DEFINICIÓN DE ALTERNATIVA ADECUADA PARA APLICACIÓN EN VIAS .....	76
6.1. Criterios para definición de alternativas .....	76
6.1.1. Beneficios Ambientales.....	77
6.2. Mezcla asfáltica semicaliente.....	77
6.3. Propiedades físicas de la ceniza volante de carbón.....	79
6.4. Pruebas de laboratorio para la utilización de ceniza volante en la mezcla asfáltica. ....	81
6.5. La ceniza volante de carbón en la mezcla asfáltica .....	81
6.6. Análisis de resultados del caso estudio para adición de cenizas volantes a la mezcla asfáltica.	
85	
6.6.1. Ensayo Marshall .....	85
6.6.2. Relación Estabilidad- Flujo .....	88
6.6.3. Ensayo de deformación plástica .....	89
7. CAPITULO V: RECOMENDACIONES .....	93
CONCLUSIONES.....	94
REFERENCIA BIBLIOGRÁFIA.....	96



## LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Corte transversal losa de concreto .....	28
Figura 2. Corte transversal de capas de pavimento flexible . .....	28
Figura 3. Contaminación atmosférica .....	46
Figura 4. Clasificación aproximada de los diferentes tipos de mezclas por rango de temperaturas.....	53
Figura 5. Componentes principales de una planta de asfalto.....	53
Figura 6. Partículas de ceniza volante de carbón.....	66
Figura 7. Relación de humos entre una mezcla convencional y otra semicaliente.....	78
Figura 8. Selección de fabricación de mezclas semicalientes.....	78
Figura 9. Resultado comparativo de diferentes mezclas semicalientes .....	79
Figura 10. Procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica.....	85
Figura 11. Variación a la estabilidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200.....	86
Figura 12. Variación de la densidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200.....	87
Figura 13. Variación del flujo con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200 .....	88
Figura 14. Variación de la relación estabilidad - flujo.....	89
Figura 15. Ahuellamiento con respecto al reemplazo de ceniza volante .....	90
Figura 16. Velocidad de deformación medida en cada porcentaje de reemplazo de ceniza volante.....	91

## LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Tipos de agregados pétreos.....	30
Tabla 2. Tipos de mezclas asfálticas.....	33
Tabla 3. Generación de rap y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de europa. ....	35
Tabla 4. Características físicas y mecánicas rap.....	37
Tabla 5. Índices globales de agresividad ambiental para plantas de mezclas asfálticas en caliente.....	38
Tabla 6. Impacto ambiental generado en la etapa de construcción y conservación.....	41
Tabla 7. Impacto ambiental al recurso suelo.....	44
Tabla 8. Actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial. ....	47
Tabla 9. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio.....	48
Tabla 10. Impacto ambiental al recurso aire.....	49
Tabla 11. Impacto ambiental al recurso agua.....	51
Tabla 12. Consumo de energía térmica para la fabricación de una tonelada de mezcla asfáltica en caliente.....	52
Tabla 13. Residuos industriales utilizados en mezclas asfálticas.....	57
Tabla 14. Resultados del análisis del polvo de caucho usado en la obtención de mezclas asfálticas modificadas mediante los procesos seco y húmedo.....	71
Tabla 15. Efectos de la utilización de residuos de construcción y demolición en mezcla asfáltica recuperadas- rap.....	74
Tabla 16. Propiedades físicas de la ceniza volante de carbón.....	80
Tabla 17. Pruebas de laboratorio a cenizas volantes de carbón.....	81
Tabla 18. Resultados de la caracterización de los materiales pétreos.....	82
Tabla 19. Resultados de la caracterización del asfalto.....	82
Tabla 20. Caracterización química de la ceniza volante.....	83
Tabla 21. Diseño del ensayo marshall.....	84

## GLOSARIO

**Agregado:** Material granular duro, de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.(Segura, 2016)

**Agregado fino:** Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (# 4).(Segura, 2016)

**Agregado grueso:** Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (# 4).(Segura, 2016)

**Agregados reciclados:** Son agregados de material proveniente del fresado o trituración de capas asfálticas elaboradas en caliente. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Agentes rejuvenecedores:** Son agentes encargados de restaurar las características del asfalto original en la estructura coloidal intrínseca. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Ahuellamiento:** Surcos que se desarrollan en el pavimento, en los carriles de las ruedas. Pueden ser resultado de una consolidación por movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico o, pueden ser generados por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Ocurren como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tráfico. (Segura, 2016)

**Asfalto:** Es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, se usa como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen. (Segura, 2016)

**Compactación:** Acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño. Generalmente la compactación se logra usando los rodillos o compactadores neumáticos. (Segura, 2016)

**Carbón de Antracita:** Mineral metamórfico de características rígidas obtenido de extracción de minas. Es utilizado para la producción de energía y fundición de materiales. Presenta hasta un 95% de contenido de carbón. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Carbón Bituminoso:** Carbón denso que puede convertirse en coque, un combustible elaborado mediante la destilación de carbones más blandos; se usa para calentar los altos hornos de las

centrales metalúrgicas. Posee alta densidad y alto contenido de volátiles al 70% de carbono fijo. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Carbón Lignito:** Estructura orgánica utilizada como combustible, cuya procedencia se origina por medio de la transformación de orgánicos vegetales y fósiles. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Carbón Sub bituminoso lignito:** Carbón blando de baja categoría con alto contenido de humedad y similitud a las propiedades del carbón bituminoso y el lignito, es decir, una transición entre los dos tipos de carbón. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Deformación:** Cualquier cambio que presente un pavimento respecto a su forma original. (Segura, 2016)

**Densidad:** Grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada. Está limitada por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la mezcla. (Segura, 2016)

**Desintegración:** Separación progresiva de las partículas del agregado en el pavimento desde la superficie hacia abajo, o desde los bordes hacia el interior. Puede ser causada por falta de compactación, construcción de una capa de rodadura muy delgada en períodos fríos, agregado sucio o desintegrable, muy poco asfalto en la mezcla o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica. (Segura, 2016)

**Estabilidad:** Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad está en función de la cohesión y la fricción interna del material. (Segura, 2016)

**Flexibilidad:** Capacidad del pavimento asfáltico de ajustarse a los asentamientos en la fundación. (Segura, 2016)

**Fillers:** Son sustancias de alta insolubilidad divididas en el material asfáltico, las cuales se pueden dispersar en él, como una forma de modificación de la consistencia del asfalto y sus propiedades mecánicas. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Grietas:** Fracturas en la superficie del pavimento asfáltico. (Segura, 2016)

**Impermeabilidad:** Capacidad de un pavimento asfáltico de resistir el paso de aire y agua dentro o a través del mismo. (Segura, 2016)

**Ligante:** Los ligantes son aquellos productos bituminosos de alta viscosidad los cuales proporcionan elasticidad al pavimento debido a que poseen propiedades aglomerantes. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Llenante mineral:** Partículas sólidas de procedencia mineral, menores de 75  $\mu\text{m}$ , cuya dimensión mayor no supera el doble de la menor en la incorporación de la mezcla de agregados para completar su granulometría y mejorar su comportamiento. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Masillas bituminosas:** Es una mezcla de asfalto y material mineral fino en proporciones para verterse caliente en su lugar y luego, ser compactado a mano sobre una superficie lisa para pisos, techos y pavimentos. (Cogollos, A. Martinez, 2020)

**Mezcla asfáltica:** Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como capa terminada para un determinado uso. (Segura, 2016)

## **ABREVIATURA**

**OBC:** Oil Binding Capacity

**SMA:** Stone Mastic Asphalt

**OPC:** Cemento Pórtland Ordinario.

**HMA:** Asfalto de mezcla en caliente

**RCA:** Agregado de concreto reciclado

**VMA:** Hueco en agregado mineral

**AV:** Huecos de aire

**RAP:** Pavimento de asfalto recuperado

**WMA:** Mezcla asfáltica semicaliente

**UCS:** Resistencia a la compresión no confinada

**ITS:** Resistencia a la tracción indirecta

**ITSM:** Módulo de rigidez a la tensión indirecta.

**MP:** Material Particulado

**CW:** Residuo de cerámica

**CFA:** Ceniza Volante de Carbón

**ERC:** Emulsión Modificada con polímeros

**GWP:** Polvo de Vidrio

**BOF:** Escoria de Acero Básico de Oxígeno

**BF:** Escoria de Hierro de alto Horno

## RESUMEN

La presente monografía, consistió en definir una alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos industriales en las mezclas asfálticas a partir de una revisión bibliográfica nacional e internacional, donde se determinó los impactos ambientales generados en su producción, y la contaminación que generan al suelo, a la atmósfera, al agua y el alto consumo de energía que presentan, en especial la mezcla convencional o mezcla asfáltica en caliente. Los impactos ambientales fueron analizados en cada uno de los procesos o actividades que intervienen en la producción de la mezcla asfáltica, donde también se tuvo en cuenta el alistado y mantenimiento de la mezcla como parte importante de la generación de residuos a la que llega a hacer parte. Se mencionan los residuos sólidos industriales más óptimos para adicionar a la mezcla como; las cenizas volantes de carbón, cerámica, polvo de horno de cemento, escoria de cobre, escoria de hierro, escoria de acero, barro rojo, polvo de caucho, polvo de vidrio y residuos de construcción, donde sus propiedades físicas y mecánicas deben cumplir con los requisitos normativos brindados por Invías, y ajustarse a las propiedades naturales de las mezclas asfálticas. Se concluyó que las cenizas volantes de carbón actúan como un llenante mineral en proporciones del 20% y 25% que aumenta la resistencia a la deformación, a la humedad y es favorable para la estabilidad y flujo en el mezclado semicaliente.

**Palabras Claves:** Pavimentos asfálticos reciclados, mezcla asfáltica, residuos industriales.

## 1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de los residuos sólidos industriales en la mezcla asfáltica, permite que el reciclaje sea funcional y se convierta en una alternativa de solución a los impactos ambientales que se generan, debido al alto nivel de vida de consumo, y por tanto al desmesurado nivel de residuos que generamos cuyo destino final son los rellenos sanitarios y cuya descomposición solo trae contaminación en la misma proporción de las que son fuente.

El reciclaje de los pavimentos no solo permiten lograr un ahorro de materiales, si no que optimiza el uso de los recursos naturales, por lo que lo convierte en una tecnología amigable con el medio ambiente. Además al utilizarlos admite que la mezcla mejore y potencialice propiedades físicas y mecánicas, que permiten que tengan mayor durabilidad en la vía.

En el reciclaje de pavimentos existen dos grupos, el reciclaje en caliente y el reciclaje en frío. En el primer reciclaje, hay alto consumo energético ya que la mezcla debe estar a una temperatura igual o mayor a 150°C (Alonso, A. Moll, R. Tejada, 2018), pero tiene limitación de beneficios ambientales, en el segundo hay ahorro energético, pero su utilización en vía es sobrevaluada y requiere mantenimientos constantes ya que su resistencia a la humedad es baja. A raíz de estos dos grupos, surgen otras alternativas para reducir el impacto ambiental y el consumo de combustibles, las cuales son las mezclas asfálticas semicalientes y las mezclas asfálticas templadas, donde las semicalientes, con sus siglas en inglés WMA, logran una temperatura de 100°C-120°C Alonso, A. Moll, R. Tejada, (2018), con resultados prometedores para las vías de alto volumen de tráfico vehicular, es decir, en vías primarias y secundarias, este tipo de mezcla tiene ventajas como: mejor laborabilidad de la mezcla, menor envejecimiento del betún; disminuye la emisión de humos contaminantes y tiene bajo consumo de energía en las plantas de producción.

Para que este tipo de mezcla funcione, es decir la mezcla asfáltica semicaliente con agregado reciclado de pavimento flexible, es necesario que tenga aditivos que permitan la reducción de temperatura y potencialice sus propiedades. Al identificar los residuos más utilizados en la producción de mezcla asfáltica tenemos que son; las cenizas volantes de carbón, cerámica, polvo de horno de cemento, escoria de cobre, escoria de hierro, escoria de acero, barro rojo, polvo de caucho, polvo de vidrio y algunos residuos de construcción. La mayoría de los



residuos fueron descartados, debido a que no cumplía con las propiedades mas relevantes de las mezclas asfálticas las cuales son; estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la fractura por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad.

Las cenizas volantes de carbón, lograron cumplir un papel importante en la mezcla como llenante mineral, ya que aumentó la resistencia mecánica y dinámica de la mezcla, además se convierte en una alternativa económica para el mantenimiento y rehabilitación de las vías, y de esta forma se evita desperdicio industrial y se emplean en otros procesos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

Elaborar una propuesta de aprovechamiento de residuos generados en el sector industrial en la mezcla asfáltica a partir de la remoción y/o demolición de esta y utilizarla en construcción de vías.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Reconocer los impactos ambientales generados por disposición actual de residuos de asfalto.
- Identificar las alternativas de recuperación de la mezcla asfáltica con residuos sólidos ordinarios industriales en pavimentación de vías.
- Definir la alternativa más adecuada que permita su aplicación en las vías.

### **3. CAPITULO I: GENERALIDADES DE PAVIMENTOS**

El pavimento lo constituyen una serie de capas que toman las cargas del tránsito y las distribuye en las capas inferiores, permitiendo que la superficie de rodadura funcione eficientemente. Dentro de las modalidades de pavimentos se encuentran los pavimentos flexibles y el rígido, cada uno con características propias que permiten que cumplan con el propósito de calidad para comodidad y seguridad de quienes se transportan en ella, es por ello que primero es importante conocerlas.

#### **3.1. Pavimentos**

Un pavimento es la capa o conjunto de capas comprendidas entre la subrasante y la superficie de rodadura de una obra vial, y cuya finalidad es proporcionar una superficie de rodadura uniforme, resistente al tránsito, al intemperismo producido por los agentes naturales, y a cualquier otro agente perjudicial. (Rivera, 2007)

Los pavimentos brindan al conductor quien se desplaza por una estructura uniforme, seguridad y comodidad que permite establecer comunicación, además sus diferentes materiales proporcionan una visión clara de la importancia de la naturaleza para llevar a cabo grandes proyectos, siendo uno de ellos el vial.

La función del pavimento, es la de transmitir de manera adecuada los esfuerzos a toda la estructura del pavimento, garantizando un cuerpo estable y permanente bajo la acción de cargas. Existen básicamente dos tipos de pavimentos: flexibles y rígidos. (Rivera, 2007)

De acuerdo a la gran variedad de pavimentos se puede visualizar su uso y versatilidad en una calzada, es decir, si será acorde a ella, sabiendo que de acuerdo a los materiales se podrá determinar si su resistencia es la adecuada para el tipo de carga a la que estará expuesta. Ahora bien, la finalidad de este trabajo es recopilar aquellos residuos industriales que puedan reemplazar a los aditivos que generan impacto negativo al medio ambiente, debido a que son sustraídos y/o explotados de la naturaleza.

“Las denominadas mezclas asfálticas y el hormigón son los materiales más habituales para crear el pavimento urbano, ya que tienen un buen rendimiento de soporte y permiten el paso constante de vehículos sin sufrir grandes daños”.(Leone, D., Giordani, 2010)

Su uso es cada vez mayor debido a la alta demanda y urbanización que se está presentando, por lo que se convierte en algo ya necesario y común verlo como uno de los puntos pendientes en alcaldías. Además, si estos pavimentos son sostenibles y respetan el medio ambiente se convierten en un producto con rendimiento que suma y no que resta.

### **3.2. Tipos de pavimentos**

Existen dos tipos de pavimentos, y estos van de acuerdo con su creación, es decir que van en función del flujo y tipo de vehículos:

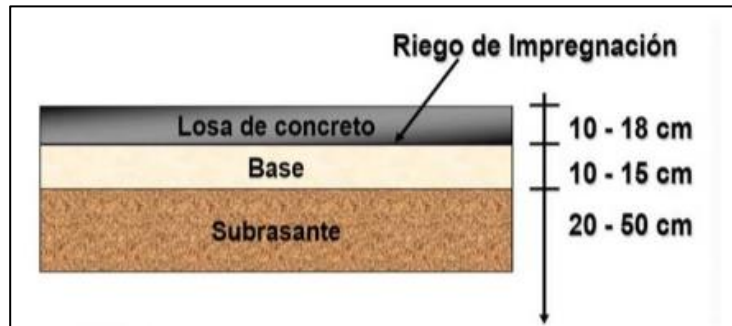
#### ***3.2.1. Pavimento rígido:***

Son pavimentos construidos con hormigón de cemento portland y materiales granulares. Leone, D., Giordani, (2010), mencionan que los pavimentos rígidos se integran por una capa (losa) de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. La resistencia estructural depende principalmente de la losa de concreto. (p.4). como se expone en la figura 1.

Como lo mencionan en Argos, (2013), Se compone de losas de concreto hidráulico que en algunas ocasiones presenta un armado de acero, tiene un costo inicial más elevado que el flexible, su periodo de vida varía entre 20 y 40 años; el mantenimiento que requiere es mínimo y solo se efectúa (comúnmente) en las juntas de las losas. (p.1).

**Figura 1.**

***Corte transversal losa de concreto***



**Nota:** La figura representa las diferentes capas que deben estar antes de la losa de concreto. Tomado de pavimentos Leone, D., Giordani, (2010).

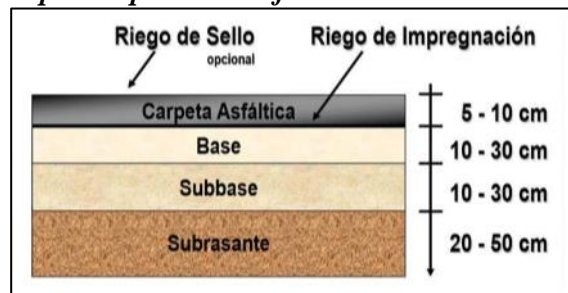
**3.2.2. Pavimento flexible:**

De acuerdo con Leone, D., Giordani, (2010), define los pavimentos flexibles como aquellos construidos con materiales asfálticos y materiales granulares. En general, están constituidos por una capa delgada de mezcla asfáltica construida sobre una capa de base y una capa de sub-base las que usualmente son de material granular. Estas capas descansan en una capa de suelo compactado, llamada subrasante. (p.3). Como se expone en la figura 2.

