



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE
OBTENCIÓN, ALMACENAMIENTO Y USO DEL
MATERIAL DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
RECICLADO EN LAS DIFERENTES OBRAS VIALES**

Autor

Ronald Juseth Pastás Morales

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental

Medellín, Colombia

2021



ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE OBTENCIÓN, ALMACENAMIENTO
Y USO DEL MATERIAL DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO EN LAS
DIFERENTES OBRAS VIALES

Ronald Juseth Pastás Morales

Trabajo final de práctica presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Civil

Asesores (a):

Roberto José Marín Sánchez

Ingeniero civil

Ruperto Antonio Murillo Salazar

Ingeniero mecánico

Universidad de Antioquia
Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental
Medellín, Colombia

2021

Contenido

Resumen	4
Introducción	4
1. Objetivos	6
1.1. Objetivo general	6
1.2. Objetivos específicos	6
2. Marco Teórico	7
3. Metodología	11
3.1. Generalidades, estudio y contextualización sobre el pavimento asfáltico.....	11
3.2. Revisión bibliográfica acerca del pavimento asfáltico reciclado.	12
3.3. Análisis de información.....	12
4. Desarrollo estudio y análisis	12
4.1. CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO	12
4.2. FORMAS DE OBTENCIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO	15
4.2.1. Escarificación del pavimento asfáltico	15
4.2.2. Fresado del pavimento asfáltico.....	17
4.3. ACOPIO DEL MATERIAL.....	19
4.4. MÉTODOS DE RECICLAJE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO	20
4.4.1. Reciclado en planta en caliente o frío	20
4.4.2. Reciclado in-situ en frío.....	21
4.4.3. Reciclado in-situ en caliente	21
4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL	23
4.6. USOS	25
4.6.1. Agregado para base.....	25
4.6.2. Agregado para bases estabilizadas.....	25
4.6.3. Material de relleno	26
4.6.4. Adoquines de RAP.....	26
4.6.5. Mezcla asfáltica	26
5. Conclusiones	27
6. Referencias bibliográficas	28

Resumen

Este trabajo se hace con el fin de estudiar y analizar los procesos de obtención y reciclaje del pavimento asfáltico, así como su impacto en el medio ambiente y los costos de ejecución. Se espera realizar un estudio y análisis de información y datos recopilados de la literatura para entender todos los procesos de obtención, acopio y reutilización del material.

Primeramente, se presenta un estudio del pavimento asfáltico en general con el cual se espera contextualizar sobre la temática de los pavimentos asfálticos, seguido de una introducción a los métodos y formas de obtención del pavimento asfáltico que bien puede estar deteriorado o no cumplió con los requisitos de calidad exigidos o que ya haya cumplido su ciclo de vida.

Se estudiará y analizará lo referente al acopio de este tipo de materiales, el impacto ambiental y como se debe manejar para su posterior reutilización. Además, se ahondará en los métodos y tipos de usos que se le pueden dar al pavimento asfáltico reciclado y concluir con los datos más relevantes, las ventajas y desventajas que se obtienen en todo el proceso de trabajo con este tipo de materiales y dar un entendimiento general sobre esta temática tan importante en el mundo de la ingeniería civil.

Introducción

La práctica del reciclaje del pavimento asfáltico tuvo inicio desde los años 70 a partir de la crisis del petróleo en 1973 (Méndez, 2015) y desde entonces esta práctica ha experimentado una mayor acogida y mejoría en cuanto a las técnicas de obtención, reciclaje y reutilización del pavimento asfáltico reciclado (RAP) generando beneficios técnicos, ambientales y económicos al disminuir las cantidades de desechos que estos generan y usarlo nuevamente en la conformación de pavimentos asfálticos (Ibarra, 2003). Existen diferentes procesos para la obtención del RAP los cuales pueden ser mediante escarificación de las superficies del pavimento asfáltico, el cual se basa en el uso de una herramienta escarificadora la cual tritura y desprende el material mediante el avance paralelo de la máquina hacia el pavimento (Antillón, 2019), aunque esta técnica cada vez es menos usada debido a que no permite la reutilización de material en sitio y se precisa del traslado del material a una planta de

tratamiento donde se pueda triturar y tratar el material para su posterior colocación con el método de estabilización que se haya elegido para brindar un buen desempeño del pavimento.

Por otra parte existe el método de la máquina fresadora que por medio de un tambor fresador va desprendiendo y triturando el pavimento mientras avanza de manera perpendicular al pavimento (Antillón, 2019), esta técnica es mucho más eficiente en cuanto a la calidad de ejecución de los trabajos debido a la precisión en los acabados de los trabajos y además permite la reutilización del material de manera inmediata utilizando maquinaria en línea que se encarga de procesar y colocar el material según el método de aplicación que se desee utilizar ya sea reciclaje en frío o caliente.

El material obtenido del proceso de fresado o escarificación, también puede ser trasladado a plantas de acopio donde se puede almacenar por ciertos tiempos si no es prescindible su aplicación inmediata. Una vez se requiera la reutilización de este material se procede a tratarlo ya sea en frío o caliente, mediante la aplicación de agentes rejuvenecedores, emulsión y material virgen que permita obtener las características adecuadas de la nueva mezcla asfáltica para su colocación (Miranda & Aguilar 2019).

Los centros de acopio deben contar con las debidas licencias ambientales para su almacenamiento y además deben tenerse los cuidados pertinentes para almacenar el material como la clasificación de este, contar con el espacio suficiente, colocarlo sobre superficies con buen drenaje de aguas, entre otros (Leiva & Vargas 2017), ya que de no ser así este puede perder sus propiedades mecánicas, y por ende no ser adecuado para todo tipo de capas las cuales entre más superficiales sean como la capa de rodadura y la base, deben contar con una mayor calidad, ya que estarán recibiendo las cargas de manera directa, y por el contrario si el uso del material tendrá como destino capas más profundas de pavimento como la sub-base y afirmado, no requiere de mayores características, ya que las cargas son disipadas a lo largo de las capas superiores (Oropeza, 2019).

Independientemente del uso que se le vaya a dar al material se debe tener en cuenta los diferentes estudios técnicos de laboratorios y de los porcentajes que se puedan reutilizar en cada una de las diferentes capas.

Las nuevas mezclas estarán formadas por material granular virgen, asfalto y el material fresado en las cantidades que se haya diseñado la mezcla.

Por medio del presente trabajo se realizó el estudio de esta temática la cual desempeñe como practicante de la unidad de maquinaria y equipo de la Alcaldía de Medellín, al estar a cargo de una central de acopio de material fresado donde se buscó determinar las diferentes características y aplicaciones de este material, el cual se genera en grandes cantidades en el municipio de Medellín y con el cual se suplen grandes demandas en cuanto a mejorías viales y además se realizan donaciones del material a municipios vecinos que lo requieren por medio de un proceso de enajenación de bienes. Se presentará un estudio de todos los procesos que conlleva la reutilización de este material, empezando por la conformación del pavimento asfáltico, los diferentes procesos de reciclaje del material, su acopio y finalmente los métodos y técnicas para la reutilización del material reciclado teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que este trae consigo.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

- Analizar el proceso de obtención, acopio, y reutilización del pavimento asfáltico reciclado.

1.2. Objetivos específicos

- Analizar los procesos de reciclaje para la conformación de pavimentos asfálticos reciclados.
- Analizar las propiedades del pavimento asfáltico reciclado usado para base, sub-base y capa de rodadura en vías terciarias.
- Analizar las ventajas y/o desventajas ambientales que causa la reutilización y almacenamiento del pavimento asfáltico reciclado.
- Analizar las ventajas y desventajas de los diferentes métodos utilizados para la reutilización del pavimento asfáltico reciclado.

2. Marco Teórico

En este aparte se presentarán las definiciones de los conceptos relevantes a la temática del reciclado del pavimento asfáltico con el fin de generar un sustento base sobre los conceptos y de los cuales se profundizará a lo largo del trabajo de grado, con el fin de facilitar la comprensión de la temática a tratar. A continuación, se presentan conceptos básicos sobre el reciclado de pavimento asfáltico.

Pavimento asfáltico

El pavimento asfáltico es un pavimento de tipo flexible el cual usa como aglomerante el asfalto o bitumen. Está conformado por una capa superficial de agregados minerales ligados por medio del asfalto, y por una o varias capas que sirven de soporte al pavimento llamadas base y sub-base. La última capa es la carpeta asfáltica o superficie de rodamiento la cual puede variar entre espesores de 25 mm hasta 75 mm (Valenzuela, 2003).

Este tipo de pavimento se caracteriza por tener menores tiempos de ejecución y por ser más económicos, aunque su tiempo de vida útil es más corto que las de un pavimento rígido.

Una descripción actual sobre el pavimento, es que es una estructura que podemos encontrar en carreteras, aeropuertos, calles, vecindarios, centros comerciales, entre otros. Que están conformados por una estructura de múltiples capas con espesores finitos que se pueden deformar, deflectar y desarrollan esfuerzos, apoyados sobre un área que se define como elástica e infinita, la cual recibe el nombre de superficie de fundación (Remond & Hebert 2017).

Asfalto

El asfalto es un material bituminoso de color oscuro el cual sirve de aglomerante para los materiales que componen el pavimento asfáltico, se puede encontrar en depósitos naturales, aunque en su mayoría es derivado del petróleo.

Los asfaltos derivados del petróleo son producidos ya sea por destilación por vapor o por aire. De la destilación por vapor se obtiene un asfalto de alta calidad para pavimentos,

mientras que el asfalto obtenido de la destilación por aire tiene una menor aplicación en las obras de pavimentación (Valenzuela, 2003).

El asfalto posee características de impermeabilidad que se transfieren a la estructura de pavimento evitando la penetración del agua proveniente de las lluvias; adherencia y cohesión que brinda a la estructura del pavimento una buena unión y fricción de los agregados que permiten soportar las cargas y fatiga producidas por el tráfico vehicular las cuales le permiten soportar esfuerzos y fluir con la aplicación de cargas permanentes. (Tirado, 2019).

Mezcla asfáltica

Esta carpeta está conformada principalmente por asfalto y agregados pétreos en proporciones establecidas según los estudios de laboratorio para las condiciones de la vía que se requieran, obteniendo así las características físicas de la mezcla que se verá reflejado en el desempeño de la vía a lo largo de su vida útil como carpeta de rodadura o estructural del pavimento (Sánchez, 2009).

Las mezclas asfálticas están conformadas por casi un 90 % de gravas y arenas, 5% de finos y un 5% de emulsión asfáltica. Los cuales trabajan en conjunto para brindar la capacidad portante al pavimento por lo que, si alguno de estos componentes falla, toda la estructura en conjunto se debilitara. Dos de los elementos más importantes en una mezcla asfáltica son el ligante de asfalto y los finos los cuales influyen tanto en la calidad como en el costo del pavimento (Tirado, 2019).

Base y Sub-base

La base y la sub-base son elementos estructurales del pavimento flexible y en ocasiones también se usan en el pavimento rígido. La función de estas capas es transferir las cargas de los vehículos que se generan sobre la superficie de rodadura, hacia la sub-rasante.

Para satisfacer este propósito la base y sub-base debe ser tratada, es decir, deben ser construidas con propiedades de resistencia interna necesaria (Galindo Antillón, 2019).

La base y la sub-base están compuestas generalmente de un material granular compuesto principalmente por grava, arena o mezclas de estas (Valenzuela, 2003). En ocasiones son estabilizadas con cemento, cal o emulsión que sirve de conglomerante que mejora las características físicas y mecánicas de cada capa, además de la compactación que requieren para obtener las cotas y características establecidas por el interventor.