Según Argos, (2013), Resulta más económico en su construcción inicial, y tiene un periodo de vida de entre 10 y 15 años, pero tienen la desventaja de requerir mantenimiento constante para cumplir con su vida útil. Este tipo de pavimento está compuesto principalmente de una carpeta asfáltica, de la base y de la sub-base. (p.1).

**Figura 2.**

***Corte transversal de capas de pavimento flexible***



**Nota:** La figura representa las diferentes capas de rodadura de un pavimento flexible. Tomado de pavimentos Leone, D., Giordani, (2010).

### **3.3. Mezclas Asfálticas**

“Las mezclas asfálticas son una combinación de agregados minerales (grava y arena), aglomerados mediante un ligante asfáltico (asfáltenos), que son usadas en la elaboración de pavimentos dentro de ciudades urbanas, las cuales deben cumplir con características particulares que garanticen su durabilidad y manejabilidad” (Hernández, L. Jiménez, K. Domínguez, V. & Adams, 2017, p.24)

Las características particulares de las mezclas asfálticas permiten desarrollar distintos tipos de proyectos viales que van de acuerdo con el flujo vehicular, además tienen el nombre de aglomerados que se obtiene mediante la combinación de agregados pétreos y material ligante y por lo general su fabricación se lleva a cabo en plantas fijas o móviles.

Los términos a los cuales también hacen referencia a las mezclas asfálticas son; agregado asfáltico, hormigón asfáltico, cemento asfáltico bituminoso, siendo estos los mas utilizados en la ingeniería y documentos que refieren a la construcción de carreteras.

Algunos de los criterios que solicitan que tenga la mezcla asfáltica para ser utilizada en vías es:

- Que logren resistir las cargas del tránsito.
- Que sea impermeable, ya que la filtración del agua podría desestabilizarlo.
- Que sea fácil de aplicar en vía.

Para lograr que las mezclas asfálticas cumplan con especificaciones técnicas, se referencia diferentes tipos de agregados pétreos, como evidencia la tabla 1.

**Tabla 1.**

***Tipos de Agregados Pétreos***

<b>Tipo de agregados</b>	<b>Descripción</b>
<b>Agregados Naturales</b>	Útiles luego de que sufren una modificación en su tamaño.
<b>Agregados de Trituración</b>	Se obtienen de la trituración de rocas de canteras o granulometrías que se rechazaron de los agregados naturales.
<b>Agregados artificiales</b>	Residuos de procesos industriales, como residuos o materiales de demoliciones utilizables y reciclables.
<b>Agregados Marginales</b>	Son los materiales que no cumplen especificaciones

**Nota:** Tipos de agregados pétreos utilizados en mezclas asfálticas. Elaboración propia con base en datos del análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas Padilla, (2004a)

“Las propiedades más relevantes en una mezcla asfáltica son: la estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la fractura por bajas temperaturas, resistencia al daño por humedad, resistencia al deslizamiento y trabajabilidad”. (ESR, 2016).

### ***3.3.1. Clasificación de mezclas asfálticas***

En las mezclas asfálticas existen muchos parámetros que determinan las diferentes mezclas, haciendo que su clasificación sea diversa. Padilla, (2004b) lo expone de la siguiente manera:

- a. Por agregado pétreo empleado.
  - Masilla asfáltica: polvo mineral más ligante.
  - Mortero asfáltico: Agregado fino más masilla.
  - Concreto asfáltico: Agregado pétreo más mortero.

- Macadam asfáltico: Agregado grueso más ligante asfáltico.
- b. Por temperatura de puesta en obra.
- Mezclas asfálticas en caliente: Exposición de asfalto y agregados a temperaturas elevadas que van de 150°C a 180°C.
  - Mezclas asfálticas en frío: Fabricación con emulsión asfáltica a temperatura ambiente.
- c. Por la proporción de vacíos en la mezcla asfáltica
- Mezclas cerradas o Densas: Vacíos > 6%
  - Mezclas semicerradas o semi densas: Vacíos entre el 6% y el 10%
  - Mezclas abiertas: Vacíos < 12%
  - Mezclas porosas o drenantes: Vacíos superiores a 20%

Lo anterior significa que la proporción de los vacíos permite que haya paso del agua y vapor a través de la mezcla, ya que al no contener la cantidad exacta de vacíos podría presentarse deformaciones en ella.

- d. Por el tamaño del agregado pétreo.
- Mezclas gruesas: cuando el agregado es mayor a 10mm
  - Mezclas finas: o micro aglomerados o mortero asfáltico. Agregado con el mínimo de espesor al extender la mezcla.
- e. Por la estructura del agregado pétreo
- Mezclas con esqueleto mineral: Resistencia dada a los agregados.
  - Mezclas sin esqueleto mineral: Resistencia dada por la cohesión de la masilla.



- f. Por la granulometría
  - Mezclas continuas: Cantidad bien distribuida de agregados pétreos en el huso granulométrico
  - Mezclas discontinuas: Cantidad muy limitada de distribución de agregados pétreos en el huso granulométrico. (p.45-46)

### 3.3.2. *Características de la mezcla asfáltica*

Las siguientes son características más notables en una mezcla asfáltica, dadas en el estudio realizado por Segura, (2016, p.44):

- Estabilidad: Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señas que indican cambios en la mezcla.
- Durabilidad: Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- Impermeabilidad: Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- Flexibilidad. Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- Resistencia a la fatiga. Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- Resistencia al deslizamiento. Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada. (p. 45)

### 3.3.3. Tipos de mezclas asfálticas

A continuación, se expone los diferentes tipos de mezclas conocidas, ya que normalmente se hace referencia a dos tipos de ellas, como las mezclas asfálticas en caliente y las mezclas asfálticas en frío, su elaboración esta dada por precisiones en las proporciones del ligamentos asfálticos y polvos minerales, además su elaboración se efectúa en plantas que pueden ser fijas o móviles, como lo indica la tabla 2.

**Tabla 2.**  
**Tipos de Mezclas Asfálticas**

Mezcla asfáltica	Elaboración	Uso
Mezcla asfáltica en caliente	Su elaboración es la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y aditivos. Implica el calentamiento del ligante(asfalto) y los agregados a una temperatura superior al ambiente. En ocasiones se fabrica con asfalto modificado	Empleado en construcción de carreteras, como vías urbanas y aeropuertos.  Utilizada también en capas de <u>rodadura</u> y capas inferiores de <u>los firmes.</u>
Mezcla asfáltica en frío	Fabricada con emulsiones asfálticas. Para su conservación recomiendan el sellado con emulsión asfáltica ( <u>lechadas asfálticas</u> ). Emplean emulsiones con asfalto fluidificado (destilado de petróleo ligero y volátil). El endurecimiento es relativamente rápido en las capas ya extendidas debido a la evaporación del fluidificante	Empleada en la construcción y carreteras secundarias
Mezcla porosa o drenante	Fabricada con asfaltos modificados, con proporción del 4.5% y 5% de agregados pétreos y asfaltos normales.	Empleada en capas de rodadura (carpeta asfáltica) Utilizada en vías de circulación rápida. Aplicado a vías secundarias, vías urbanas.

		Aplicado a capas de base bajo los pavimentos de hormigón
Micro aglomerados	Tamaño de agregado pétreo limitado a 10 mm, lo que permite la aplicación de capas de pequeño espesor. Se puede presentar micro aglomerados rugosos con agregado pétreos de gran calidad y asfalto modificado.	Utilizada en zonas urbanas Utilizada para vías de alta velocidad de circulación.
Masillas	Contiene altas proporciones de polvo mineral y ligante, con agregado pétreo grueso disperso en la masilla. Tiene resistencia por la viscosidad de la masilla. Se necesita una alta proporción de asfalto debido a la superficie de la materia. Emplea <u>asfaltos duros</u> .	Utilizados en tableros de puentes, vías urbanas y aceras, principalmente en países fríos y húmedos.
Mezclas de alto módulo	Su elaboración es en caliente con asfaltos muy duros, asfaltos modificados y polvo mineral elevado (8%-10%). Mezclas elásticas y con elevada resistencia a la fatiga (absorción de tensión), no presenta agrietamientos en la base de grava cemento.	Utilizados en capas para la rehabilitación, con tránsito pesado mediano-alto.

**Nota:** La anterior tabla contiene datos relevantes de las diferentes mezclas identificadas de acuerdo a su elaboración y uso. Elaboración propia con base en datos del análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas Padilla, (2004b)

### 3.4. Mezcla Asfáltica Recuperada

La mezcla asfáltica recuperada, mezcla reciclada, fresado de pavimento asfáltico envejecido o RAP, que son las siglas en inglés de Reclaimed Asphalt Pavement, son las que se generan luego del mantenimiento de las vías e infraestructuras, estos materiales la mayoría de las veces van a terminar en rellenos ilegales, estos desechos son los considerados desechos de construcción y demolición.

Tal como lo explica Restrepo, H. Stephens, (2015), el reciclaje de pavimentos, es la reutilización de materiales que forman parte de alguna de las capas estructurales de pavimentos

existentes y que han cumplido su finalidad inicial, mediante la transformación de un pavimento degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que debe soportar. (p.23).

Restrepo, H. Stephens, (2015) menciona que teniendo en cuenta que durante los últimos años más gobiernos adoptan el reciclaje de pavimentos dentro de sus políticas de estado, tendiendo a disminuir la utilización de materiales nuevos o vírgenes, esta técnica se afianza y avanza en pro de preservar las condiciones ambientales. Sin dejar de lado que los avances tecnológicos en esta materia ayudan a masificar la utilización del recurso. (p.29).

“Este tipo de reciclaje logra reutilizaciones del RAP hasta de un 40% en la elaboración de mezclas nuevas, sin embargo, esto dependerá del tipo de carretera en el que se vaya a utilizar la mezcla resultante” (Restrepo, H. Stephens, 2015, p.35).

A continuación en la tabla 3 se resume el reciclaje de las mezclas en países de Europa.

**Tabla 3.**  
*Generación de RAP y utilización en la fabricación de mezclas recicladas de diferentes países de Europa.*

PAIS	(t) MATERIAL ASFALTICO RECICLABLE DISPONIBLE	(%) REALMENTE USADO EN RECICLAJE EN CALIENTE	(%) REALMENTE USADO EN RECICLAJE EN FRIO	(%) DE LA PRODUCCIÓN DE LAS MEZCLAS NUEVAS EN CALIENTE QUE CONTENGAN MATERIAL RECICLADO
Alemania	14.000.000	82	18	60
Austria	600.000	10	10	5
Bélgica	13.000.000	50	0	36
Irlanda	48.000	38	0	2,1
Dinamarca	240.000	>80	0	53
Eslovenia	22.000	50	10	15
Eslovaquia	1.250	0	0	0
Francia	6.500.000	13	<2	<10
Holanda	3.400.000	80	20	65
Hungría	--	15	0	0,6
Italia	14.000.000	18	2	0
Noruega	590.000	7	26	8

<b>Polonia</b>	1.000.000	4	55	0,2
<b>Reino Unido</b>	5.000.000	0	0	0
<b>Republica Checa</b>	604.400	30	50	10
<b>España</b>	690.000	30	15	5
<b>Suecia</b>	650.000	50	50	0
<b>Suiza</b>	945.000	50	50	0

**Nota:** se evidencia la masificación de la técnica del reciclaje en caliente en Europa durante el año del 2006. Tomado de Reciclaje de pavimentos. Restrepo, H. Stephens, (2015)

#### **3.4.1. Tipos de reciclaje de pavimentos asfálticos**

- **Mezclas en frío in-situ con cemento:** Procedimiento que se fundamenta en el fresado en frío de un cierto grosor del pavimento envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico como el cemento utilizado normalmente. El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos. (Méndez, 2015, p.4)
- **Mezclas en caliente in-situ:** “las más tradicionales, que consisten en la mezcla de cemento asfáltico modificado o no con agregados y si es el caso también mejoradores. Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de residuos sólidos” (Castro, 2018, p.26).
- **Mezclado en planta central:** “son mezclas que se realizan en una planta de mezclado, la cual tiene unas especificaciones de proporciones diseñadas para ser creadas en cantidades industriales, con todos los procesos de control de calidad para la comercialización en masa” (Castro, 2018, p.27).

“El reciclaje de pavimentos, permite lograr el ahorro de materiales, transporte, reducción de almacenamiento de materiales en botaderos y la optimización del uso de los recursos naturales” (Botasso, H. Cuattrocchio, A. Rebollo, O. Soengas, 2008), considerandose el RAP como una tecnología amigable al medio ambiente.

### 3.4.2. Características físico- mecánicas de las Mezclas Asfálticas Recuperadas – RAP

Las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas van de acuerdo a la humedad, asfalto y agregado utilizado en su producción, como lo indica la tabla 4.

**Tabla 4.**  
*Características físicas y mecánicas RAP*

<b>Tipo de Propiedades</b>	<b>Características</b>	<b>Rango de valores</b>
<b>FÍSICAS</b>	Peso unitario	1940-2300 Kg/m <sup>3</sup> (120-140 Lb/ft <sup>3</sup> )
	Contenido de humedad	Normal por encima de 5%
	Contenido de asfalto	Máximo: 7% - 8% Normal: 4.5% - 6% Rango Máximo: 3% - 7%
	<b>MECÁNICAS</b>	
	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/m <sup>3</sup> (100- 125 Lb/ft <sup>3</sup> )
	CBR	100% RAP: 20 – 25%

**Nota:** Las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas recicladas dependen del contenido de humedad, contenido de asfalto y del tipo de agregado. CBR: California Bearing Ratio, es un ensayo alternativo de resistencia. Tomado de Análisis de los métodos de reciclaje en caliente y frío aplicados a concreto asfáltico, para la utilización en carpeta de rodadura en vías terciarias entre los años 2011-2017 en Colombia. Castro, (2017, p.5)

#### 4. CAPITULO II: IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR MEZCLA ASFÁLTICA

Las mezclas asfálticas generan impactos negativos al medio ambiente, desde su proceso de explotación de materia prima, como son los agregados ya que erosionan el suelo, contribuyendo a la deforestación, hasta la producción de mezcla asfáltica en donde se genera impactos por el alto consumo de energía y la contaminación atmosférica. En el mantenimiento de las vías se genera despojos llamados residuos de demolición y construcción, donde la mayoría de estos van a rellenos sanitarios legales e ilegales, pero que, de igual forma, la mayoría de estos son aprovechados de nuevo en el proceso de producción de mezcla asfáltica.

Incluir residuos sólidos en las mezclas asfálticas ayuda a limitar el volumen de desechos producidos en otras fuentes, además de que disminuye el nivel de explotación de materiales extraídos de forma natural, aportando a la reducción de la huella de carbono.

En la tabla 5 se evidencia los índices globales de agresividad que tienen las plantas dedicadas a la producción de mezclas asfálticas.

**Tabla 5.**  
*Indices globales de agresividad ambiental para plantas de mezclas asfálticas en caliente*

INDICE GLOBAL	VALOR
Consumo de energía térmica	926.546,40GJ
Consumo de aire	316.160,00 ton
Consumo de energía fósil	1.325.342,00 GJ
Consumo de materias primas minerales	4.426.240,00 ton
NOx	201,55 ton
Sox	1.474,00 ton
CO2	77.459,20 ton
Material particulado	23.810,80 ton
Compuestos orgánicos volátiles	64,49 ton
Emisiones potencialmente tóxicas	90,89 ton

**Nota:** Datos de producción que se obtuvo en la industria de mezcla asfáltica en caliente en 1995. GJ: Gigajulio. Tomado del perfil tecnológico ambiental de la industria de mezcla asfáltica en Colombia. Catillo, E. Acevedo, L. Orduz, (2000, p.26).

Al dividir el proceso de la mezcla asfáltica en etapas, se brinda una panorámica de los impactos al medio ambiente, por lo que en instituciones nacionales como el Instituto Nacional de Vías- INVIAS, mediante las normas y especificaciones INVIAS (2013), brinda los requisitos de calidad y procedimientos para la ejecución y control de los trabajos en la red nacional de carreteras, profundizando en cada una de las actividades que intervienen en la obra, construcción, pavimentación, protección ambiental y transporte para mejoramiento vial.

#### **4.1. Norma y Medidas de Control en la Construcción de Carreteras en Colombia**

En Colombia le corresponde al Ministerio de Transporte fijar las normas técnicas para cada modo de transporte y van de acuerdo a la estrategia o misionalidad de la entidad a la que le corresponde llevarlas a cabo. Por lo anterior el Ministerio de Transporte designa al Instituto Nacional de Vías- INVIAS, para adelantar los estudios necesarios y promover la modernización de la infraestructura vial, mediante la ejecución de planes, programas, etc, así como proponer la adopción de manuales, normas y especificaciones para la construcción, conservación y seguridad de la red de carretera nacional.

Con base a lo anterior, se toma la siguiente información de la norma técnica, las especificaciones generales de construcción de carreteras, del capítulo 4 Pavimentos asfálticos, artículo 400.4.7.2 y 400.4.7.3. (Invías, 2013);

##### **Artículo 400.4.7.2.** Explotación y procesamiento de agregados pétreos

- No se permitirá la explotación de fuentes de materiales en áreas de preservación ambiental.
- Se preferirá la extracción de fuentes explotadas para el abastecimiento de obras anteriores, siempre que la calidad de sus materiales sea adecuada.
- Se deberá planear adecuadamente la explotación de la fuente, de manera de minimizar los impactos resultantes del proceso y facilitar la recuperación ambiental al término de la explotación.
- Si los agregados se obtienen de fuentes comerciales, el interventor solo aceptará su uso después de que el constructor le haga entrega de una copia auténtica de la respectiva licencia ambiental de operación.