Reciclaje de pavimento asfáltico

El reciclaje de pavimento asfáltico es una práctica que consiste en obtener el material de las capas de un pavimento asfáltico existente que ha cumplido su ciclo de vida o de una mezcla asfáltica que no fue aprobada por defectos de calidad, por medio de la escarificación o fresado de las carpetas asfálticas, las cuales pueden ser transportadas a sitios de acopio para su posterior uso (Hernández, 2014), también pueden ser reutilizados en sitio, si se cuenta con la maquinaria necesaria para la conformación de la nueva carpeta asfáltica.

El uso de pavimento asfáltico reciclado ayuda en gran medida a disminuir los costos referentes a materiales pétreos, ligante asfáltico y el transporte de los mismos (Leiva & Vargas 2017).

Fresado de pavimentos

El fresado de pavimentos asfálticos consiste en la remoción y/o recuperación de las capas que conforman el pavimento asfáltico, cuando han cumplido su ciclo de vida o por presencia de fallas. Se obtienen de acuerdo a los requerimientos especificados en los estudios técnicos y se pueden usar diferentes métodos según la necesidad.

La obtención de las carpetas asfálticas normalmente se realiza a través de dos métodos, que se caracterizan por ser en frío o caliente y por el tipo de herramienta que utilizan, siendo comúnmente conocidos como corte por escarificación y corte por fresado (Galindo Antillón, 2019).

- **Corte por escarificación:** En este proceso se realiza un movimiento único, con un avance perpendicular de la cuchilla de la máquina o paralelo si el trabajo se ejecuta

con la pala de maquinaria amarilla, hacia el pavimento. Generando un área de corte con una profundidad constante, considerando una superficie plana (Gallegos, et al. 1999).

- **Corte por fresado:** La fresadora dispone de un tambor con dientes distribuidos a lo largo de la superficie. El corte se hace mediante un movimiento de giro alrededor del eje del tambor que se mueve transversalmente en línea recta.

La máquina fresadora posee velocidades de giro y avance constantes (Galindo Antillón, 2019).

Equipo de fresado: La máquina fresadora nació en la década de los 70 (Galindo Antillón, 2019).

Esta maquinaria surge como una alternativa que facilita la obtención del asfalto reciclado y cuenta con diferentes características que garantizan que el trabajo se ejecute acorde a las condiciones estipuladas de profundidad y ancho. Se caracterizan porque pueden remover el asfalto de forma sencilla y sin afectaciones en el tráfico, ya que no se necesita cerrar todos los carriles permitiendo mantener el flujo de vehículos.

La máquina fresadora debe garantizar la eficiencia para cumplir con los lineamientos del trabajo a ejecutar, ya que, de no ser así, el interventor a cargo podrá remplazar la máquina u ordenar la reparación de esta (INVIAS ART 460, 2012).

3. Metodología

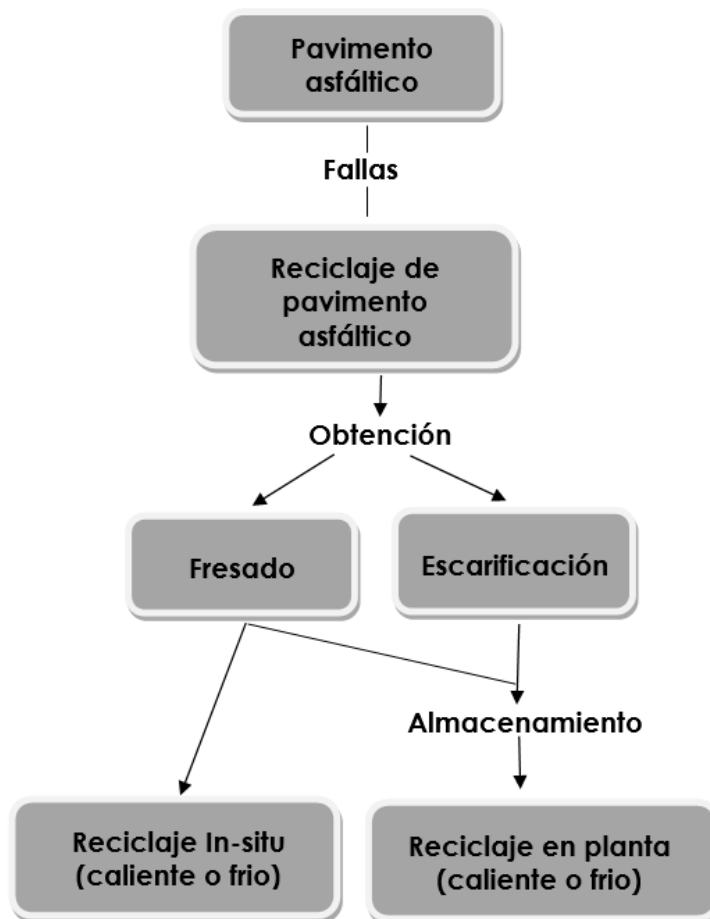


Figura 1. Esquema sobre la temática del proyecto de grado

Con base en el esquema presentado en la Figura 1, se pretende desarrollar y presentar la metodología con el fin de abordar los temas referentes al reciclado del pavimento asfáltico, mediante una revisión bibliográfica sobre los diferentes temas como se muestran a continuación.

3.1. Generalidades, estudio y contextualización sobre el pavimento asfáltico.

En esta primera parte del proyecto se buscó realizar un estudio previo sobre los pavimentos asfálticos y sus características con el fin de contextualizar sobre el tema, esto mediante una consulta bibliográfica de fuentes de información que brinden una base teórica básica, sobre el pavimento asfáltico en sí, como sus características principales, materiales, usos, posibles fallas y la forma de afrontarlas por medio del reciclaje del

pavimento. Todo esto complementado con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera universitaria de ingeniería civil en las diferentes materias referentes al tema.

3.2. Revisión bibliográfica acerca del pavimento asfáltico reciclado.

De igual manera en esta segunda parte se realizó una búsqueda exhaustiva sobre información bibliográfica de los diferentes procesos, usos y métodos que se utilizan para la obtención y posterior reutilización del pavimento asfáltico reciclado. Teniendo en cuenta la influencia ambiental, económica y social que se desprende de esta práctica. Esto mediante la recopilación de información a través de informes, tesis, artículos o cualquier fuente confiable de información, además de la información suministrada por los ingenieros e inspectores que se encuentran en la secretaria de infraestructura de la Alcaldía de Medellín.

3.3. Análisis de información.

Una vez se recopiló toda esta información bibliográfica, en esta última parte se llevó a cabo un análisis comparativo donde se escogió la información más relevante a cada tema para así lograr un desarrollo óptimo de este proyecto, donde fue posible obtener una mejor perspectiva sobre las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de obtención, usos y características del RAP, así como también el impacto ambiental y económico que se desprende de todas estas actividades y prácticas para plasmarlas en el proyecto final.

Todo este análisis se realiza con base en los conocimientos obtenidos de las fuentes de información bibliográfica, los conocimientos propios adquiridos en la universidad y los conocimientos de algunos ingenieros con los que pude compartir en el semestre de industria.

4. Desarrollo estudio y análisis

4.1. CARACTERÍSTICAS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO

El pavimento asfáltico se caracteriza principalmente por ser un pavimento flexible debido a la conformación de su capa de rodadura, cuenta con menor tiempo de ejecución y costo, por la mayor economía de sus componentes frente a las de un pavimento rígido (Valenzuela,

2003). Estos deben tener características impermeables, así como también propiedades antideslizantes y garantizar una pendiente mínima para el escurrimiento del agua hacia los costados.

Los pavimentos asfálticos están compuestos por materiales pétreos gruesos y finos, además de un llenante mineral, los cuales deben poseer características de calidad como las establecidas en la norma del INVIAS (2012). Algunas de estas características se muestran en la Tabla 1.

Los pavimentos flexibles están compuestos generalmente por 4 capas que cumplirán la labor de brindar soporte y una superficie adecuada para el tránsito automotriz, estas capas son la carpeta asfáltica, base, sub-base y la superficie de rodadura, tal como se muestra en la Figura 2.

Este tipo de pavimentos se emplean mayormente en vías primarias y secundarias y en menor medida en vías terciarias, esto debido a los factores de tiempo y dinero que son de suma importancia a la hora de ejecutar tramos de gran magnitud.

A pesar de tener una buena calidad este tipo de pavimentos presenta un menor tiempo de vida útil, por lo que es necesario realizar labores de mantenimiento más rigurosas para alargar su tiempo de vida. Sin embargo, con el pasar del tiempo este tipo de pavimentos presentan diferentes fallas por el deterioro que generan los vehículos pesados y el agua que a diferencia del pavimento rígido con el pasar del tiempo ganan mayor resistencia por las características del concreto.

Los tipos de fallas que se presentan en el pavimento asfáltico dependen de las cargas que se le apliquen, las condiciones en las que se encuentre el pavimento y los materiales empleados en este (Galindo, 2019).

Algunos tipos de fallas que se pueden presentar son:

- Fisuras
- Deformaciones
- Perdida de las capas
- Daños superficiales

Existen diversas formas de afrontar estas anomalías en el pavimento, de acuerdo a la magnitud, tiempo y recursos que se tengan destinados, una de las alternativas que se puede utilizar para solucionar las fallas que se presentan en los pavimentos asfálticos es el reciclado de una o la totalidad de las capas que lo conforman, mediante el uso de técnicas de fresado o escarificación como se mostraran más adelante.

Tabla 1. Características de los agregados minerales

DENOMINACION	DESCRIPCION
Agregado grueso	Parte del agregado que es retenida en el tamiz No. 4 (4,75mm).
	Particulas limpias para buena adherencia, resistentes y durables.
	Sin exeso de particulas planas, alargadas o desintegrables.
Agregado fino	Parte del agregado que esta entre los tamises N.o 4 y No. 200 (4,75mm y 75µm)
	Particulas duras y limpias de sustancias que impidan la adhesion del asfalto.
	Particulas de superficie rugosa y angular.
Llenante mineral	Parte del agregado que pasa el tamiz No.200 (75µm)
	Puede provenir de la trituracion de agregados o de productos comerciales como la cal hidratada o cemento hidraulico.

Fuente: INVIAS 2012

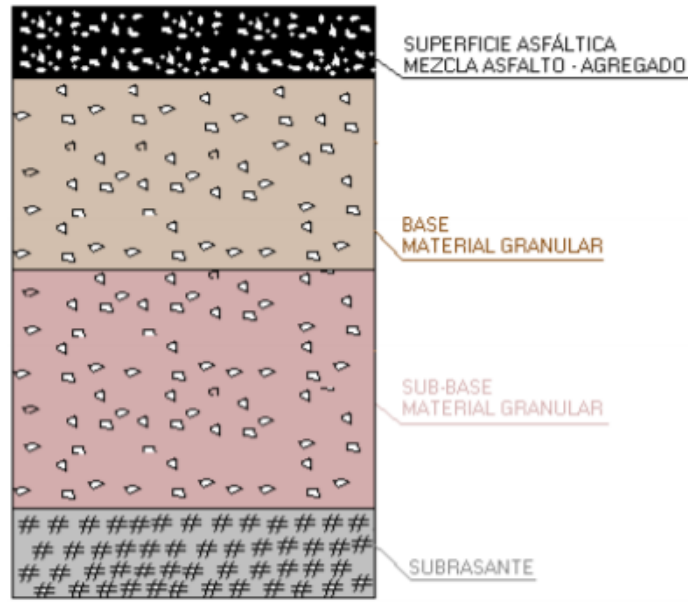


Figura 2. Esquema pavimento asfáltico Fuente: (Valenzuela, 2003).