- Antes de iniciar la explotación de las fuentes, el constructor presentara al interventor, para su evaluación y eventual aprobación, un plan de explotación.
- No esta permitida la quema como forma de desmonte del área por explotar.
- Se deberá retirar cuidadosamente la capa vegetal de las zonas de explotación y mantenerla en buenas condiciones, para recuperarlas al término de la explotación.
- Se deberá limitar al mínimo el desmonte, la limpieza y el descapote durante la construcción de las instalaciones de trituración y clasificación y la planta asfáltica.
- Si se deben interceptar drenajes naturales, ellos deberán ser adecuadamente canalizados.
- La planta de trituración deberá estar provista de los filtros necesarios para prevenir la contaminación ambiental, de acuerdo con la reglamentación vigente.
- Siempre que se requiera lavado durante el proceso de producción de agregados, los residuos que genera esta operación deberán ser conducidos a piscinas de sedimentación.
- Tanto en las plantas de trituración como en las asfálticas, se deberá realizar un seguimiento permanente al componente atmosférico durante su operación
- El manejo de explosivos deberá ser realizados por un experto.
- Los niveles de ruido y polvo causados por los procesos de explotación y procesamiento de los agregados deberán ser mantenidos dentro de los limites admitidos por las disposiciones oficiales vigentes.
- Al desocupar las áreas de explotación y procesamiento, el constructor deberá retirar todos los vestigios de ocupación del lugar, tales como estructuras, pisos, caminos internos, estacionamientos, escombros, etc. Así mismo, deberá des compactar los suelos y restaurar la vegetación y el paisaje.

### **Artículo 400.4.7.3. Plantas de mezcla en general**

- Las plantas productoras de mezcla asfáltica deberán cumplir con lo establecido en el reglamento vigente sobre protección y control de calidad del aire y para su funcionamiento en la obra se deberá presentar al Instituto Nacional de Vías la correspondiente autorización, expedida por la entidad nacional o regional encargada de otorgarles tales permisos.
- Las deberán contar con un sistema apropiado de control de contaminación de aire, conforme con los patrones establecidos en la legislación vigente.
- Los sitios de acopio de los agregados fríos deberán disponer de cobertura y de protecciones laterales para evitar la generación de emisiones fugitivas durante las operaciones de carga y descarga. (p.27-28)

#### **4.2. Aspectos e Impactos Ambientales generados por mezcla asfáltica.**

La afectación que genera la elaboración, mezclado y conservación del pavimento flexible, contribuye a que la huella de carbono siga incrementando, debido a la emisión de gases de efecto invernadero que se producen en su elaboración y de forma progresiva en su extendido, mantenimiento y conservación.

Además, la contaminación que genera y es reflejada en la disminución de la calidad del aire, también radica su alto consumo de agua y energía para lograr un producto final que se ajuste a las especificaciones y criterios de la carga del tránsito que estará en circulación, como lo evidencia la tabla 6.

**Tabla 6.**  
***Impacto Ambiental Generado en la Etapa de Construcción y Conservación***

<b>ETAPA</b>	<b>ACTIVIDAD</b>	<b>ASPECTOS</b>	<b>IMPACTO</b>
CONSTRUCCIÓN	Aprovechamiento de bancos de material	Emisión de partículas al aire	Disminución de la calidad del aire
		Emisión de ruido por uso de maquinaria y equipos.	Incremento del ruido laboral y ambiental

		Consumo de materiales de construcción.	Disminución en la calidad del suelo e incremento en la erodabilidad.
		Consumo de agua	Modificación de la calidad del agua de los acuíferos.
		Emisiones atmosféricas.	Afectaciones a la salud.
		Despojo del terreno	Modificación del microclima
			Modificación de la topografía.
			Modificación del patrón de drenaje superficial.
		Consumo de agua	Deterioro de la calidad del agua superficial
		Despojo del terreno	Eliminación de la cubierta vegetal.
	Operación de la planta de asfalto	Emisión de gases y material particulado	Disminución de la calidad del aire.
	Mezclado	Emisión de gases y material particulado	Disminución de la calidad del aire.
			Afectaciones a la salud.
	Tendido del concreto asfáltico	Consumo de agua	Elevación de la temperatura local.
			Modificación del patrón de drenaje del agua superficial.
			Disminución en la recarga de acuíferos.
		Despejo de terreno	Disminución de las poblaciones faunísticas en la zona (abundancia).
		Generación de residuos	Contaminación de suelo.
	Crecimiento de la mancha urbana.		
			Dotación de Infraestructura y servicios.
	Manejo y almacenamiento de combustibles para maquinaria y equipos	Compactación del suelo	Contaminación de suelo.

CONSERVACIÓN	Durante todas las actividades de conservación como son renivelación, riego de sello, sobre carpetas, bacheo y reciclado.	Emisión de gases y material particulado.	Deterioro de la calidad del aire.
		Emisión de ruido	Aumento de los niveles de ruido.
			Alteración de las actividades de la comunidad.
		Emisión de gases y material particulado.	Daños a la salud.

**Nota:** identificación de impactos generados en las etapas de construcción y conservación de la mezcla asfáltica. Elaboración propia con base en datos de impacto ambiental de proyectos carreteros. Hernandez et al., (2001, p.10)

#### **4.2.1. Contaminación Al Suelo**

El deterioro y la contaminación del suelo en cada una de las etapas es notable, debido a al trabajo que tiene cada una de ellas, ya que implica remoción de material vegetal para extraer los materiales utilizados en la construcción de las superficies de rodamiento, y al establecer las formas de recuperación de estas zonas de extracción de material, es considerado un impacto adverso, ya que se alteró las propiedades fisicoquímicas del terreno.

La extracción de materiales para llevar a cabo la producción de mezcla asfáltica, afecta al suelo, lo degrada, ya que una de sus consecuencias es biológica y viene representada en la disminución de la materia orgánica, por tanto, no hay retención de agua o impermeabilidad y se presenta alteraciones químicas como la capacidad de absorber nutrientes. Ahora bien, Duque, A. Forero, (2017), exponen que los metales pesados como son Cu, Ni, Zn y B, son tóxicos y que por lo general el suelo los adquiere al ser extendida la mezcla, estos debilitan la recuperación y capacidad de regenerar la capa vegetal.

Según Hernandez et al., (2001) “La recuperación de las primeras etapas de la sucesión ecológica de la vegetación del sitio donde se está llevando a cabo la explotación llevara varios cientos de años, (p.96), ya que al aprovechar los bancos de material y al retirar la cubierta vegetal acumulándolo en montículos, hace que disminuya la fertilidad, pues se encuentran expuestos al lavado de lluvia y el viento que la erosionan, produciéndose el cambio de uso de suelo.

Con respecto al aumento de la temperatura, el asfalto absorbe más calor que el suelo, por lo que lo termina liberando en las tardes y noches, aumentando la temperatura local y la permanencia de este por más tiempo durante el día, y debido a ello se puede presentar dos tipos de alteraciones climáticas al ser tendida la mezcla, como lo ilustra Hernandez et al.(2001), en donde mencionan el cambio del microclima del sitio debido a la refractancia del asfalto sobre el suelo, de igual forma se presenta las alteraciones meso climáticas, cuando se crea cubierta vegetal homogéneo generando un desequilibrio en el ecosistema, al tener estos dos tipos de alteraciones se podría presentar cambios en el régimen de lluvia local, lo que traduce a presentaciones de eventos tales como las inundaciones o sequías.

**Tabla 7.**  
***Impacto Ambiental al Recurso Suelo***

<b>Impacto ambiental al recurso Suelo por actividades de pavimentación de vías</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Recurso Afectado</b>	<b>Efecto</b>	<b>Impacto</b>
Construcción de estructuras de pavimento	Suelo	Disminución de elementos mayores, cambio de textura y permeabilidad.	Erosión del suelo.
Aplicación capa asfáltica	Suelo	Erosión, endurecimiento	Alteración de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.
		pérdida de protección boscosa, ganadera, agrícola	Cambios en el uso actual del suelo
Construcción estructuras de pavimento flexible y rígido	Suelo	Erosión y endurecimiento del suelo.	Cambio en las propiedades físico químicas del suelo.
		pérdida de protección boscosa, ganadera, agrícola.	Cambio en el uso del suelo
Imprimación, colocación de asfalto	Suelo	Erosión y deslizamiento	Cambios en las propiedades fisicoquímicas de los suelos.
		Cambios en el uso actual o permitido del suelo que se da por la ejecución de las obras.	Alteraciones en el uso actual del suelo

Construcción de pavimentos	Suelo	Erosión, endurecimiento	Alteración de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.
Mantenimientos de pavimentos flexibles	Suelo	Contaminación del suelo.	Pérdida o ganancia de suelo.
		Cambios en el uso actual o permitido del suelo que se da por la ejecución de las obras.	Cambio en el uso del suelo

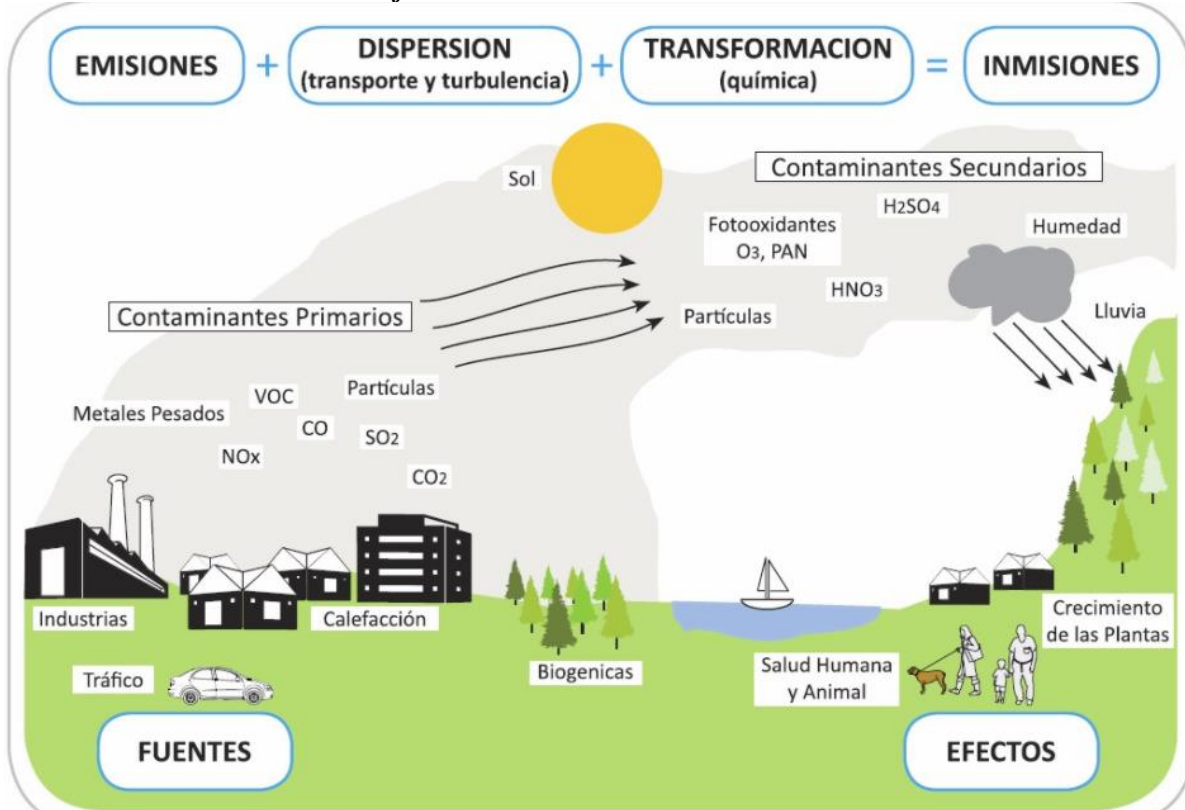
**Nota:** Impactos ambientales relacionados con las actividades de pavimentación de vías. Elaboración propia con base en datos de los impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia Archila & Aparicio, (2018)

#### 4.2.2. Contaminación Atmosférica

La afectación de la calidad del aire según la Agencia de protección Ambiental de EEUU (EPA), “las plantas de procesamiento de asfalto están dentro de las principales fuentes de contaminación del aire, contándose diversos contaminantes entre ellos, formaldehído, hexano, fenol, materia orgánica policíclica y tolueno”, que al producir humo, gases y vapores se convierten en sustancias tóxicas como el sulfuro de hidrógeno, dióxido de azufre, el monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

La contaminación atmosférica, de acuerdo con lo establecido en el título 5 del decreto 1076 de 2015, es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes, entendidos estos como fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas. Por lo que el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, afirma que en Colombia es uno de los problemas ambientales que ha generado impacto en la salud de los colombianos.

**Figura 3.**  
**Contaminación atmosférica**



**Nota:** La figura representa los impactos a la salud y al medio ambiente por las emisiones de las diferentes actividades del hombre. Tomado del Ministerio de Ambiente de Colombia.

<https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

La producción de mezclas asfálticas, en especial las mezclas en caliente necesitan mayor control en las emisiones, ya que en estas se emite Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de Nitrógeno (NOx) y material particulado. Por lo anterior el ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, mediante la resolución 909 del 2008, establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones, en el artículo 6, establece las actividades industriales y contaminantes a monitorear, como lo indica la tabla 8.

**Tabla 8.**

**Actividades Industriales y Contaminantes a Monitorear por Actividad Industrial.**

<b>Actividad industrial</b>	<b>Procesos e instalaciones</b>	<b>contaminantes</b>
Producción de ácido nítrico	Cualquier instalación que produzca ácido nítrico débil por el proceso de presión o de presión atmosférica. (con excepción de los procesos en los que se obtenga ácido nítrico con concentración superior al 70%, por medio de destilación).	NO <sub>x</sub>
Producción de ácido sulfúrico	Cualquier instalación que produzca ácido sulfúrico por el proceso de contacto por medio del quemado de azufre elemental, ácido de alquilación, sulfuro de hidrógeno, sulfuros orgánicos, y mercaptanos o residuos ácidos.	SO <sub>2</sub> Neblina ácida o trióxido de azufre
Producción de ácido clorhídrico	Cualquier instalación donde se produzca ácido clorhídrico, incluidos los sistemas de ventilación, tanques de almacenamiento y transporte de ácido.	HCl
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético.	Cualquier operación de cemento por debajo de la banda de rodamiento, por el costado, por la banda de rodamiento o en el sellante de la llanta y cada operación de rociado a llantas sin curar.	MP SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub> HC <sub>t</sub>
Producción de mezclas asfálticas	Cualquier instalación utilizada para la producción de mezclas asfálticas de mezcla caliente, calentando y secando agregado y mezclando con cementos de asfalto. Está compuesta por cualquier combinación de secadores, sistemas para timizar, manejo, almacenamiento y pesado de agregado caliente, sistemas de carga, transferencia y almacenamiento de mineral de llenado, sistemas para mezclar asfalto de mezcla caliente y sistemas de carga, transferencia y almacenamiento asociados con sistemas de control de emisiones.	MP SO <sub>2</sub> NO <sub>x</sub>

**Nota:** Parte de las actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial que establecen el ministerio de ambiente. Contaminantes: MP: Material Particulado, SO<sub>2</sub>: Dióxido de azufre, NO<sub>x</sub>: Óxidos de nitrógeno, HC<sub>t</sub>: Hidrocarburos Totales, HCl: Compuestos de Cloro Inorgánico. Tomado de la Resolución 909 del 5 de junio de 2008. Artículo 6. Ministerio De Ambiente, (2008)



En Colombia el monitoreo y control de la contaminación atmosférica ha tomado relevancia debido a la afectación a la salud de la población, en el IDEAM (2014), publican cifras que ha expuesto la Organización Mundial de la Salud, en donde dice que una de ocho muertes en Colombia se debe por la contaminación del aire, además, exhibe, “a nivel nacional, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de este fenómeno estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades” (IDEAM, 2014), recalcando en informes de la calidad del aire, que el material particulado 2.5 micras (PM 2.5) es el que genera mayor afectación, ya que este se encuentra conformado por partículas muy pequeñas de metales pesados, compuestos orgánicos y virus.

Por lo anterior, la normatividad colombiana establece los niveles máximos permisibles para contaminantes, en el artículo 4 de la resolución 610 del 24 de marzo de 2010, donde brinda competencias a las autoridades ambientales de iniciar mediciones por incumplimientos a los niveles máximos permisibles, que afecte la calidad del aire. A continuación, la tabla 9 representa los valores adoptados.

**Tabla 9.**  
*Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio*

Contaminante	Nivel Máximo Permissible ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO <sub>2</sub>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O <sub>3</sub>	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

**Nota:** Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, que establecen para monitoreo y seguimiento de la calidad del aire que adopto el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial. Tomado de la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010. Artículo 4. Ministerio De Ambiente, (2010)

La mayor parte de la contaminación se debe a la industria, y una de ellas es la producción de mezcla asfáltica en caliente, por lo que es incluida dentro de listado de actividades de la resolución 909 de 2008 en las que se debe prestar mayor atención y por ello es el seguimiento y monitoreo, con el fin de establecer medidas que contribuyan a mejorar sus procesos.

Duque, A. Forero, (2017), menciona que en las mezclas asfálticas en caliente y en frío se genera contaminación a la atmosfera, debido a que, en la mezcla asfáltica en caliente además del gran consumo de energía, emite contaminantes como hidrocarburos poli cíclicos aromáticos, dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (p.19). Y en la mezcla asfáltica en frio, es debido a que el asfalto es disuelto en keroseno, haciendo que, al colocar la mezcla, la fracción volátil se evapore. (p.20).