4.2. FORMAS DE OBTENCIÓN DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO

El pavimento asfáltico reciclado puede ser obtenido principalmente mediante dos técnicas, conocidas como el fresado y la escarificación.

Ambas técnicas son relativamente nuevas y efectivas con ciertas diferencias en cuanto a su ejecución y uso.

4.2.1. Escarificación del pavimento asfáltico

Mediante este método se puede desprender el material de la carpeta asfáltica ya deteriorada hasta la sub rasante, haciendo uso del escarificador que generalmente se ubica en la motoniveladora, que es una maquinaria versátil a la hora de retirar el material existente, ya que cuenta con fuerza y potencia que garantizan un buen desempeño y precisión (Gallegos, et al. 1999). También es común realizar la escarificación con la pala de la excavadora o los tractores mediante la adaptación de la herramienta escarificadora, pero con una menor precisión, ya que estos no cuentan con las mismas características de la motoniveladora que está diseñada especialmente para nivelación de vías. Posteriormente con el material obtenido se procede a retirarlo, tratarlo y reutilizarlo si es el caso.

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

En la máquina motoniveladora se suele encontrar ya sea en la parte trasera, central o delantera de la máquina, la cual con sus dientes penetran a la profundidad deseada y mediante el avance de la maquinaria irán desprendiendo las capas del asfalto y la subrasante de manera controlada para facilitar la nivelación y extracción del material.



Figura 3. Herramienta escarificadora en motoniveladora. Fuente: (volvoce.com)

Ventajas:

- Facilidad en cuanto a la planeación de la ejecución debido a que solo requiere de una maquinaria en campo para la extracción del material.
- Económico debido a que no se requieren mayores equipos de trabajo en campo.
- Reciclaje del 100% de material obtenido, reduciendo el costo de ejecución en la repavimentación de las vías.
- Ayuda al medio ambiente al no requerir mayor explotación de materia prima.

Desventajas:

- Menor precisión frente al método del fresado, ya que los dientes se encuentran ubicados de manera perpendicular o paralela en el caso de la excavadora, a la superficie del terreno y las vibraciones pueden hacer variar las profundidades de remoción obteniendo falencias en la ejecución.
- No permite dar un acabado final a la superficie por la disposición de los dientes y requieren de otro tipo de máquina o herramienta.
- El material obtenido no está triturado totalmente por lo que se debe llevar a una planta de tratamiento para que el material sea triturado y preparado para su reutilización.
- Mayores tiempos de ejecución en el post tratamiento del pavimento escarificado y su reutilización in situ.
- Menor eficiencia en cuanto al manejo del tránsito, ya que la máquina requiere de más del 50% de la vía, generando poca movilidad en el tránsito vehicular.
- Menor eficiencia en cuanto al ancho de carril que puede ser retirado con una sola pasada de la máquina.

4.2.2. Fresado del pavimento asfáltico.

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

Este método se caracteriza por la alta precisión en los trabajos, con una buena potencia y desempeño en el campo (Galindo, 2019).

La ejecución comienza con la preparación de la superficie a fresar quitando contaminantes que puedan alterar el material obtenido al realizar el fresado (INVIAS-cap 4, 2012). Se procede a utilizar la máquina fresadora siguiendo las recomendaciones del encargado del proyecto y si es el caso el material obtenido se puede reutilizar de manera inmediata realizando el proceso de mezclado con los

agentes mejorantes del asfalto y colocándolo en el sitio de extracción mediante una sola pasada mejorando así, los tiempos de ejecución (Galindo, 2019).

Cabe destacar que este procedimiento posee tecnología más avanzada y aplicada para los requerimientos que se tengan sobre el proceso de fresado.



Figura 4. Herramienta fresadora. Fuente: *El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen.*

p. 4

Ventajas:

- Posibilidad de reutilizar el 100% de material fresado, lo que se traduce en economía de materia prima.
- Facilidad para tratar y colocar el material in situ, reduciendo tiempo de ejecución.
- Maquinaria moderna diseñada especialmente para realizar este tipo de proyectos, lo que permite un trabajo de alta precisión.
- Amigable con el medio ambiente al reducir la explotación de agregados pétreos.
- Facilidad para manejar el tránsito vehicular cuando se está en la obra, debido a que se puede trabajar en un solo carril, mientras se permite el flujo por el otro.

- Economía al no necesitar transportar el material a una planta para ser tratado y devuelto al sitio de aplicación.
- Permite dar el acabado a la superficie para mantener los ángulos de inclinación.

Desventajas:

- Mayor tiempo de planeación, debido a la maquinaria que se necesita en campo.
- Poco más costoso a corto plazo en comparación con la escarificación, por el personal y la maquinaria requerida. (esto se compensa a largo plazo con otras ventajas)

4.3. ACOPIO DEL MATERIAL

El material tomado de los pavimentos asfálticos deteriorados, debe ser dispuesto en zonas de acopio que permitan mantenerlo en condiciones óptimas y que además cumpla con las licencias ambientales requeridas. Ya que, si por ejemplo se dispone el material fresado en zonas al aire libre y sin drenes, este puede disminuir su calidad y propiedades mecánicas, y además al estar expuesto durante un largo periodo a la intemperie se puede apelmazar, requiriendo nuevamente de la trituración del material para su posterior uso.

El RAP al tener una alta variabilidad al momento de ser recuperado, se le debe implementar en lo posible, técnicas que permitan la homogeneización de este, como la clasificación del material en diferentes apilamientos, la descontaminación del material, la caracterización del material, el acopio en zonas cubiertas y en apilamientos cónicos sobre superficies pavimentadas y con pendientes que permitan drenar el agua de estos (Leiva & Vargas 2017).

Tomando estas medidas es posible caracterizar el material de manera mucho más sencilla y determinar cuál es la calidad y uso que se le puede dar a cada tipo de reciclaje. Una desventaja de realizar estas técnicas es que requieren un gasto extra para las zonas de acopio y que al realizarse varios apilamientos se requiere de un área mucho mayor en planta de acopio.

4.4. MÉTODOS DE RECICLAJE DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO

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

Desde los comienzos de la práctica del reciclado de pavimentos asfálticos hasta el momento, se han presentado gran avance y acogida de los diferentes métodos de obtención del pavimento asfáltico proveniente del reciclaje de vías deterioradas y en mal estado. Algunos de los métodos más usados son:

- Reciclado en planta (caliente o frío)
- Reciclado in situ en frío
- Reciclado in situ en caliente

4.4.1. Reciclado en planta en caliente o frío

Una vez extraído el material de las carreteras o pistas, se procede a transportarlo a las plantas de tratamiento en donde se realizará un proceso de trituración para homogeneizar el material, mezclándolo ya sea en caliente con materiales pétreos vírgenes y betún o en centrales de mezclas en frío, obteniendo así la mezcla bituminosa compuesta de material reciclado que puede ser llevada a la zona donde se pretende colocar la mezcla (Restrepo & Stephens, 2015).

Ventajas

- Beneficios ambientales y económicos debidos a la reutilización del RAP
- Es posible realizar una mejora total de las características estructurales del pavimento.

Desventajas

- Tiempo de curado depende de las condiciones ambientales pudiendo variar de días a meses.
- El transporte del material a la planta y de la planta al sitio de colocación es un recurso extra si se compara con los métodos in-situ.

4.4.2. Reciclado in-situ en frío

Esta técnica consiste en el fresado del material existente y posterior mezclado con ligante ya sea emulsión bituminosa o conglomerante hidráulico, por medio de maquinaria multifuncional que opera a temperatura ambiente. Además, esta técnica permite reciclar hasta el 100% de material y se debe evitar en lo posible reciclar material en buen estado, ya que este cuenta con mejores características mecánicas que pueden alterar la homogeneidad del material (Quesada, 2004).

Ventajas

- Disminuye la producción de CO₂.
- Se requiere de menor energía por la funcionalidad de las maquinarias in-situ.
- Permite reciclar en mayores espesores de material.
- Beneficio ambiental y económico.

Desventajas

- No se aprovecha al máximo el ligante asfáltico antiguo, debido a que no se calienta.
- Requiere de mayor tiempo para dar paso al tránsito en comparación con el método en caliente.
- Irregularidad en la capa final debido a dificultad en las compactaciones.

4.4.3. Reciclado in-situ en caliente

Por medio de esta técnica es posible realizar el reciclado del pavimento asfáltico utilizando máquinas de fresado que utilizan calefactores para facilitar la extracción del material. Una vez fresada la superficie se procede a mezclar el material con betún y/o agentes rejuvenecedores para darle las condiciones mecánicas óptimas. Esta técnica no requiere necesariamente de materiales pétreos vírgenes y una vez extendida la mezcla se debe proceder a compactarla rápidamente (Quesada, 2004).

Ventajas

- El material obtenido a partir de esta técnica tiene mejores características aglomerantes en comparación con la técnica en frío.
- No degrada tanto los agregados pétreos

- Beneficios económicos y ambientales.
- Permite el flujo vehicular con mayor rapidez

Desventajas

- No permite solucionar problemas estructurales.
- El calentamiento oxida el ligante asfáltico y lo debilita.
- Mayores emisiones de CO₂.
- Sobrecalentamientos de maquinaria.

Con los diferentes métodos se puede utilizar el RAP en diferentes proporciones según la conformación que se desee llevar a cabo, esto si es para la base, sub-base o la capa de rodadura.

A continuación, se presentan las proporciones de RAP utilizadas en el municipio de Medellín para las diferentes capas de pavimento asfáltico principalmente en zonas rurales para la conformación o mejoramiento de vías terciarias.

Tabla 2. Proporciones de RAP usadas para la conformación de capas del pavimento asfáltico

PROPORCIONES		Superficie de uso
Material Reciclado	Material Virgen	
75%	15%	Sub-base
40%	60%	Base
25%	75%	Mezcla Asfáltica
100%	0%	Vías Terciarias

Fuente: Alcaldía de Medellín-Maquinaria y equipo

En Medellín se lleva a cabo esta práctica desde hace varios años y se ha visto beneficiado en gran medida por la economía y beneficios ambientales que esto conlleva. El RAP es utilizado principalmente para la pavimentación de vías terciarias en las zonas rurales del municipio,

aunque también debido a la alta cantidad que se suele generar de este material, se dispone para ofertas realizadas a municipios vecinos que estén interesados en el RAP.

4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

El reciclaje de pavimento asfáltico, es una alternativa factible tanto económica como técnicamente, con el fin de mantener en óptimas condiciones las carreteras colombianas, ya que se aprovechan los recursos existentes disponibles en las redes viales, que han cumplido su vida útil, disminuyendo los costos de mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos (INVIAS, 2012).

Como se observó en los diferentes métodos de reciclaje, es claro el beneficio tanto económico como ambiental que la práctica del reciclaje de pavimento asfáltico trae consigo, empezando desde lo más básico que es el ahorro en la explotación de materiales pétreos y ligante asfáltico, así como también evitando costos en el transporte de los materiales que a su vez traen beneficios de seguridad vial, al disminuir la cantidad de vehículos pesados en la vía los cuales son de alto riesgo para los demás ocupantes de las carreteras. Todo esto aumentando en general la eficiencia en la ejecución de los trabajos.