**Tabla 10.**  
***Impacto Ambiental al Recurso Aire***

<b>Impacto ambiental al reurso Aire por actividades de pavimentación de vías</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Recurso Afectado</b>	<b>Efecto</b>	<b>Impacto</b>
Construcción de estructuras de pavimento	Aire	Generación de emisiones atmosféricas – Material particulado.	Alteración en la calidad del aire
Aplicación capa asfáltica	Aire	Generación de gases y Material particulado.	Cambios en la calidad del aire
		Enfermedades auditivas	Perturbación a los niveles de presión sonora
Construcción estructuras de pavimento flexible y rígido	Aire	Contaminación del aire.	Incremento de la concentración de material particulado.
		emisiones de gases como los óxidos de Nitrógeno y de Carbono.	Incremento en la concentración de gases contaminantes.
		Generación de ruido.	Incremento en los niveles normales de presión sonora.
Imprimación, colocación de asfalto	Aire	Cambios en las concentraciones de material particulado por las actividades antrópicas	Alteraciones en la calidad del aire

		Incremento de gases contaminantes	Contaminación del aire.
Construcción De pavimentos	Aire	Generación de gases y Material particulado.	Cambios en la calidad del aire
		Enfermedades auditivas	Perturbación a los niveles de presión Sonora.
Mantenimientos de pavimentos flexibles	Aire	Afectación en la salud de las personas.	Cambios en los niveles de ruido

**Nota:** Impactos ambientales relacionados con las actividades de pavimentación de vías. Elaboración propia con base en datos de los impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia. Archila & Aparicio, (2018)

#### 4.2.3. Contaminación Al Agua

En cada una de las diferentes etapa de la producción de mezcla asfáltica hay contaminación al agua, pero también se debe tener en cuenta que pasa cuando ya se encuentra extendida en la vía:

El escurrimiento y transporte de los residuos de la pavimentación llevado a cabo por acción del agua y el viento, son los principales factores que hacen que los contaminantes lleguen a las fuentes hídricas cercanas, contaminando y alterando la calidad fisicoquímica de este recurso, este impacto genera que los cuerpos de agua no sean aptos para consumo o potabilización para ingesta humana, al igual que altera las condiciones para la vida de microorganismos, el 33.3% de los estudios relacionan este impacto en la etapa de pavimentación en la construcción de vías a nivel nacional. (Archila & Aparicio, 2018, p.59)

En el aprovechamiento de los bancos de materiales, donde se genera residuos como lixiviados de hidrocarburos, aceites, y que por lo general además de contaminar el suelo, terminan contaminando el agua subterránea (acuífero) provocando modificaciones del ecosistema, además de la alteración de los ciclos hidrológicos. Por otra parte el desarrollo de la vida de los organismos acuáticos también se ve afectada, debido a que se puede desplazar materiales solidos hacia arroyos, obstaculizando la entrada de la luz, por lo que evitaría que estos organismo hicieran su fotosíntesis o ciclo químico normal y tuvieran una oxigenación adecuada.

En la construcción de la superficie de rodamiento, también hay afectación en los ciclos hidrológicos ya que modifica la dirección de las ecorrentías naturales, trayendo como consecuencia modificaciones en los cursos de los riachuelos, esta afectación podría ser permanente y su influencia se podría ver inclusive a grandes distancias del sitio en donde se realizan trabajos de construcción vial.

**Tabla 11.**  
**Impacto Ambiental al Recurso Agua**

<b>Impacto ambiental al recurso agua por actividades de pavimentación de vías</b>			
<b>Actividad</b>	<b>Recurso Afectado</b>	<b>Efecto</b>	<b>Impacto</b>
Construcción de Pavimentos	Agua	Perturbación de las propiedades fisicoquímicas del agua.	Contaminación de corrientes de agua superficial y subsuperficial
		Alteración a la capacidad de transporte.	
Mantenimiento de pavimentos flexibles	Agua	Contaminación de los cuerpos de agua.	Cambios en la calidad del agua superficial.
		Represamiento de agua, avalanchas.	Alteración en la capacidad de transporte de agua.

**Nota:** Impactos ambientales relacionados con las actividades de pavimentación de vías. Elaboración propia con base en datos de los impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia. Archila & Aparicio, (2018)

#### **4.2.4. Consumo de Energía**

Para lograr obtener datos o análisis del consumo de materiales reciclados en el ciclo de vida en la construcción y pavimentación se cuenta con una herramienta en Excel:

PaLATE (Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects, es un modelo ambiental y económico diseñado en Excel para aplicaciones en pavimento), estima el consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO e informa las emisiones promedio de lixiviados para diferentes materiales de construcción. Los efectos son para las etapas de construcción inicial, mantenimiento y total se presentan en gráficos de barras. Además, se tienen en cuenta los efectos de los procesos de transporte y producción de materiales por separado. (Castro, 2018, p.45)

Con respecto a las etapas de producción que generan mayor consumo y por tanto representan mayor agotamiento a los recursos naturales, se mencionan a continuación:

la contaminación se presenta en la mayoría de sus procesos: desde la extracción, la fabricación de los materiales, hasta las diferentes actividades desarrolladas en la construcción de las obras civiles. Lo anterior provoca el agotamiento de varios recursos no renovables, así como la contaminación del agua y del aire, además del excesivo consumo de energía. (Pacheco, C. Fuentes, L. Sánchez, E. Rondón, 2017, p.3).

En la mezcla asfáltica en caliente, se requiere alto consumo de energía en el secador para el calentamiento y secado de los agregados y en los servicios industriales, específicamente para la caldera. Igualmente, debido a las operaciones en que se transportan o almacenan sólidos y para el trasiego final de la mezcla asfáltica hacia el sitio de almacenamiento, se requiere de una cierta cantidad de energía eléctrica. (Catillo, E. Acevedo, L. Orduz, 2000, p.22).

**Tabla 12.**  
*Consumo de energía térmica para la fabricación de una tonelada de mezcla asfáltica en caliente*

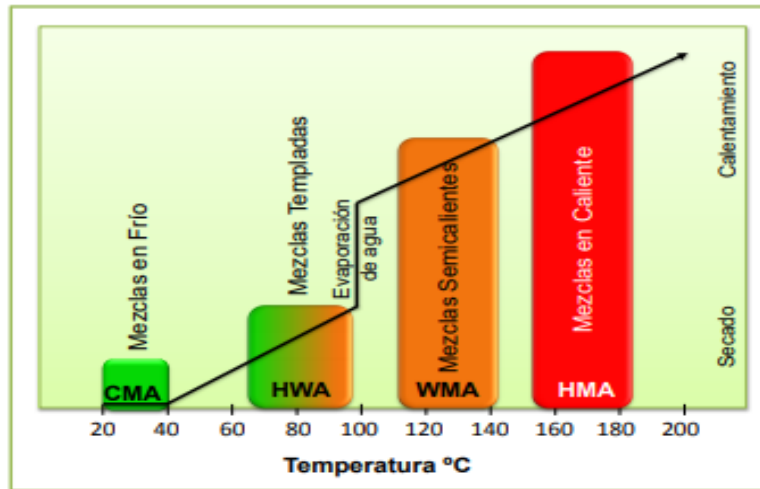
<b>Proceso</b>	<b>MJ/Ton</b>
<b>Energía Térmica</b>	
Secador	120,0
Servicios industriales (Calderas)	114,5
<b>Energía Eléctrica</b>	
Bandas transportadoras, elevadores de cangilones	6 KW-H

**Nota:** Estos datos corresponden a la tecnología de proceso de plantas batch (Proceso discontinuo). Tomado de Perfil tecnológico ambiental de la industrias de mezclas asfálticas en Colombia Catillo, E. Acevedo, L. Orduz, (2000, p.23).

A continuación en el figura 4, clasifica los tipos de temperatura en las mezclas asfálticas, considerando nuevos procesos novedosos para la producción de mezclas.

**Figura 4.**

*Clasificación aproximada de los diferentes tipos de mezclas por rango de temperaturas.*

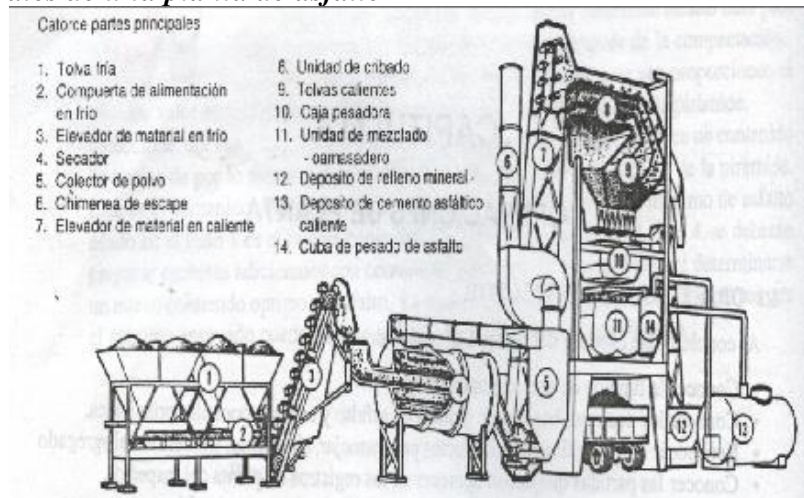


**Nota:** Clasificación de temperatura utilizada en cada uno de los tipos de mezclas existentes. Tomado de Monografía estado del arte sobre las mezclas asfálticas semicalientes Alonso, A. Moll, R. Tejada, (2018, p.2).

“Las mezclas en frío y en caliente son las más antiguas; por su parte, las semicalientes y las templadas han surgido como nuevas alternativas para reducir el impacto ambiental y el consumo de combustibles” (Alonso, A. Moll, R. Tejada, 2018, p.2).

**Figura 5.**

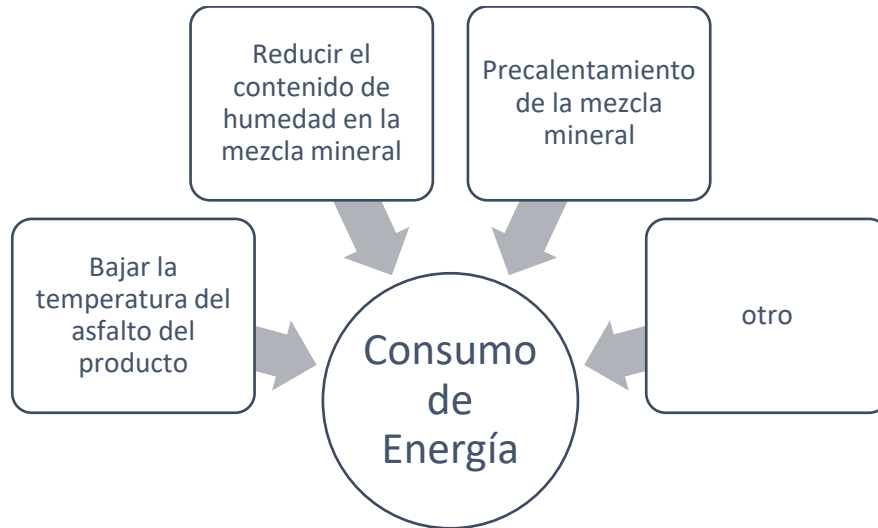
*Componentes Principales de una planta de asfalto*



**Nota:** Planta de asfalto y sus partes. Tomado de monografías.com (Gutierrez, 2004)

“La reducción del consumo de energía en el proceso de producción de mezcla de asfalto se logra disminuyendo la temperatura del asfalto producido, reduciendo el contenido de humedad en la mezcla mineral utilizada, utilizando la mezcla mineral precalentada, etc” (Androjić et al., 2020, p.2).

**Figura 6.**  
*Formas de reducir el consumo de energía*



**Nota:** Solución brinda para la reducción de consumo de energía mediante el método WMA. Adaptado de Análisis del impacto del contenido agregado de humedad en la demanda de energía durante la producción de asfalto de mezcla en caliente. Androjić et al.,(2020, p.2)

## **5. CAPITULO III: IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS DE RECUPERACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA CON RESIDUOS SOLIDOS INDUSTRIALES**

Actualmente se adelanta varios estudios sobre cómo mejorar la resistencia de los materiales utilizados en el proceso de fabricación de mezclas asfálticas, en especial en caliente, con la combinación de residuos provenientes de otros procesos industriales, con el fin de disminuir volúmenes de desechos producidos de distintas fuentes y reducir de igual forma el consumo de materiales extraídos de forma natural, al utilizar el fresado de pavimento asfáltico envejecido-RAP.

El reciclaje de asfalto incorporado en los nuevos revestimientos en carreteras reduce el carbono emitido y evita que los residuos vayan a rellenos y sitios de disposición final de residuos. Permite volver a utilizar el asfalto que ayuda a asegurar de que se está haciendo un uso eficiente de los materiales, y la preservación de los recursos naturales (en forma de combustibles fósiles). (LÓpez, M. Pérez, A. Garnica, P. 2014, p.24)

Para mejorar la resistencia y otras propiedades físicas y mecánicas de la mezcla asfáltica recuperada, se han considerado algunos residuos industriales como:

- Cenizas volantes de carbón
- Residuos de cerámica
- Polvo de horno de cemento
- Escoria de cobre
- Escoria de hierro y acero
- Barro rojo
- Caucho
- Polvo de ladrillo
- Residuo polvo de vidrio
- Residuos de construcción y demolición



## 5.1. Residuos industriales

“Varias industrias manufactureras producen subproductos no deseados, algunos de los cuales se reciclan para la producción de la industria, pero una parte considerable del material termina como desecho” (Choudhary et al., 2020, p.8). Lo residuos que se tomaron hace parte de la recopilación de un estudio realizado en 30 países.

Desde una perspectiva de ingeniería de pavimentos, los materiales recuperados deben ser utilizados de una manera tal que el rendimiento esperado del proyecto no se vea comprometido. Los residuos y subproductos, sin embargo, son materiales muy diferentes a los naturales ya que han sufrido procesos que modifican sus propiedades. (López, M. Pérez, A. Garnica, 2014, p. 32)

debido a lo anterior, una parte importante de su reutilización o reciclado es la determinación de las mismas para encontrar su uso óptimo y especificaciones:

En el uso de materiales alternativos, como lo son los residuos y sub-productos a diferencia de cuando se emplean materiales naturales en la construcción de caminos, se debe tomar en cuenta la interacción que éstos tendrán en el ambiente desde un punto de vista químico y físico. Algunas de las interacciones potenciales que se podrían dar son: 1) el transporte de partículas finas en el empleo del material, 2) infiltración por lluvia (antes de cubrir el material e.g. antes de sellos en carpetas), 3) transferencias de contaminantes al subsuelo o agua subterránea por infiltración de la lluvia, antes, durante o después de los sellos o coberturas, 4) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debido al añejamiento por condiciones climáticas, y 5) el efecto de la transferencia de contaminantes por deformaciones debidas al tránsito. (López, M. Pérez, A. Garnica, 2014, p. 2)

A continuación en la tabla 13 se encuentra relacionado los residuos objeto estudio, en donde se destaca aspectos como; origen, efecto de la mezcla asfáltica, resultados de estudios, impactos ambientales, sociales y económicos.

**Tabla 13.**  
**Residuos Industriales utilizados en Mezclas Asfálticas**

Residuo	Origen	Efecto en la mezcla	Resultados de Estudios	Impactos ambientales/Sociales/económicos	Fuente/Referencia
Cenizas volantes de Carbón-CFA	<p>El CFA es un subproducto mineral obtenido después de la combustión de carbón pulverizado en proyectos de energía térmica para la generación de electricidad.</p> <p>Es un material no plástico, que se obtiene en partículas huecas pequeñas, predominantemente esféricas, cuya densidad es menor que los rellenos convencionales. El tamaño de partícula de CFA varía entre 1 y 60</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiene naturaleza hidrofóbica y contenido de cal libre, lo que puede mejorar la adhesión del agregado de betún y la durabilidad de la mezcla de asfalto contra la humedad.</li> <li>- Tiene un efecto significativo sobre la viscosidad y las propiedades reológicas de la masilla de asfalto y las mezclas.</li> <li>- Reduce el esfuerzo de mezclado, la temperatura de colocación y mejora la trabajabilidad de las mezclas de asfalto sin causar ningún efecto perjudicial sobre su rendimiento.</li> <li>- Tiene un efecto lubricación entre los agregados.</li> </ul>	<p>No se observaron cambios en la trabajabilidad de la mezcla al reducir al 10% el betun por la CFA. Tuvo un buen comportamiento a las grietas. Mejoró la resistencia al desgarro, al despojo y al envejecimiento de la mezcla de asfalto.</p> <p>El tramo construido en la India resistió el tráfico de 5,000 vehículos por día durante el período de estudio de 2 años.</p>	<p>Disminuye el consumo de energía, costos y emisiones de gases de efecto invernadero.</p>	<p>(Choudhary et al., 2020)</p>

Ceramica - CW	Producido durante las operaciones de corte, molienda, preparación y pulido de la cerámica.	Tiene baja sensibilidad a la humedad debido a su naturaleza insoluble en agua y no tiene productos de descomposición nocivos.	Se observó una mejora en la estabilidad de Marshall y en la resistencia a la formación de surcos. Dio como resultado una mayor resistencia al agrietamiento por fatiga y al daño inducido por la humedad	No contiene productos de descomposición nocivos.	(Choudhary et al., 2020)
Polvo de Horno de Cemento	Es un subproducto de la industria del cemento que se genera en grandes volúmenes (15-20% del cemento producido) y se recolecta de precipitadores electrostáticos durante la producción de clínker de cemento.	- La adición del polvo en el betún produce una masilla de asfalto de baja dúctil y asegura la resistencia al pelado de las mezclas de asfalto.	Mostro mejoras en la gravedad específica, la estabilidad Marshall, la resistencia a la fatiga, la resistencia al enrutamiento y la resistencia al agrietamiento a baja Temperatura con un OBC ligeramente más alto	Contiene metales pesados en su composición, requiere análisis de lixiviados.	(Choudhary et al., 2020)
Escoria de Cobre	Se produce durante el proceso de fundición de	- Mejora el rendimiento contra la humedad.	Se observó que el reemplazo del relleno de piedra	La escoria de cobre contiene metales pesados como As, Cd,	(Choudhary et al., 2020)