Con el pasar del tiempo también se han creado nuevas alternativas o mejoras tecnológicas que pueden traer aún más beneficios medioambientales, económicos y técnicos. Como las presentadas por la página wirtgen-group (2018) con la implementación de fresadoras inteligentes, las cuales sean capaces de fresar de manera selectiva las diferentes capas con características similares y además, mediante la implementación de una conexión autónoma de los dispensadores de agua y la herramienta fresadora, para su enfriado la cual se active y desactive de manera que se utilice el riego de agua con mayor eficiencia, podría ahorrar hasta un 20% de este preciado líquido, que además, aumenta el tiempo de vida útil de los dientes fresadores y mejora la eficiencia de los trabajadores.

En el municipio de Medellín se llevaron a cabo estudios de comparación por Echeverría (2011) en el cual se presentaron dos alternativas una en la que se utilizaron materiales vírgenes sin aprovechamiento del pavimento deteriorado y otra en la que se optó por el reciclaje del pavimento asfáltico tal como se muestra en la Tabla 3 (Méndez, 2015).

Tabla 3. Alternativas de reparación de un tramo de vía

Carrera 70 entre calle 9 y calle 30. Medellin			
Estructura existente	Espesor cm.	Coefficiente adoptado	Numero estructural
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	37.00	0.09	1.31
pavimento fallado	9.10	0.23	0.82
Solucion propuesta	Hacer parcheo en el 40% del area y reforzar con 15.1 cm. de rodadura		
Carpeta asfaltica	15.10	0.33	1.96
Numero estructural con refuerzo			4.84
Valor solucion propuesta sin imprevistos			\$ 309,000,000
Solucion alterna	Reciclar con crudo y aditivo RCA-10 en 25 cm. y colocar carpeta de rodadura de 6.4 cm.		
Fecha reciclaje	Jul-95		
subbase en arenilla	27.00	0.07	0.74
subbase de rio, sobretamaños	21.10	0.09	0.75
reciclaje con crudo y RCA-10	25.00	0.28	2.76
Carpeta asfaltica	6.40	0.33	0.83
Numero estructural con reciclaje			5.08
Valor solucion ejecutada con reciclaje, incluye imprevistos			\$ 162,000,000

Fuente: Echevarría 2011

De la anterior tabla es posible observar que en la solución propuesta se realizó un parcheo en el 40% del área de pavimento con el fin obtener una superficie plana constante sin baches que deformen y debiliten el refuerzo de la nueva carpeta de rodadura, la cual tuvo un espesor de 15,1 cm lo que se traduce en un espesor total de la estructura de pavimento de 88.2 cm con un número estructura (resistencia del pavimento) de 4.84 y con un costo de 309 millones de pesos. Mientras en la solución alterna con RAP, se fresaron 25 cm de carpeta y sub-base para la nueva conformación de la base estabilizada con crudo y una carpeta asfáltica de 6,4 cm lo que se traduce en un espesor total de 79.5 cm con un número estructural de 5,08 y con un costo de 162 millones de pesos.

Es claro entonces que la solución alterna planteada mediante el uso de RAP, resulto mucho más económica, reduciéndose a casi la mitad del costo de la solución propuesta mediante el bacheo y sobrecarpeta asfáltica y obteniendo un menor espesor en el pavimento que se traduce en menos material contaminante y menos tiempos de ejecución. A esto se le suma el hecho de que el desempeño en cuanto a la calidad que tendrá el pavimento conformado con RAP fue mejor como lo muestra el número estructural del pavimento.

4.6. USOS

Son muchos los usos que se le puede dar al material reciclado, desde material para conformación de firmes, hasta material para la conformación de carpetas asfálticas, esto depende de las condiciones en las que se encuentre el material, y se determinan por medio de los ensayos de laboratorio, los cuales revelaran para que fin son mayormente adecuados.

Entre los ensayos más importantes se resaltan:

- Ensayo de extracción de disolvente (AASHTO T 164). Con el fin de determinar el contenido de asfalto existente.
- Grado de desempeño (AASHTO M 320). Con el fin de determinar el rango de temperaturas óptimas para el correcto desempeño del asfalto.
- La granulometría de los agregados que conforman el RAP (AASHTO T 30)
- La gravedad específica para material fino y grueso (AASHTO T 84 Y T 85) (Leiva & Vargas 2017).

Algunos de los usos más destacados son los siguientes.

4.6.1. Agregado para base

Los agregados del material reciclado son procesados para ser mezclados con materiales vírgenes y así obtener una base o sub-base granular debidamente compactada. Aunque según Huntington, Khaled & Koch (2013), en pruebas realizadas en carreteras con porcentajes de RAP de 50% a 80% se encontraron dificultades en el mezclado y la compactación, por lo que se piensa que traerán problemas de segregación a largo plazo.

4.6.2. Agregado para bases estabilizadas

Los agregados del RAP son procesados y estabilizados con materiales que mejoran las condiciones del material reciclado para posteriormente ser compactados y obtener una base con mejor capacidad mecánica.

Al-Harty et al (2002) realizaron una investigación donde se utilizaron de 70% a 100% de RAP y pudieron concluir que con esta aplicación era posible disminuir el espesor de la capa de base en comparación con una base convencional.

4.6.3. Material de relleno

El material asfáltico reciclado es de gran utilidad en los rellenos de construcción sin embargo no se recomienda utilizarlo en estas actividades debido a que no se puede sacar el máximo provecho a su valor económico.

4.6.4. Adoquines de RAP

Uno de los usos poco conocidos para el RAP es su utilización para crear bloques de asfalto como adoquines. Según estudios realizados por Marín (2016) Se ejecutó un tramo de vía utilizando adoquines hechos con RAP y en el desarrollo de las actividades se identificó en la planta que para adoquines conformados con más de 25% de RAP había problemas relacionados con la cohesión por lo que se recomienda este tipo de uso para vías de bajo flujo.