	<p>mineral de sulfuro y se recoge como el material que flota en la parte superior del cobre fundido en un horno</p>	<p>- Su contenido de CaO, relativamente más alto que el agregado de granito y sílice y se espera que muestre un rendimiento superior en condiciones saturadas y de congelación-descongelación.</p>	<p>caliza convencional con escoria de cobre puede producir mezclas de asfalto con resistencia superior a la fatiga y al agrietamiento. Hay pocos estudios que exploren el potencial de la escoria de cobre.</p>	<p>Cu, Cr, Pb y Zn en su composición, se encontraron estabilizados debido a su encapsulación por el betún presente en la mezcla de asfalto.</p>	
Escoria de hierro- BF	<p>Se produce en la industrias siderúrgicas durante la separación del metal fundido. Es un subproducto obtenido cuando el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza se sobrecalientan en el alto horno para producir arrabio</p>	<p>- Las mezclas de SMA preparadas con escoria de alto horno tienen mayor estabilidad y resistencia al enrutamiento a un OBC ligeramente mayor que las mezclas de piedra caliza.</p>	<p>Se observó resiliencia y vida de fatiga más bajos que las mezclas de piedra caliza.</p>		<p>(Choudhary et al., 2020)</p>
Escoria de acero - BOF	<p>Se produce en la industrias siderúrgicas durante la separación del metal fundido.</p>	<p>- Mayor resistencia al agrietamiento. - Le brinda a la masilla propiedades reológicas a las altas temperaturas.</p>	<p>Se observó resistencia al agrietamiento que la mezcla de asfalto modificado con piedra caliza</p>		<p>(Choudhary et al., 2020)</p>

	Es de naturaleza no hidráulica, porosa, alcalina y cristalina y contiene una cierta cantidad de Fe <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y P <sub>2</sub> , O <sub>55</sub> . Por cada tonelada de producción de acero, se producen 200 kg de BOF.		debido a la unión eficiente entre el betún y el relleno causada por la naturaleza alcalina de la escoria de acero. Mayor acción química entre la escoria alcalina y el betún ácido.		
Barro Rojo	El residuo de lodo rojo o bauxita es un residuo sólido de alto volumen producido por las industrias de aluminio después de la digestión del mineral de bauxita con soda cáustica en el proceso de Bayer. El lodo rojo se compone principalmente de óxidos de aluminio y óxidos de hierro en grandes cantidades.	- Tiene mejor resistencia al enrutamiento	Se observó disminución en la adhesión de las mezclas debido a la incorporación de lodo rojo en comparación con el relleno de polvo de piedra de dolomita mejorando la adhesión del betún agregado, esto, debido a las propiedades del lodo rojo. Se observó que al ser poroso absorbe una mayor cantidad de betún, lo que aumenta el	Se compone de óxidos de metales pesados que pueden filtrarse en el agua subterránea.	(Choudhary et al., 2020)

			OBC de sus mezclas.		
Polvo de Caucho	Proveniente del reciclaje de Neumáticos, que es molido. Hay dos tipos de procesos utilizados en el estudio: En el proceso seco, el polvo de caucho es incorporado al agregado pétreo como una porción de agregado fino antes de mezclarse con el asfalto. En el proceso húmedo, el polvo de caucho se adiciona al ligante; es decir, al asfalto caliente cuando su viscosidad es relativamente baja y permite la mezcla.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mejora de las propiedades de durabilidad ya que previene el agrietamiento del cemento asfáltico.</li> <li>- Mejora la adherencia en superficies mojadas.</li> <li>- Reduce el ruido que se trasmite a través del pavimento.</li> </ul>	La gravedad específica y la densidad de las mezclas asfálticas obtenidas tanto mediante el proceso seco como el húmedo son ligeramente inferiores a las del asfalto sin modificar, debido a los volúmenes de vacíos en el asfalto modificado y mayor permeabilidad en las mezclas modificadas. En las mezclas asfálticas modificadas con polvo de caucho el valor del módulo es mayor. Esto se traduciría en menores espesores del pavimento asfáltico y conlleva a un	Disminución en costos de mantenimiento, Reducción del ruido, reduce la contaminación por acumulación de neumáticos.	(Campana et al., 2015)

			ahorro por concepto de volumen de material en el diseño de una obra vial.		
Polvo de vidrio	Desecho de demolición cuando se produce a partir de cristales triturados, desecho de la industria del vidrio cuando se produce durante las operaciones de corte y pulido.	Mejora significativa en la estabilidad, la vida útil de la fatiga, el módulo de rigidez y la resistencia al enrutamiento.	Se ha observado que las mezclas modificadas con polvo de vidrio mostraron una resistencia superior contra la formación de grietas, sin embargo, el polvo de vidrio mostró una resistencia a la humedad pobre, así como una pobre actividad y pasividad que las mezclas convencionales de OPC y polvo de piedra		
Residuos de construcción y demolición	<b>Polvo de ladrillo:</b> Se produce después de la trituración eficiente de piezas de ladrillo rotas.	- Mejor susceptibilidad a la humedad y vida útil a la fatiga. - Produjo masillas más rígidas con mayor viscosidad a	Se observó que las mezclas con masilla rígida requirieron una temperatura más alta para la mezcla y la compactación,	Mayor emisión de gases de efecto invernadero	(Choudhary et al., 2020)

		<p>alta temperatura en comparación con el relleno de piedra caliza.</p> <p>- Resistencia al enrutamiento</p>	<p>lo que requirió más energía.</p> <p>Las masillas más rígidas preparadas con polvo de ladrillo también son susceptibles de agrietarse a una temperatura más baja.</p>		
	<p><b>Polvo de hormigón reciclado:</b> Los desechos de concreto reciclado son uno de los desechos de demolición primarios, cuya porción fina se compone principalmente de mortero de cemento y agregados finos. Estos desechos son difíciles de utilizar como agregados sustitutos y podrían adoptarse como relleno alternativo.</p>	<p>- Mejora la sensibilidad a la humedad, la vida útil de la fatiga y la resistencia al enrutamiento a temperaturas normales y más altas.</p> <p>- Poca resistencia al agrietamiento a baja temperatura en comparación con las mezclas de piedra caliza convencionales</p>	<p>Se observó mejora en la estabilidad, la resistencia a la formación de surcos, la vida útil de la fatiga y el módulo elástico de la mezcla de asfalto cuando los agregados de concreto reciclado se utilizan como agregados finos y rellenos</p>	<p>Disminución del consumo de recursos naturales.</p>	

**Nota:** La tabla representa cada uno de los residuos industriales objeto de revisión, donde habla de su origen y efecto ocasionado en la mezcla, permitiendo determinar el impacto ambiental en su proceso y como delimitaría su utilización en la mezcla asfáltica.



Oxido de calcio: CaO, OBC: Oil Binding Capacity, SMA: Stone Mastic Asphalt, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Oxido de hierro P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Fosforo asimilable, OPC: Cemento Pórtland Ordinario. Elaboración propia con base en datos de Choudhary et al., (2020) y Campaña et al., (2015)

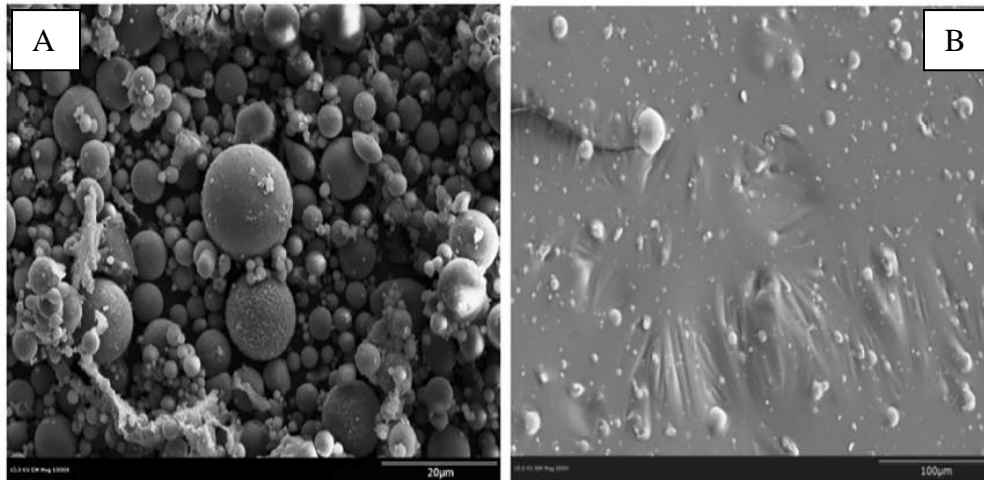
### ***5.1.1. Ceniza Volante de Carbón - CFA***

La ceniza volante de carbón o CFA como es conocida en otros países, que provienen de la combustión del carbón de proyectos que tienen que ver con la energía térmica, tienen varios usos, siendo uno de ellos materia de revisión para la producción de mezcla asfáltica:

El pequeño tamaño de partícula del CFA tiene un efecto significativo sobre la viscosidad y las propiedades reológicas de la masilla de asfalto y las mezclas, lo que a su vez influye en las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas de asfalto. La utilización de CFA en mezclas de asfalto también reduce el esfuerzo de mezclado, la temperatura de colocación y mejora la trabajabilidad de las mezclas de asfalto sin causar ningún efecto perjudicial sobre su rendimiento. Estos efectos se atribuyeron a su tamaño de partícula fino, forma esférica y su tendencia a actuar como extensor y potenciador de betún. Un estudio reciente ha observado cambios en la trabajabilidad de la mezcla de asfalto cuando se reemplazó el 10% del volumen de betún en la mezcla con CFA. Este comportamiento se atribuyó al efecto de lubricación entre agregados causado por las partículas de CFA, que conducen a un menor consumo de energía, así como a una reducción adicional en el costo de la mezcla y la emisión de gases de efecto invernadero. (Choudhary et al., 2020, p. 8)

La figura 6 nos permite ver como actúan las partículas en la mezcla cuando a esta se le agregada las cenizas volantes en diferentes proporciones.

**Figura 7. Partículas de Ceniza Volante de Carbón**



**Nota:** Imagen A; Partículas de CFA. Imagen B; muestra agrietamiento mediante la introducción de 60% de CFA en masilla de asfalto. Tomado de la utilización de materiales de desecho sólidos como cargas alternativas en mezclas de asfalto: una revisión (Choudhary et al., 2020, p. 9)

Según, la Norma Técnica Colombiana, INCONTEC, (1993) las cenizas volcánicas se clasifican conforme al origen del carbón y los requerimientos físicos y químicos, establecidos en la normativa de la siguiente manera:

Clase N: Puzolanas naturales calcinadas o crudas. Son productos naturales de origen térmico e hidrotérmico procedentes de la descomposición de plantas, árboles y animales.

Clase F: Cenizas volantes provenientes de la quema de carbón antracítico o bituminoso. Son de tipo artificial obtenidos de tratamientos térmicos de activación.

Clase C: Cenizas volantes provenientes de carbón lignítico o sub bituminoso, cuya diferencia comparativa de las otras clases se basa en el contenido de sílice, aluminio y óxido de hierro. Además, la clase C se caracteriza por tener propiedades cementantes y puzolánicas, con alta posibilidad de alcanzar más de 10% de cal en algunas cenizas volantes de esta clase. (INCONTEC, 1993, p. 2)

En otro orden de ideas, este tipo de compuestos se utiliza en la aplicación de la mezcla asfáltica y dependen del relleno y abertura. En las centrales termoeléctricas principalmente se

producen tres tipos de carbón, carbón bituminoso, carbón de antracita y carbón sub bituminoso lignito.

### **5.1.2. Cerámica - CW**

La industria de la cerámica se ha convertido en un gran generador de residuos que van a terminar en rellenos sanitarios, en Europa, le han encontrado provecho en la producción de mezcla asfáltica debido a sus propiedades:

Se espera que alrededor del 30% de la producción anual en la industria cerámica se convierta en desechos durante las operaciones de corte, molienda, preparación y pulido. Esta cerámica de desecho podría triturarse fácilmente al tamaño deseado y formar polvo de cerámica que podría utilizarse como relleno. La mayoría de los materiales cerámicos, como la chatarra, están hechos de arcilla de caolín (halloysita), que tiene baja sensibilidad a la humedad debido a su naturaleza insoluble en agua y no tiene productos de descomposición nocivos. Se observó una mejora en la estabilidad de Marshall y en la resistencia a la formación de surcos a mayor OBC cuando se introdujo CW en concreto asfáltico y SMA en comparación con los rellenos convencionales. Esto se debió a la alta resistencia, la naturaleza porosa y la mayor absorción de betún en la superficie de CW. Mezclas de SMA preparadas con relleno de CW que tiene un tamaño de partícula entre 0.075 y 0.020 mm tenían mejor resistencia cohesiva que la preparada con relleno de piedra caliza en el mismo rango de tamaño. Esto dio como resultado una mayor resistencia al agrietamiento por fatiga y al daño inducido por la humedad. (Choudhary et al., 2020, p. 9)

### **5.1.3. Polvo de Horno de Cemento – CKD**

La industria del cemento, a pesar de las muchas utilidades que le damos habitualmente y más en el mantenimiento vial, también genera residuos, los cuales se han considerado para la producción de mezclas asfálticas:

La ERC es un subproducto de la industria del cemento que se genera en grandes volúmenes (15-20% del cemento producido) y se recolecta de precipitadores electrostáticos durante la producción de clínker de cemento. La ERC cumple con los requisitos de gradación, plasticidad e impurezas orgánicas para el relleno mineral y constituye una alta proporción de CaO reactivo. La adición de CKD en el betún produce una masilla de asfalto de baja dúctil y asegura la resistencia al pelado de las mezclas de asfalto. A una concentración óptima, la ERC puede producir mezclas de asfalto con parámetros Marshall similares y propiedades volumétricas con un OBC similar al de las mezclas convencionales que contienen relleno de cal y piedra caliza hidratados. Algunas mezclas de asfalto preparadas con CKD también mostraron mejoras en la gravedad específica, la estabilidad Marshall, la resistencia a la fatiga, la resistencia al enrutamiento y la resistencia al agrietamiento a bajo temperatura con un OBC ligeramente más alto. La ERC también contiene metales pesados en su composición, sin embargo, el análisis de lixiviación ha sugerido que el betún presente en las mezclas de asfalto tiene un efecto estabilizador sobre las partículas de ERC que limita la lixiviación de metales pesados de la mezcla. (Choudhary et al., 2020, p. 9)

#### ***5.1.4. Escoria de Cobre***

La industria de metales genera grandes cantidades de escorias, siendo una de ellas el cobre, que debido a sus propiedades tiene potencial para que la mezclas asfálticas sean mas rígidas y permitan estabilidad en la rodadura:

La escoria de cobre tiene una gradación más fina y una gravedad específica más alta que el relleno de piedra caliza debido a los óxidos de hierro relativamente más altos. Consiste en CaO y SiO<sub>2</sub> en su composición y puede mostrar propiedades zolanicas que podrían mejorar el rendimiento de sus mezclas contra la humedad. También tiene un contenido de CaO relativamente más alto que el agregado de granito y sílice y se espera que muestre un rendimiento superior en condiciones saturadas y de congelación-descongelación. A pesar de esto, hay muy pocos estudios que exploren el potencial de la escoria de cobre como relleno en las mezclas de asfalto. Se observó que el reemplazo

del relleno de piedra caliza convencional con escoria de cobre puede producir mezclas de asfalto con resistencia superior a la fatiga y al agrietamiento. Esto se atribuyó a una gradación más fina de la escoria de cobre, que puede producir una mezcla más rígida con el mismo contenido de relleno. Aunque la escoria de cobre tenía trazas de metales pesados como As, Cd, Cu, Cr, Pb y Zn en su composición, se encontraron estabilizados debido a su encapsulación por el betún presente en la mezcla de asfalto. (Choudhary et al., 2020, p. 10)

#### **5.1.5. Escoria de Hierro de Alto Horno – BF**

La escoria de hierro, es un subproducto obtenido cuando el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza se sobrecalientan en el alto horno para producir arrabio. Tiene una alta gravedad específica, alcalina y no plástica en la naturaleza. Se descubrió que las mezclas de SMA preparadas con escoria de alto horno tienen mayor estabilidad y resistencia al enrutamiento a un OBC ligeramente mayor que las mezclas de piedra caliza. Sin embargo, también tenían un módulo de resiliencia y vida de fatiga más bajos que las mezclas de piedra caliza. (Choudhary et al., 2020, p. 10).

#### **5.1.6. Escoria de Acero del Horno Básico de Oxígeno – BOF**

La escoria BOF también se conoce como escoria de acero, es de naturaleza no hidráulica, porosa, alcalina y cristalina y contiene una cierta cantidad  $Fe_2 O_3$  y  $P_2 O_5$ . Por cada tonelada de producción de acero, se producen 200 kg de BOF. Se ha observado que las mezclas de asfalto modificado con polvo de escoria de acero tenían mayor resistencia al agrietamiento que la mezcla de asfalto modificado con piedra caliza debido a la unión eficiente entre el betún y el relleno causada por la naturaleza alcalina de la escoria de acero. La masilla de asfalto que contiene escoria de acero también mostró propiedades reológicas superiores que la masilla de piedra caliza a alta temperatura debido al mayor endurecimiento de la escoria, así como a una mayor acción química entre la escoria alcalina y el betún ácido. (Choudhary et al., 2020, p. 10).

### **5.1.7. Barro Rojo**

Se descubrió que esta ligera composición química inusual es responsable del mejor rendimiento a alta temperatura de su mortero, así como de la mayor estabilidad Marshall de su mezcla de concreto asfáltico modificado. Las mezclas de asfalto de grado abierto preparadas con lodo rojo mostraron un mejor rendimiento en términos de resistencia al enrutamiento y desgarro, lo que se atribuyó a la mejora de la adhesión en su mortero debido al aumento de su endurecimiento al agregarle lodo rojo. Sin embargo, otro estudio ha observado una ligera disminución en la adhesión de las mezclas debido a la incorporación de lodo rojo en comparación con el relleno de polvo de piedra de dolomita. Esto se atribuyó a la composición mineralógica del lodo rojo que carece de los compuestos a base de calcio como la calcita y la dolomita que mejoraron la adhesión del betún agregado. También se descubrió que el lodo rojo es de naturaleza relativamente porosa debido a que absorbe una mayor cantidad de betún, lo que aumenta el OBC de sus mezclas. (Choudhary et al., 2020, p. 10)

### **5.1.8. Polvo de Caucho**

Las propiedades del asfalto modificado con polvo de caucho son muy sensibles al proceso de mezcla, que depende de factores externos como temperatura de la mezcla, tiempo y velocidad de agitación, y factores internos como cantidad y tamaño de partícula del polvo caucho, tipo de asfalto, tipo y pureza del polvo de caucho. Un aspecto de relevante importancia en la mezcla húmeda es el mecanismo de agitación, que debe ser de alto cizallamiento con el fin de lograr la digestión total del polvo de caucho en el bitumen, evitando la turbulencia y la separación de las fases del asfalto modificado. (Campaña et al., 2015, p. 2)

Los dos métodos estudiados en este trabajo para la incorporación de polvo de caucho en el cemento asfáltico son el proceso por vía seca y proceso por vía húmeda. En el proceso seco, el polvo de caucho es incorporado al agregado pétreo como una porción de agregado fino antes de mezclarse con el asfalto. En el proceso húmedo, el polvo de caucho se adiciona al ligante; es decir,

al asfalto caliente cuando su viscosidad es relativamente baja y permite la mezcla, como lo indica la tabla 14.