4.6.5. Mezcla asfáltica

Para el uso del material asfáltico reciclado en mezclas asfálticas nuevas, se puede proceder de dos maneras: la primera es mediante el reciclado en planta, donde se procesa el RAP para realizar una correcta gradación y posteriormente se mezcla con el asfalto y agregados vírgenes, en ocasiones también con agentes rejuvenecedores para obtener la mezcla final. La segunda opción es el reciclado in-situ en la cual el material reciclado se utiliza tal cual como es obtenido y posteriormente se mezcla con emulsión asfáltica para por último ser colocado y compactado como se hace normalmente con las mezclas vírgenes (Miranda & Aguilar 2019).

5. Conclusiones

- La reutilización del pavimento asfáltico es una práctica de suma importancia para el desarrollo del país, ya que conlleva mejoras ambientales, económicas y sociales que garantizan materiales para construcciones viales de alta calidad con recursos reciclados.
- Las ventajas que se desprenden de las prácticas de reciclaje del pavimento asfáltico son mucho mayores que las desventajas que se pueden presentar, por lo que es totalmente factible utilizar este tipo de métodos.
- La calidad obtenida en las diferentes capas que conforman el pavimento asfáltico depende de las características del pavimento reciclado y del buen tratamiento y uso de este, pudiendo obtenerse materiales con características similares a las de los materiales vírgenes.
- Los acopios de material asfáltico reciclado deben garantizar la preservación del material en condiciones óptimas que impidan el deterioro del mismo, ya que desde allí parte la buena calidad de los materiales. Por otra parte, el reciclado in-situ brinda mayor economía evitando gastos en el transporte de material y el acopio del mismo.
- Según los usos y métodos que se pueden implementar en la práctica del reciclaje del pavimento asfáltico se encontró que las características del material para la conformación de bases son mucho más usadas y eficiente debido a las propiedades que este material presenta, aun después de reciclado, con lo que se complementa con la adición de una carpeta de rodadura con materiales vírgenes que garanticen un acabado de calidad para la vía.
- Es posible reciclar el 100% de pavimento asfáltico y las características y calidad del reciclaje dependerán de la obtención y acopio del mismo, esto a su vez determinará si se utiliza para capas superiores que demandan mayor calidad de materiales al estar directamente expuestas a las cargas como la base y la carpeta de rodadura, o si bien se utilizaran para capas inferiores como la sub-base o terraplenes los cuales no recibirán mayores cargas y por lo tanto sus características mecánicas y físicas son menores.

6. Referencias bibliográficas

Alarcón Ibarra, J. (2003). *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Al-Harty, A., Al-Shamsi, K., Al-Zubeidi, M., Taha, R. (2002). *Cement stabilization of reclaimed asphalt pavement aggregate for road bases and subbases*. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, 06/2002, pág. 239-245, Estados Unidos.

Echeverría., (2011). PONENCIA: *Coeficientes estructurales para materiales reciclados y estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia*. Especificaciones constructivas y ahorro en costos. En: XVIII Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.

Fabela Gallegos, M. J., Jaworski, J., Lozano Guzmán, A., Carrión Viramontes, F. J., Hernández Rivera, J., & Martínez Madrid, M. (1999). PROCESO DE REMOCION DE CARPETAS ASFALTICAS. *PUBLICACION TECNICA*, (122).

Galindo Antillón, A. E. (2019). *Técnicas de fresado de pavimentos flexibles aplicables en la República de Guatemala* (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).

Hernández Hernández, P. J. (2014). Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas asfálticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidráulicos y emulsiones asfálticas. *Ingeniería Civil*.

Huntington, G., Khaled, K., Koch, S. (2013). *Performance of Reclaimed Asphalt Pavement on Unpaved Roads*. Universidad de Wyoming, Centro de Transferencia de Tecnológica de Wyoming, Estados Unidos.

Instituto Nacional de Vías- INVIAS. (2012) Capítulo 4 *Pavimentos asfálticos*. Bogotá Colombia.

Leiva-Villacorta, F., & Vargas-Nordbeck, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Infraestructura Vial*, 19(33), 35-44.

Marín, C. R. (2016). *Pavimentos articulados de bloques asfálticos con RAP y análisis estructural a través de un modelo físico experimental*. Tesis para optar por el grado de Doctor

en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de ingeniería, Chile.

Méndez Revollo, A. A. (2015). Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas.

Miranda-Argüello, F., & Aguiar-Moya, J. P. (2019). Mezclas asfálticas con rap: pavimentos asfálticos reciclados.

Muñoz Reyes, C. E., & Arellano Ramos, E. (2018). *Reciclado de pavimentos con carpetas de asfalto en la Séptima Región. Ventajas y costos asociados a su ejecución* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería en Construcción).

Quesada Vallejo, I. (2004). Evaluación del comportamiento de diferentes tramos de carretera rehabilitados utilizando mezclas recicladas en frío.

Remond, G., & Hebert, M. (2017). Propuesta para la mejora de los pavimentos asfálticos utilizando el método del asfalto espumado.

Restrepo Sierra, H. A., & Stephens Zapta, S. A. (2015). Estudio de la Ventajas Economicas del Reciclaje en Frio in situ de pavimentos Asfálticos. *Monografía, UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN, MEDELLÍN*.

Sánchez Angel, J. C. (2009). Estudio de las ventajas del reciclado in situ en caliente de pavimentos flexibles.

Suarez Tirado, A. (2019). Análisis monótonico de mezclas densas en caliente con asfalto modificado con 50% de caucho y 50% de cuero.

Tineo Oropeza, I. L. (2019). Evaluación del estado del pavimento asfáltico aplicando los métodos pci y vizir para proponer alternativas de mantenimiento—av. canto grande.

Valenzuela, M. (2003). El asfalto, en la conservación de pavimentos. *UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE, Valdivia*.

Wirtgen-group.com. (2018). *Cadena de proceso en el reciclaje de asfalto*. NdP. Wirtgen. Disponible en: <https://www.wirtgen-group.com/es-co/noticias-y-medios/wirtgen-group/reciclaje-de-asfalto/>.