**Tabla 14.**

*Resultados del análisis del polvo de caucho usado en la obtención de mezclas asfálticas modificadas mediante los procesos seco y húmedo.*

<b>Humedad en el Polvo de caucho</b>	<b>Gravedad específica</b>	<b>Caucho tamizado Tamiz No 8 (2.36 mm)</b>	<b>Contenido de material ferroso</b>
(%)		(%)	(%)
0.41	1.17	100	0.011

**Nota:** Resultado del análisis realizado a la muestra de la mezcla con polvo de caucho. Tomado de la obtención de asfalto modificado con polvo de caucho proveniente del reciclaje de neumáticos de automotores. Campaña et al., (2015, p.2)

#### **5.1.9. Polvo de Vidrio - GWP**

El vidrio es frágil por naturaleza, tiene baja absorción y está compuesto principalmente de sílice en su composición. En su estudio, se observó una mejora significativa en la estabilidad, la vida útil de la fatiga, el módulo de rigidez y la resistencia al enrutamiento cuando se usa GWP en lugar de polvo de ladrillo, polvo de piedra y cenizas de cáscara de arroz en mezclas de concreto asfáltico. La razón detrás de esto fue la mejora de la interacción fisicoquímica entre el vidrio y el betún en comparación con otros rellenos. Estudios recientes han observado que las mezclas modificadas con polvo de vidrio mostraron una resistencia superior contra la formación de grietas y grietas, sin embargo, el polvo de vidrio mostró una resistencia a la humedad pobre, así como una pobre actividad y pasividad que las mezclas convencionales de OPC y polvo de piedra. La baja sensibilidad a la humedad y la adhesión de las mezclas de asfalto modificado con vidrio se atribuyen a una mala unión del asfalto bituminoso; debido al predominio de sílice en la composición del vidrio. (Choudhary et al., 2020, p. 12)



### ***5.1.10. Residuos de Construcción y Demolición***

Los RCD son aquellos residuos provenientes de la construcción, rehabilitación y demolición de cualquier tipo de obra, ya sea de carácter público o privado. Una de las formas de clasificación internacional es catalogar los RCD de acuerdo a su procedencia (Pacheco, C. Fuentes, L. Sánchez, E. Rondón, 2017, p. 4):

- Materiales de excavación: tierra, arena, grava, rocas, etc.
- Construcción y mantenimiento de obras civiles: asfalto, arena, grava y metales, etc.
- Materiales de demolición: bloques de hormigón, ladrillos, yeso, porcelana y cal-yeso.

#### **5.1.10.1. Polvo de Ladrillo – RBD**

RBD se produce después de la trituración eficiente de piezas de ladrillo rotas. RBD tiene partículas rugosas, alto contenido de sílice y también posibilidad de alto contenido de arcilla. Se descubrió que las mezclas de asfalto producidas con él ofrecen rendimientos muy variables. Han descubierto que RBD tiene una superficie de partícula más rugosa y una distribución homogénea del tamaño de partícula que la piedra caliza convencional, debido a que tenía una mayor adsorción de betún, dio como resultado un mayor OBC de la mezcla preparada. Las mezclas de concreto asfáltico preparadas con RBD tenían una mejor susceptibilidad a la humedad y vida útil a la fatiga que las mezclas de control respectivas. RBD también produjo masillas más rígidas con mayor viscosidad a alta temperatura en comparación con el relleno de piedra caliza. Aunque fue beneficioso en términos de resistencia al enrutamiento, las mezclas con masilla rígida requirieron una temperatura más alta para la mezcla y la compactación, lo que requirió más energía. Esto no solo aumentará el costo de la construcción sino que también causará efectos perjudiciales para el medio ambiente debido a una mayor emisión de gases de efecto invernadero. Las masillas más rígidas preparadas con polvo de ladrillo también son susceptibles de agrietarse a una temperatura más baja. (Choudhary et al., 2020, p. 11)

#### 5.1.10.2. Polvo de Hormigón Reciclado

Los desechos de concreto reciclado son uno de los desechos de demolición primarios, cuya porción fina se compone principalmente de mortero de cemento y agregados finos. Estos desechos son difíciles de utilizar como agregados sustitutivos y podrían adoptarse como relleno alternativo. Similar al polvo de ladrillo, el polvo de hormigón reciclado también tiene una textura rugosa que resultó en un mayor OBC de la mezcla de asfalto. Sin embargo, a diferencia del polvo de ladrillo, tiene una composición de calcita que resultó en la formación de mezclas de asfalto resistentes a la humedad superiores. La utilización de polvo de hormigón reciclado en mezclas de concreto asfáltico mejoró la sensibilidad a la humedad, la vida útil de la fatiga y la resistencia al enrutamiento a temperaturas normales y más altas. Sin embargo, también mostró un rendimiento relativamente pobre en términos de resistencia al agrietamiento a baja temperatura en comparación con las mezclas de piedra caliza convencionales. En un estudio, se observó una mejora en la estabilidad, la resistencia a la formación de surcos, la vida útil de la fatiga y el módulo elástico de la mezcla de asfalto cuando los agregados de concreto reciclado se utilizan como agregados finos y rellenos. (Choudhary et al., 2020, p. 11)

De acuerdo con la investigación de (Castro, 2018), “el uso de materiales de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en mezclas asfálticas ha sido preferido en comparación con materiales vírgenes en diferentes países, por sus beneficios ambientales” (p. 44)

Por otra parte, hay diferentes tipos de pavimento y tecnologías empleadas en la producción de mezclas asfálticas, que buscan tener relación con disminuir el impacto ambiental y costos de producción, por lo que se encuentran paralelos de tecnologías y alternativas en la utilización de residuos sólidos, con el objeto de empezar a utilizar el reciclaje y disminuir volúmenes en los rellenos sanitarios.

## 5.2. Alternativas de Recuperación de Mezcla Asfáltica

La búsqueda de opciones que permitan disminuir efectos negativos al medio ambiente hace que se presente diferentes investigaciones que permitan abordar el reciclaje: “La necesidad

de utilizar alternativas de mantenimiento de la infraestructura vial que sean sostenibles ha llevado a un crecimiento significativo en el reciclaje de pavimentos y tecnologías de estabilización con asfalto” (Castro, 2018, p. 18).

Algunos de los beneficios ambientales que tienen las mezclas recicladas son (Castro, 2018, p. 44):

- Optimizar el uso de los recursos naturales.
- Reducir el consumo de energía.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (limitar la contaminación).
- Mejorar la salud, la seguridad y la prevención de riesgos.
- Garantizar un alto nivel de comodidad y seguridad para el usuario

**Tabla 15.**  
*Efectos de la utilización de Residuos de Construcción y Demolición en Mezcla asfáltica Recuperadas- RAP*

<b>Tipos de pavimentos/capa</b>	<b>Material Reciclado</b>	<b>Observación</b>
<b>HMA convencional</b>	RCA sin tratar	Empeoramiento del impacto en el pelado Disminución en VMA y VFA Aumento de la absorción AV y de Betún
	RCA tratada	Aumento de la rigidez Disminución de la capacidad de absorción Mejora en el rendimiento a baja temperatura.
<b>HMA convencional</b>	RAP	Efecto debilitador en la rigidez/trabajabilidad/durabilidad Temperatura de la mezcla elevada
	RAP con rejuvenecedores	Aumento de la resistencia al agrietamiento/ fatiga y trabajabilidad. Deterioro en el rendimiento de la rutina
<b>WMA</b>	RAP	Mostrar mejor sensibilidad al agua y resistencia similar a la fatiga/enrutamiento
	RAP con desechos adicionales	Impacto positivo en el módulo resiliente y el rendimiento de fatiga
<b>CMA</b>	RCA	Mejora en la resistencia a la humedad UCS, ITS e ITSM

---

<b>Base/Subbase</b>	RCA	Desempeño satisfactorio en términos de módulos elástico y deformación permanente.
---------------------	-----	---

---

**Nota:** HMA: Asfalto de mezcla en caliente, RCA: Agregado de concreto reciclado, VMA: Hueco en agregado mineral, AV: Huecos de aire, RAP: Pavimento de asfalto recuperado, WMA: Mezcla asfáltica semicaliente, UCS: Resistencia a la compresión no confinada, ITS: Resistencia a la tracción indirecta, ITSM: Módulo de rigidez a la tensión indirecta. Tomado de Una revisión sobre la evaluación de la posible utilización de residuos de construcción y demolición en pavimentos de asfalto de mezcla caliente. Gedik, (2020, p. 6)

## **6. CAPITULO IV: DEFINICIÓN DE ALTERNATIVA ADECUADA PARA APLICACIÓN EN VIAS**

Para definir la mejor alternativa, se debe considerar los criterios para cumplir con las propiedades de una mezcla asfáltica de calidad, pero también se debe considerar los beneficios ambientales, es decir, considerar nuevas alternativas que ayuden a disminuir el efecto invernadero. Razón por la cual se toma a consideración la tecnología de mezcla asfáltica semicaliente.

### **6.1. Criterios para definición de alternativas**

Las mezclas asfálticas, como lo expone (Padilla, 2004):

deben cumplir con las propiedades de: estabilidad, durabilidad y resistencia a la fatiga, para que puedan proporcionar una superficie de rodadura segura, confortable y estética. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad, y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. (p. 42)

De igual forma se debe tener en cuenta, que se debe minimizar la mayor cantidad de impactos ambientales, además de una disminución de costos en la producción. Es por este motivo que se toma en cuenta que en la producción de mezcla asfáltica en caliente o la convencional, que es la mas conocida y aplicada por los cumplimientos a requisitos exigidos por INVÍAS, en su capítulo 4 pavimentos asfálticos, (Invías, 2013), es necesario reconocer que esta alternativa es la que mas impactos ambientales tiene, debido a las altas temperaturas ( $>150^{\circ}\text{C}$ ) que utiliza en el secado del material, en tan solo este proceso se genera alto consumo de energía y emisiones de gases y vapores a la atmosfera, por lo que no la convierte en una opción adecuada.

Por lo anterior, se define el aprovechamiento del pavimento asfáltico envejecido como agregado con llénate mineral de ceniza volante de carbón, en una producción de mezcla asfáltica semicaliente.

### **6.1.1. Beneficios Ambientales**

#### ➤ Pavimento Asfáltico Recuperado - Rap como agregado

Al tomar como alternativa la utilización o aprovechamiento del Pavimento Asfáltico recuperado – RAP, disminuye la explotación de agregados vírgenes. Este tipo de pavimento son considerados, pavimentos sostenible, como lo dice (Castro, 2018): “Es un pavimento económico, eficiente, seguro y especialmente respetuoso con el medioambiente. Esto significa, que satisface las necesidades de los usuarios actuales sin comprometer los de las generaciones futuras (p. 44), algunos de los beneficios conocidos son:

- Optimizar el uso de los recursos naturales.
- Reducir el consumo de energía.
- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (limitar la contaminación).
- Mejorar la salud, la seguridad y la prevención de riesgos.
- Garantizar un alto nivel de comodidad y seguridad para el usuario

### **6.2. Mezcla asfáltica semicaliente**

Se entiende como reciclado de firmes, la reutilización de los materiales procedentes de la demolición de las capas de firme que ya han estado en servicio, para la construcción de otras nuevas. Estas mezclas bituminosas retiradas de los firmes envejecidos (denominado como RAP) están formadas por partículas de árido, o aglomeraciones de partículas, envueltas por ligante y tienen un importante valor residual ya que pueden utilizarse de nuevo para la fabricación de mezclas bituminosas. Esta técnica se basa en utilizar betunes convencionales o modificados con aditivos (ceras o tensoactivos) o espumación del betún por ejemplo con zeolitas con el fin de conseguir reducir la temperatura de fabricación de la mezcla entre 120 y 140 °C. Con esta técnica se pueden alcanzar tasas de reciclado ligeramente superiores al reciclado en caliente. (Asfaltia, s. f.).

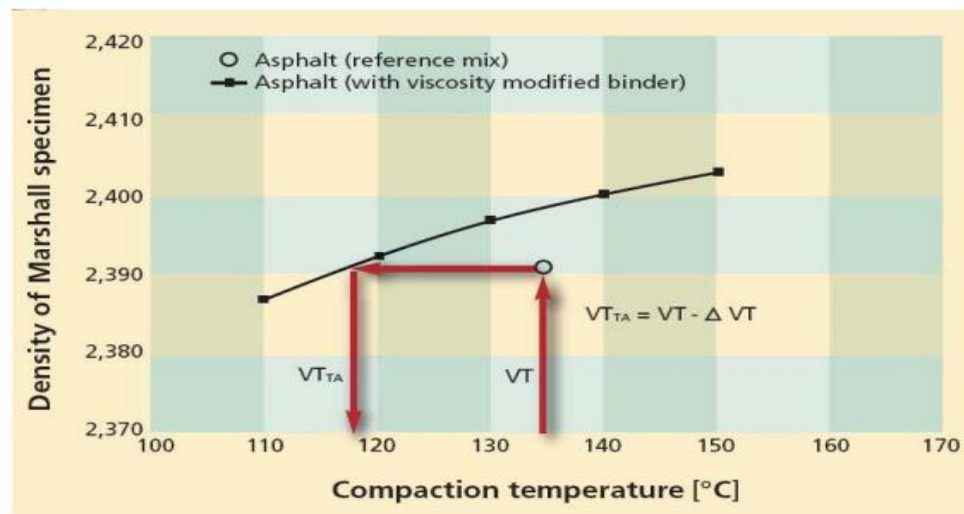
**Figura 8.**  
*Relación de humos entre una mezcla convencional y otra semicaliente*



**Nota:** La figura representa la diferencia en emisiones de una mezcla convencional y una semicaliente. Tomada de monografía estado del arte sobre las mezclas asfálticas semicalientes. Alonso, A. Moll, R. Tejada, (2018, p. 43)

A continuación en la figura 8, se puede visualizar el rango de las diferentes temperaturas de compactación de las mezclas semicalientes, lo que permite determinar, el aditivo más adecuado.

**Figura 9.**  
*Selección de fabricación de mezclas semicalientes*



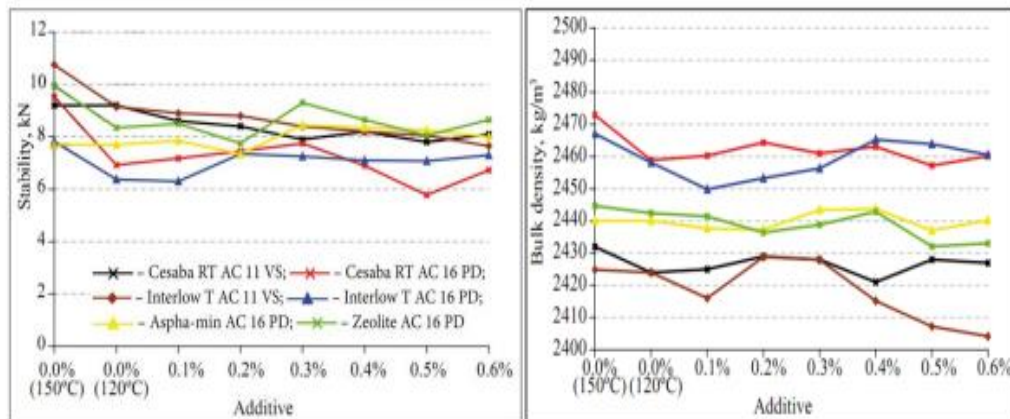
**Nota:** Con esta imagen se permite seleccionar la temperatura adecuada para la mezcla semicaliente. Donde la ecuación representa la composición óptima de la mezcla asfáltica y la densidad en la referencia de la temperatura de acuerdo a los aditivos.

Tomado de monografía estado del arte sobre las mezclas asfálticas semicalientes. Alonso, A. Moll, R. Tejada, (2018, p. 29)

La posibilidad de utilizar las mezclas semicalientes en el reciclado de pavimentos, reduce el costo, por el ahorro en el empleo de áridos. Dada la reducción de la viscosidad del asfalto endurecido en el RAP, es posible el uso de altos porcentajes de RAP, reduciendo además el esfuerzo para el cubrimiento de los áridos y para la compactación del pavimento. (Alonso, A. Moll, R. Tejada, 2018, p.29).

En la figura 9, se observan pocas diferencias entre los resultados de estabilidad y densidad para una mezcla con zeolita sintética (trazado en amarillo) y otra natural (trazado en verde) y similares tendencias entre ellas con el aumento del mineral. (Alonso, A. Moll, R. Tejada, 2018)

**Figura 10.**  
*Resultado comparativo de diferentes mezclas semicalientes*



**Nota:** Imagen izquierda: resultados de la estabilidad. Imagen derecha: resultado de la densidad. Tomado de monografía estado del arte sobre las mezclas asfálticas semicalientes. Alonso, A. Moll, R. Tejada, (2018, p. 17).

### 6.3. Propiedades físicas de la ceniza volante de carbón

El comportamiento de la ceniza volante de carbón permite mejorar la mezcla asfáltica ya que al modificarla, le añade sus propiedades como la define la Tabla 16, a las que normalmente ya tiene los agregados, cuyo caso sería las propiedades físicas y mecánicas definidas a la mezcla asfáltica recuperada.



**Tabla 16.**  
*Propiedades físicas de la ceniza volante de Carbón*

<b>Propiedades</b>	<b>Descripción</b>
<b>Compuesto</b>	Inorganico y vítreo (partículas finas de naturaleza silícea)
<b>Color</b>	Crema a gris oscuro
<b>Tamaño</b>	0,5mm a 0,001 mm
<b>Humedad</b>	Entre 30% y 70%
<b>Peso</b>	Entre 2,2 y 2,8 gr/cm <sup>3</sup>

**Nota:** Compuestos de las partículas finas de naturaleza. Elaboración propia con base en datos de Cogollos, A. Martinez, (2020, p. 80).

“Las cenizas volantes encontradas en Termozipa, Colombia, son clasificadas como materiales no plásticos de gradación delgada y baja cohesión de partículas” (Cogollos, A. Martinez, 2020, p. 80).

Debido a sus propiedades físicas y a la similitud que tiene con el cemento utilizado normalmente, Cogollos, A. Martinez, (2020), menciona que la ceniza volante se emplea principalmente como material llenante o filler en mezclas asfálticas por sus características rígidas y resistentes, ya que soporta fuerzas compresivas de hasta 15 MPa, y es considerada como un sustituto parcial o completo entre el asfalto y el agregado por su relación de cohesión. Al ser considerado como llenante aporta mayor sustitución de cargas minerales. (p. 84)

A continuación los beneficios obtenidos en los resultados según Cogollos, A. Martinez, (2020, p. 84):

- Incremento de la resistencia del 19% para un reemplazo del 20%.
- La deformación permanente disminuyó 10% y 38% para el reemplazo de 20% y 45%
- Rigidez Marshall y velocidad de deformación, adición favorable de ceniza volante de 25% con respecto al peso del llenante mineral.

#### 6.4. Pruebas de laboratorio para la utilización de ceniza volante en la mezcla asfáltica.

A continuación en la tabla 17, se relaciona las pruebas de laboratorio mas comunes que se le realizan a las cenizas volantes de carbón para determinar su uso en la mezcla asfáltica(Cogollos, A. Martinez, 2020):

**Tabla 17.**  
*Pruebas de laboratorio a Cenizas Volantes de Carbón*

<b>PRUEBA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Granulometría de los agregados gruesos y finos</b>	Caracterización del material granular fino
<b>Peso específico y absorción de los agregados finos</b>	Determinación de la absorción y el peso específico aparente y real
<b>Contenido de materia orgánica</b>	Evaluación de impurezas presentes en el material
<b>Ensayo Marshall</b>	Determina la proporción óptima del asfalto, además, evalúa fluencia y estabilidad del material
<b>Resistencia a la tracción indirecta ITS</b>	Caracterización de la mezcla asfáltica para evaluar ITS
<b>Prueba directa uniaxial</b>	Evalúa rigidez de la mezcla asfáltica
<b>Prueba axial de carga repetida</b>	Determina resistencia a la deformación permanente

**Nota:** Descripción de resultados óptimos para utilizar la cenizas volantes en las mezclas. Elaboración propia con base en datos de Cogollos, A. Martinez, (2020, p. 85).

#### 6.5. La ceniza volante de carbón en la mezcla asfáltica

La cenizas volante de ceniza de carbón se han utilizado en la base y sub-base de la construcción de carreteras, pero en la investigación realizada por Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. ), evaluando el comportamiento de este residuo en la mezcla asfáltica. Para llevar a cabo esta investigación siguieron la siguiente metodología:

- Caracterización de los materiales y determinación del porcentaje óptimo de asfalto: el material conocido como grava, tiene un tamaño máximo de 2,54 cm., y arena con un porcentaje de trituración de 70%.

- Caracterización granular: el material granular se caracterizó por medio de los ensayos de laboratorio, los cuales se referencian en la tabla 18.

**Tabla 18.**  
**Resultados de la caracterización de los materiales pétreos**

Ensayo	Norma	Resultado
<b>Limite Líquido</b>	I.N.V.E - 125	N.L
<b>Limite de plasticidad</b>	I.N.V.E - 126	N.P
<b>Equivalente de arena</b>	ASTM D 2419	55.8%
<b>Resistencia al desgaste</b>	ASTM C 131	16.0%
<b>Peso específico aparente agregado fino</b>	ASTM C 128	3.070. GR/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción agregado fino</b>	ASTM C 128	3.003%
<b>Peso específico aparente agregado grueso</b>	ASTM C 127	2.641 gr/cm <sup>3</sup>
<b>Absorción agregado grueso</b>	ASTM C 127	0.212%

**Nota:** Normas Colombianas, dadas como requerimientos y parámetros de INVIA, para la obtención de calidad en los materiales utilizados en la construcción de vías. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 6)

- Caracterización del asfalto: el asfalto empleado en la investigación posee las características que se relacionan en la tabla 19

**Tabla 19.**  
**Resultados de la caracterización del asfalto**

Ensayo	Norma	Resultado
<b>Punto de llama</b>	ASTM C3143-98	293.0°C
<b>Punto de ignición</b>	ASTM D3143-98	240.50°C
<b>Punto de ablandamiento</b>	ASTM D36-95	47.50°C
<b>Viscosidad</b>	ASTM D 2170-95	1500
<b>Penetración</b>	ASTM D 5-97	67.5
<b>Peso específico del asfalto sólido</b>	ASTM D70	0.992 (gr/cm <sup>3</sup> )

**Nota:** Descripción de especificaciones de norma, con resultados obtenidos. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 6).

- Caracterización de la ceniza volante: de acuerdo con la investigación realizada por Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018), donde tomaron las generadas por la planta eléctrica Termopaipa iv, ubicada al nororiente de Colombia, ya que la caracterización de la ceniza varía según la fuente, es por eso que se realiza teniendo en cuenta sus características físicas y químicas, dadas las especificaciones de la norma ASTM C-618, por lo que se tamizó la ceniza en el tamiz número 200, para que cumpliera la condición del tamaño para llenante mineral, en la tabla 20, se observa los resultados obtenidos.

**Tabla 20.**

***Caracterización química de la ceniza volante***

Porcentaje de óxidos											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SrO	MnO
61.3	23.5	4.2	1.2	1.0	0.73	0.53	1.27	0.31	0.68	0.2	0.02
Inquemados= 7,6%											

**Nota:** SiO<sub>2</sub>: Óxido de silicio, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Óxido de aluminio, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Óxido de hierro, TiO<sub>2</sub>: Dióxido de titanio, CaO: Óxido de calcio, MgO: Óxido de magnesio, Na<sub>2</sub>O: Monóxido de sodio, K<sub>2</sub>O: óxido de potasio, SO<sub>3</sub>: Trióxido de azufre, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: Pentóxido de difósforo, SrO: Óxido de estroncio, MnO: Óxido de manganeso. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 7).

Resultado de caracterización física realizada por Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018): “peso unitario de 2,162 g/cm<sup>3</sup>, superficie específica de 6381 cm<sup>2</sup>/g para tamiz número 200” (p. 7)

- Caracterización óptimo de asfalto: se determinó por medio del método Marshall (ASTM D 1559), con diez probetas (compacidad de 50 y 75 golpes), dos probetas para cada porcentaje de asfalto (4.5%, 5%, 5.5%, 6% y 6.5%). Las características evaluadas se muestran en la Tabla 21.

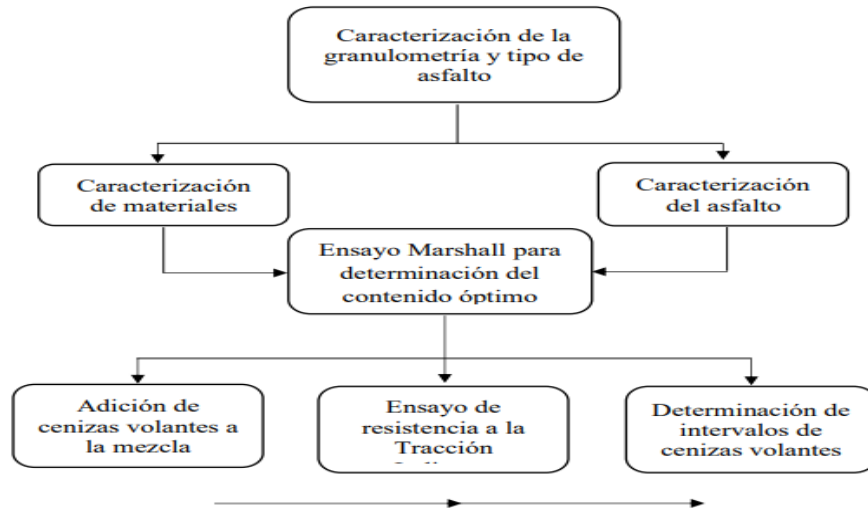
**Tabla 21.**  
***Diseño del ensayo Marshall***

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>	<b>Resultado</b>	
Porcentaje de asfalto	ASTM D 1559	5%	
Densidad	ASTM D 1559	2.358 gr/cm <sup>3</sup>	
Estabilidad	ASTM D 1559	2867 Lbf	1301 Kg
Fluencia (0,01 pulgadas)	ASTM D 1559	11	2.8 mm

**Nota:** Descripción de requerimientos de norma y resultados obtenidos. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 8).

- En la preparación de probetas Marshall (incidencia mecánica) Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018): Se preparó dieciséis probetas para el ensayo Marshall, una probeta (con capacidad de 50 y 75 golpes) para cada reemplazo de ceniza volante en el llenante mineral (0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90% y 100%); a partir de estas probetas se determinó la estabilidad, densidad y flujo para cada modificación (p. 8).
  
- Elaboración de probeta de ahuellamiento (incidencia dinámica): las probetas de ahuellamiento se construyeron con la densidad obtenida en los ensayos Marshall para cada porcentaje de reemplazo de llenante mineral por ceniza volante. Se procedió a realizar la construcción de probetas de ahuellamiento a capacidad de 50 y 75 golpes, con reemplazo de llenante mineral por ceniza volante en porcentaje de 0 a 100% de adición en intervalos de 15%. Los ensayos de ahuellamiento se realizaron teniendo en cuenta la norma INVI E – 756, a temperaturas constantes de 40°C, esfuerzo de 0,9 MPa y un total de 5.000 pasadas en 120 minutos. (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018, p. 8).

**Figura 11.**  
**Procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica**



**Nota:** Diagrama del procedimiento para incorporación de ceniza volante en la mezcla asfáltica. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Cogollos, A. Martinez, (2020, p. 86)

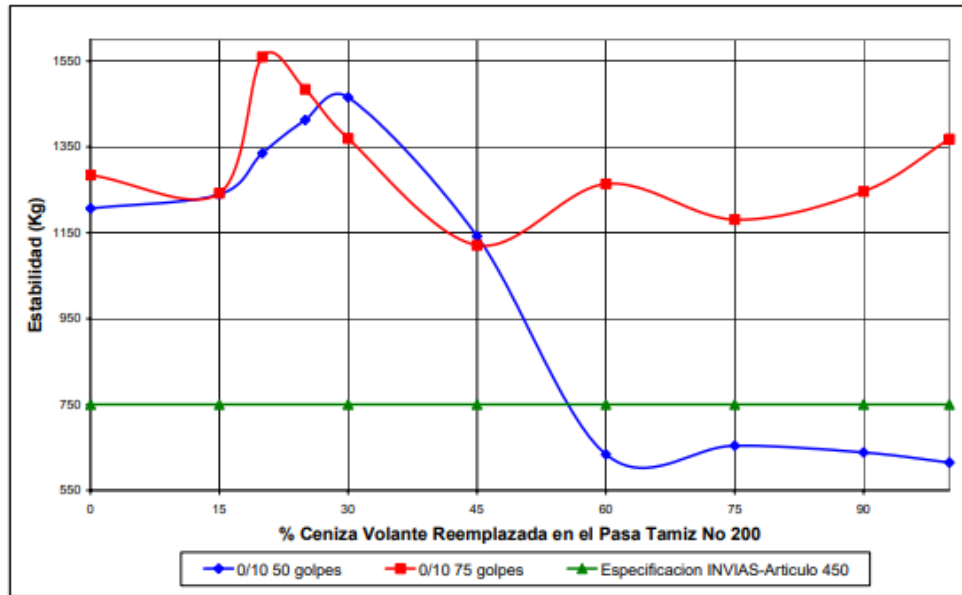
## 6.6. Análisis de resultados del caso estudio para adición de cenizas volantes a la mezcla asfáltica.

En el análisis de resultados obtenidos en la investigación realizada por Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018), mediante el método Marshall, se determinó que el comportamiento de la ceniza volante de carbón en la mezcla asfáltica es positivo, cuyo reemplazo óptimo se encuentra en el rango de 15% a 30% (p. 9). A continuación se relaciona los resultados obtenidos en la investigación:

### 6.6.1. Ensayo Marshall

Se observó un mejor comportamiento de la ceniza volante en los porcentajes de reemplazo por llenante mienral de 20% y 25%. Y se presentó descenso de la estabilidad a partir del porcentaje de 45% en el momento de reemplazo del material. (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018)

**Figura 12.**  
*Variación a la estabilidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200*

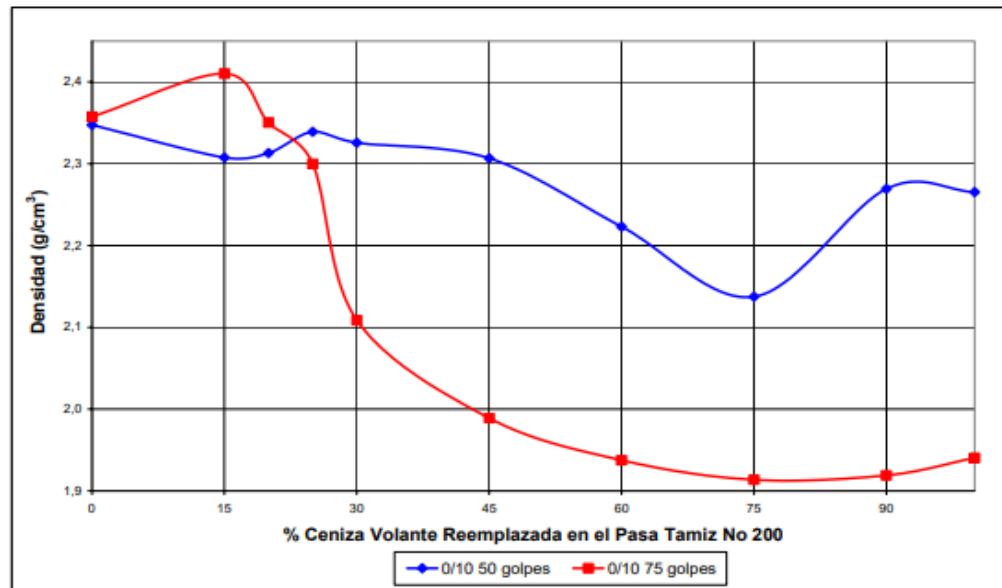


**Nota:** Resultados obtenidos en la evaluación de estabilidad al reemplazar el llénate mineral por ceniza volante. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 10).

Análisis de la grafica: Con respecto a la estabilidad de la mezcla asfáltica se observa que desde el porcentaje de ceniza de 25%, la densidad se reduce gradualmente.

**Figura 13.**

*Variación de la densidad con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200*



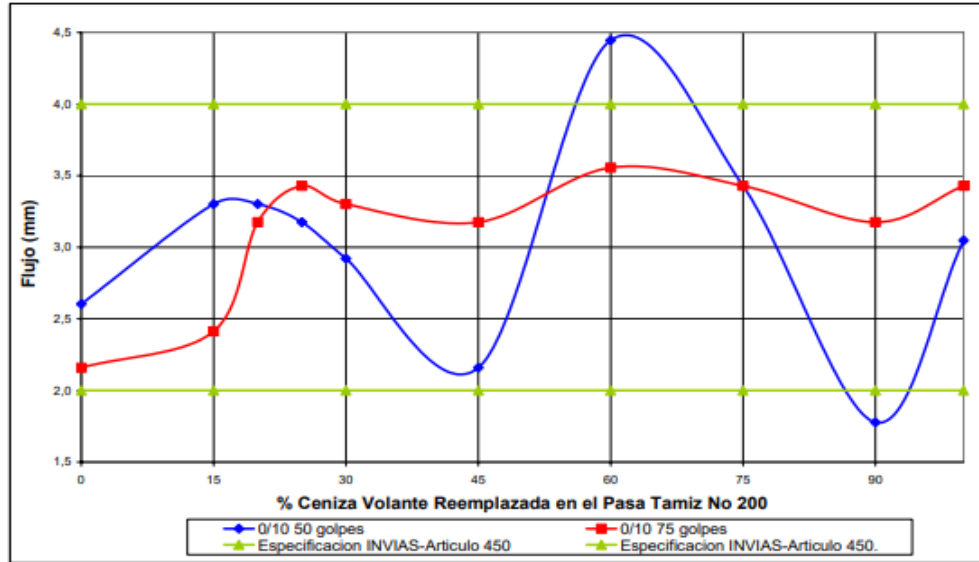
**Nota:** Resultados obtenidos en la evaluación de la densidad al reemplazar el llénate mineral por ceniza volante. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 11).

Análisis de la grafica: Con respecto al análisis de flujo en la mezcla asfáltica, Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018), concluyeron que el reemplazo de la ceniza mantiene las especificaciones de Invías, excepto cuando es mayor al 60%, ya que no hay comportamiento claro de fluencia en la mezcla.



**Figura 14.**

**Variación del flujo con respecto al reemplazo de ceniza en el tamiz número 200**



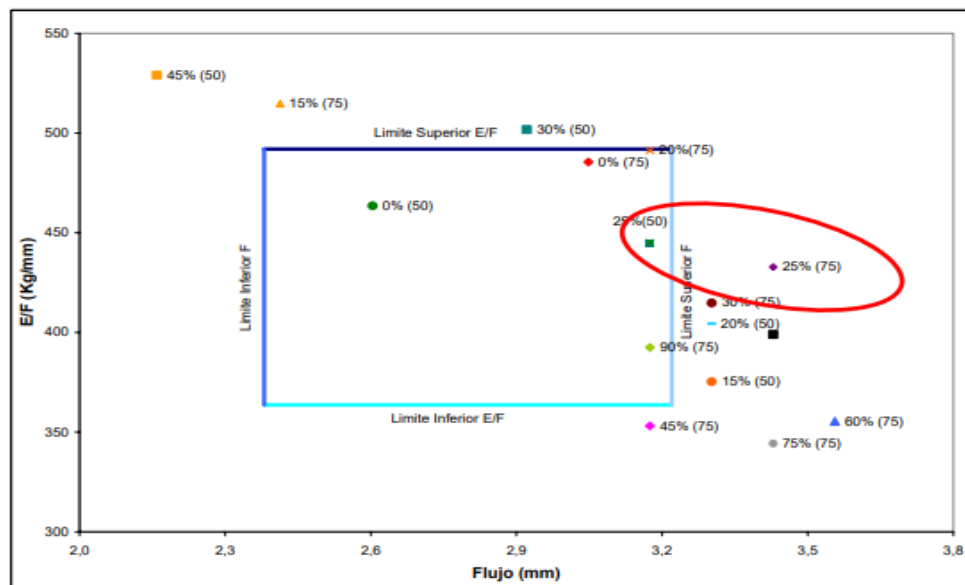
**Nota:** Resultados obtenidos en la evaluación de la variación del flujo al reemplazar el llénate mineral por ceniza volante. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 12).

Análisis de la gráfica: Se concluye que el comportamiento es positivo en cuanto a sus propiedades mecánicas, en los porcentajes de reemplazo de llenante mineral por cenizas volantes de 20% y 25%. (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018, p. 12).

### 6.6.2. Relación Estabilidad- Flujo

“La relación estabilidad-flujo representa el grado de fragilidad o de ductilidad de una mezcla asfáltica, en donde se puede presentar fisuración temprana o ahuellamiento prematuro respectivamente” (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018, p. 12). A continuación relación estabilidad-flujo en la figura

**Figura 15.**  
*Variación de la relación estabilidad - flujo*



**Nota:** Análisis de resultado positivo para utilización de ceniza volante en mezcla. Tomado de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volantes. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 13).

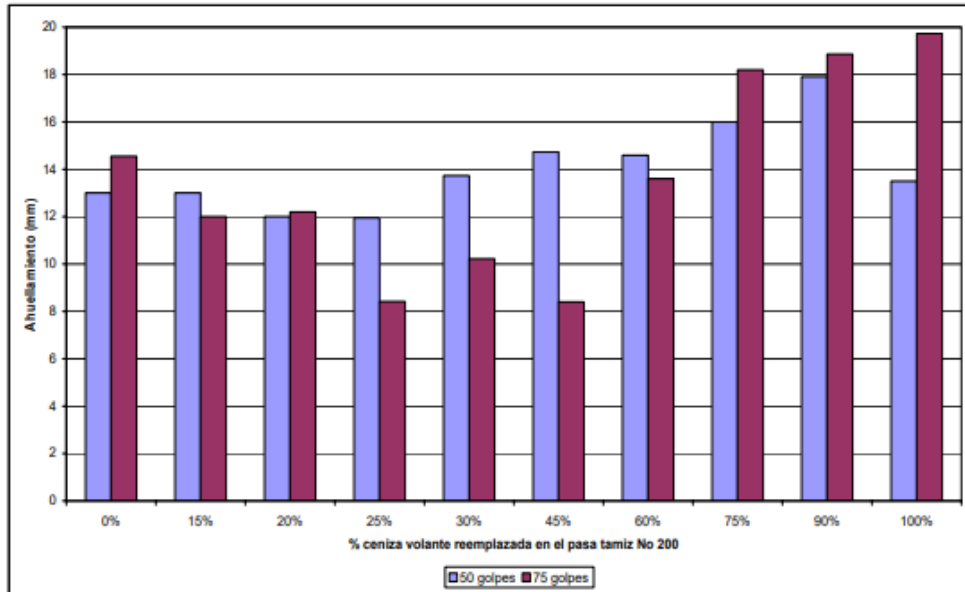
Análisis de la gráfico: Se observa que el reemplazo de llénate mineral por ceniza volante en un porcentaje de 25% es favorable, debido a que mejora las propiedades de la relación estabilidad-flujo de la mezcla original y presenta un comportamiento semejante debido al grado de compactación; el flujo obtenido de esta muestra en 75 golpes está por fuera del límite superior del flujo con respecto al valor obtenido en el ensayo Marshall óptimo, pero no excede el flujo máximo de 4mm propuesto en las especificaciones de Invías. (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018, p. 13).

### 6.6.3. Ensayo de deformación plástica

Mediante este Ensayo Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018), define el ahuellamiento admisible en la mezcla asfáltica que se presentan después de acciones de repetidas cargas o por problemas de ductibilidad (p.14). A continuación las figuras 15 y 16, muestran el resultado de los

ensayos para el ahuellamiento y la velocidad de deformación después de ser reemplazados el llenante mineral por la ceniza volante de carbón.

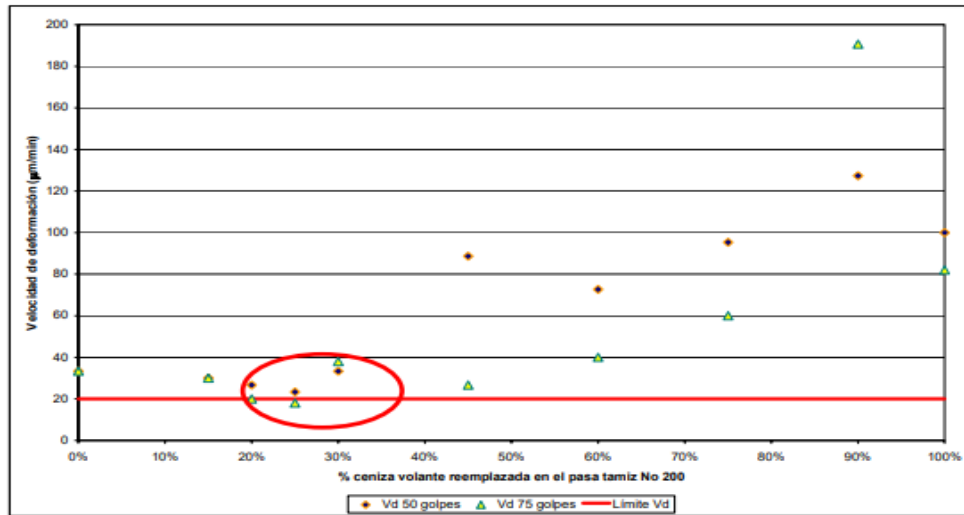
**Figura 16.**  
*Ahuellamiento con respecto al reemplazo de ceniza volante*



**Nota:** Relación de ahuellamiento con el % de cenizo volante que es reemplazada en el tamiz número 200. Tomdo de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volante. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 14).

**Figura 17.**

**Velocidad de deformación medida en cada porcentaje de reemplazo de ceniza volant**



**Nota:** Relación de velocidad de deformación con respecto al % de ceniza volante reemplazada en el tamiz número 200. Tomdo de Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas Volante. Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, (2018, p. 15).

Análisis de los gráficos: en la figura 15 y 16, deducen (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018) que el porcentaje de ceniza volante que posee el mejor comportamiento es aquel con el reemplazo de llenante mineral en 20 y 25%, debido a que está por debajo del rango de 20  $\mu\text{m}/\text{min}$ , valor estíulado por una mezcla que tenga una temperatura de servicio menor a 24°C.

Al agregar la ceniza volante de carbón en la mezcla asfáltica recuperada y comprobar mediante el ensayo Marshall un resultado positivo y favorable para su aplicación en vías, permite, abrir un nuevo camino hacia el reciclaje y sus diferentes usos en la construcción y mantenimiento de las diferentes vías del país, ahora bien, al adoptar esta metodología que va desde la caracterización de agregados pétreos como la caracterización y se tienen en cuenta las propiedades de las cenizas volantes, permite brindar confianza, seguridad y confort en el tránsito por las diferentes carreteras, y esto se logra cuando se cumple unas mínimas especificaciones con las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas, como son la estabilidad, durabilidad, flexibilidad, resistencia a la fatiga, resistencia al cambio de temperaturas, resistencia a la humedad, resistencia al deslizamiento. Por lo que la investigación realizada concluye que al utilizar las cenizas

volante como llenante mineral en una mezcla asfáltica semicaliente, fortalece la mezcla y permite que se presente estabilidad cuando el porcentaje de ceniza es del 25%, por lo que reduce la densidad, es decir, hay mayor resistencia a la fatiga, flexibilidad y durabilidad de la mezcla.

## 7. CAPITULO V: RECOMENDACIONES

Para incorporar las cenizas volantes de carbón en la mezcla asfáltica, tener en cuenta:

- La caracterización del material: el cual refiere a la granulometría de los agregados tanto gruesos como finos.
- El determinante de absorción y peso aparente y real: es decir peso de los agregados finos.
- Estimación de impurezas en el material; refiere a la presencia de materia orgánica.
- Especificaciones en el ensayo Marshall; es decir determinar la proporción optima del asfalto.
- Resistencia a la tracción indirecta ITS: Caracterización de la mezcla asfáltica para evaluar ITS. (Cogollos, A. Martinez, 2020, p. 86)
- Prueba directa uniaxial: Evalúa rigidez de la mezcla asfáltica. (Cogollos, A. Martinez, 2020, p. 87)
- Prueba axial de carga repetida: Determina resistencia a la deformación permanente. (Cogollos, A. Martinez, 2020, p. 87)

Por otro lado, es importante tener en cuenta que el comportamiento de las cenizas volantes de carbón en la mezcla asfáltica depende del tipo de carbón procesado, el tipo de caldera y la pulverización obtenida de la combustión.

## CONCLUSIONES.

Al combinar alternativas que benefician al medio ambiente y que no disminuyen nuestra calidad de vida, en este caso, que brindan comodidad y versatilidad en el desplazamiento en las vías, se convierten en una opción para mejorar procesos de construcción sin que se siga generando mayores impactos ambientales.

Al utilizar el reciclaje de pavimentos asfálticos- RAP, como alternativa para disminuir consumo de agregados en la mezcla asfáltica, se obtienen las siguientes ventajas (Castro, 2017): Reducción de almacenamiento de materiales en botaderos y la utilización racional de recursos naturales, ahorro significativo en el transporte de material de agregado naturales, disminución de la explotación de canteras, disminución de la emisión de gases a la atmosfera, reducción del volumen de residuos sólidos, ofrece ahorros aproximados hasta 35% en costos y 50% en tiempo, cumplimiento de requisitos de las propiedades dinámicas y mecánicas de la mezcla de diseño.

Es necesario mencionar que el consumo de energía y temperatura disminuye, al reducir de 150°C a menos de 100°C, lo que representa casi el 50% en consumo, al utilizar esta otra alternativa, además de lo mencionado anteriormente, se disminuye la emisión de humos a la atmosfera.

Al incluir a la mezcla asfáltica, las cenizas volantes de carbón, dice Cogollos, A. Martinez, (2020), que se aumenta la resistencia a la deformación permanente, debido a la estabilidad del asfalto, se presenta también resistencia a la humedad y composición volumétrica, al ser favorable la estabilidad y flujo en el mezclado, lo que garantiza la adición de residuos de cenizas volantes.

Desde el punto de vista de gestión, el aumento en la resistencia mecánica y dinámica en la mezcla asfáltica determina que el periodo de intervención de las vías construidas con este material de desecho es más amplio con lo cual se convierte en una alternativa económica viable en el plan de mantenimiento y rehabilitación de vías en diferentes regiones del país. (Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, 2018)

Este tipo de mezcla es apta para utilizar en vías de media y alta circulación vehicular.

Por otra parte en esta revisión bibliográfica para definir las alternativas amigables con el medio ambiente, se encontró que la combinación del pavimento asfáltico recuperado con adición de varios residuos a la vez en la mezcla asfáltica podrían ser una opción para reemplazar aquellos materiales de origen natural, pero no se encontró investigaciones realizadas y dirigidas a esta combinación.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFIA

- Alonso, A. Moll, R. Tejada, E. (2018). Monografía Estado del arte sobre las mezclas asfálticas semicalientes. *ResearchGate, February*.
- Androjić, I., Alduk, Z. D., Dimter, S., & Rukavina, T. (2020). Analysis of impact of aggregate moisture content on energy demand during the production of hot mix asphalt (HMA). *Journal of Cleaner Production, 244*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118868>
- Archila, A., & Aparicio, M. (2018). *Impactos ambientales derivados del proceso de pavimentación de vías de transporte en Colombia*. <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/18318/5/1098694697.pdf>
- Argos. (2013). Esfuerzos Térmicos En Pavimentos De Concreto. *Blog 360° en concreto*, 1-5. <http://blog.360gradosenconcreto.com/esfuerzos-termicos-en-pavimentos-de-concreto/>
- Asfaltia. (s. f.). *Reciclados - Asfaltia*. Asfaltica. Recuperado 19 de diciembre de 2020, de <https://www.asfaltia.com/actividad/productos/reciclados/>
- Botasso, H. Cuattrocchio, A. Rebollo, O. Soengas, C. (2008). *Reciclado de pavimentos asfálticos en frío. Una forma de ... - LEMaC*. LEmac. <https://www.yumpu.com/es/document/read/52260633/reciclado-de-pavimentos-asfalticos-en-frio-una-forma-de-lemac>
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista politecnica*, 36(3), 6.
- Castro, A. (2017). *Análisis de los métodos de reciclaje en caliente y frío aplicados a concreto asfáltico, para la utilización en carpeta de rodadura en vías terciarias entre los años 2011-2017 en Colombia Analysis of hot and cold recycling methods applied to asphalt concr.* 1-20.
- Castro, A. (2018). *INVESTIGACIÓN SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRÍO 100% RECICLADAS CON ADICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS*.

- Catillo, E. Acevedo, L. Orduz, J. (2000). Perfil Tecnológico Ambiental De La Industria De Mezclas Asfálticas En Colombia. En *Revista Ion* (Vol. 16, Número 1, p. 10).
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2020). Utilización de materiales de desecho sólidos como cargas alternativas en mezclas de asfalto: una revisión. *Construction and Building Materials*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271>
- Cogollos, A. Martinez, M. (2020). *Zonificación y recomendaciones de intervención a tramo vial deteriorado aplicado* (Vol. 2507, Número 1).
- Duque, A. Forero, L. (2017). *Análisis de la Contaminación Ambiental y Efectos Sobre la Salud Pública por el Uso de Pavimentos en Áreas Urbanas: una Revisión Bibliográfica Mundial*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5055>
- ESR. (2016). *Características de las mezclas asfálticas en frío y caliente*. Vise. <https://blog.vise.com.mx/caracteristicas-de-las-mezclas-asfalticas-en-frio-y-caliente>
- Gedik, A. (2020). Una revisión sobre la evaluación de la posible utilización de residuos de construcción y demolición en pavimentos de asfalto de mezcla caliente. *ELSEVIER*, 11. <https://news.un.org/es/story/2019/10/1464591>
- Gutierrez, C. (2004). *Plantas asfálticas - Monografias.com*. Ingeniería. <https://www.monografias.com/trabajos93/plantas-asfalticas/plantas-asfalticas.shtml>
- Hernández, L. Jiménez, K. Domínguez, V & Adams, R. (2017). Mezclas Asfálticas: Una Alternativa Para El Tratamiento De Residuos. *Kuxulkab'*, 23(46), 46. <http://www.revistas.ujat.mx/index.php/kuxulkab/article/view/2555/1963>
- Hernandez, J., Sanchez, V., Castillo, I., Damián, S., & Telles, R. (2001). Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies de rodamiento: I. pavimentos flexibles. *Publicación Técnica No. 163*, 163, 167. <http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt163.pdf>
- IDEAM. (2014). *CALIDAD DEL AIRE - IDEAM*. <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- INCONTEC. (1993). *NTC 3493 Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas*

*naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland* (p. 10).

Invías. (2013). Capítulo 4 - Pavimentos Asfálticos. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras*, 1-440.

Leone, D., Giordani, C. (2010). Pavimento. En *Universidad Tecnológica Nacional* (Vol. 1, Número encofrado, pp. 1-6).  
[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1\\_anio/civil1/files/IC-Pavimentos.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC-Pavimentos.pdf)

López, M. Pérez, A. Garnica, P. (2014). Estado Del Arte Sobre El Uso De Residuos y Sub-Productos Industriales En La Construcción De Carreteras. *Publicación tecnica*, 394.

Méndez, A. (2015). *Uso De Pavimento Asfáltico Reciclado ( Rap ) En Vías Colombianas*.

Ministerio De Ambiente, V. Y. D. T. (2008). Resolucion número 909 De 2008. *Resolucion 909 De 2008, 909*, 36. [http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resolución 909 de 2008 - Normas y estandares de emisión Fuentes fijas.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/f0-Resolución%20909%20de%202008%20-%20Normas%20y%20estandares%20de%20emisión%20Fuentes%20fijas.pdf)

Ministerio De Ambiente, V. Y. D. T. (2010). Resolución número 610 (24 de marzo de 2010). *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, 610, 1-8.  
<https://doi.org/10.1016/j.ingen.2010.03.001>

Pacheco, C. Fuentes, L. Sánchez, E. Rondón, H. (2017). Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 35(10), 23.  
<http://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/viewArticle/1584/4490>

Padilla, A. (2004). CAPÍTULO 3. Mezclas Asfálticas. En *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. (p. 26).

Padilla, Alejandro. (2004). Capitulo 2 Materiales Básicos. En *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. (p. 35). <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-13.pdf?sequence=13&isAllowed=y>

- Restrepo, H. Stephens, S. (2015). 3.-*Estudio de las Ventajas Económicas del Reciclaje en frío in situ de pavimentos asfálticos*. 86.
- Reyes, O. Troncoso, J. Camacho, J. (2018). Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. En *e-conversion - Proposal for a Cluster of Excellence*.
- Rivera, C. (2007). *Análisis de impacto ambiental por la inadecuada disposición d eresiduos de la construcción y demolición en el Valle de México y propuesta de solución*.
- Segura, A. (2016). Estudio del Comportamiento físico y mecánico de mezclas asfálticas; con materiales reutilizables en la construcción como escoria de acero. En *Tesis* (Vol. 4, Número 1).