

Cartilla de Buenas Prácticas para el Manejo y Uso del Material Recuperado de Pavimentos y Mezclas Asfálticas

Instituto Nacional de Vías

INVIAS

Copyright © XXXXXXXXXXXX

DATOS DE LA PUBLICACIÓN

[HTTPS://WWW.INVIAS.GOV.CO](https://www.invias.gov.co)

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXXXX, XXXXXXXXXXXXXXX



Contenido

I	PARTE I	
1	Preliminares	9
1.1	Introducción	9
1.2	Glosario	10
1.3	Listado de Siglas y Acrónimos	12
II	PARTE II	
2	Ciclo de vida de los pavimentos	15
2.1	Ciclo de vida de un pavimento	15
3	Efectos Ambientales de los Pavimentos	17
3.1	Explotación de materiales	17
3.2	Producción de mezclas asfálticas	19
3.3	Normas ambientales	20
III	PARTE III	
4	¿Qué es el RAP?	25
4.1	Definición del RAP	25

4.2	Origen del RAP	25
4.2.1	Fresado:	26
4.2.2	Demolición:	29
4.2.3	Rechazo de materiales en planta y obra.	31
5	Aplicaciones y ventajas del RAP	33
5.1	Aplicaciones del RAP	33
5.1.1	Aplicaciones del RAP en mezclas asfálticas	33
5.1.2	Aplicaciones del RAP en capas granulares no tratadas	36
5.1.3	Otras aplicaciones	38
5.2	Ventajas del RAP	39
5.2.1	Ventajas ambientales	39
5.2.2	Ventajas de desempeño	39
5.2.3	Ventajas económicas	42

IV

PARTE IV

6	Gestión del RAP: De la recuperación al uso	45
6.1	Gestión del RAP en obra - Proceso de recuperación	45
6.1.1	Preclasificación y evaluación del pavimento recuperado	46
6.1.2	Demolición del pavimento	46
6.1.3	Fresado del pavimento	46
6.2	Gestión del pavimento recuperado en el centro de acopio	47
6.2.1	Preclasificación en el centro de acopio	47
6.3	Trituración y Almacenamiento del RAP	47
7	Diseño de mezclas con RAP	53
7.1	Diseño de mezclas asfálticas	53
7.1.1	Marshall Modificado (Para uso en mezclas frías con emulsión asfáltica)	53
7.1.2	Método Hveem	56
7.1.3	Método de diseño por balanceo	56
7.1.4	Superpave	58
7.1.5	Método de diseño de mezcla Chevron para mezclas en frío	58
7.1.6	Método basado en Inmersión-Compresión	61
7.2	Diseño de capas granulares	61
7.2.1	Capas granulares no tratadas	62
7.2.2	Capas granulares tratadas	62
8	Experiencias de uso de RAP	67
8.1	Experiencias de uso de RAP en Colombia	67
8.2	Experiencias de uso de RAP Internacional	72
9	Equipos de construcción y listas de verificación	77
9.1	Equipos	77
9.1.1	Fresadora	77
9.1.2	Recicladora	77

9.1.3	Volqueta	79
9.1.4	Carrotanque irrigador	79
9.1.5	Motoniveladora	79
9.1.6	Pavimentadora o terminadora	79
9.1.7	Compactador de rodillo liso	81
9.1.8	Compactador de rodillo neumático	81
9.2	Listas de verificación	81

V**PARTE V**

10	Recomendaciones, Limitaciones y Conclusiones	91
10.1	Recomendaciones	91
10.2	Limitaciones	91
10.3	Conclusiones	92



PARTE I

1	Preliminares	9
1.1	Introducción	
1.2	Glosario	
1.3	Listado de Siglas y Acrónimos	



1. Preliminares

1.1 Introducción

En las últimas décadas Colombia ha experimentado un incremento en la construcción y desarrollo de la red vial pavimentada a nivel nacional, así como en los diferentes centros urbanos, pero de igual manera su uso y condiciones medioambientales han ocasionado deterioro en esta infraestructura, tanto en sus características funcionales como estructurales, conduciendo a procesos de mantenimiento, conservación, rehabilitación y/o reconstrucción. El desarrollo de estas actividades genera materiales que en muchas oportunidades han producido contaminación ambiental, en lugar de ser reutilizados adecuadamente, por ejemplo, para la construcción de infraestructura vial, y así aprovechar las bondades técnicas y económicas de estos materiales.

Por lo anterior, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS, con el interés de promover una gestión sostenible de los recursos, reducir el impacto al medioambiente mediante el empleo de materiales no renovables, apoyar las políticas de economía circular y especialmente fomentar el aprovechamiento de los recursos naturales, elaboró esta Cartilla denominada “Buenas Prácticas para el manejo y Uso del Material Recuperado de Pavimentos (RAP) y Mezclas Asfálticas”. El objetivo fundamental de la Cartilla es expresar, conceptualizar y particularmente promover en la ingeniería una nueva cultura orientada a usar estos materiales, por sus notables bondades medioambientales y potencial buen desempeño al ser usados en las diferentes capas que conforman una estructura de pavimento.

Para cumplir con el objetivo planteado, la Cartilla está dividida en cinco (5) partes y diez (10) capítulos, iniciando con la Parte I, denominada preliminares, que busca contextualizar al lector con la terminología, acrónimos y el objetivo y partes de la Cartilla. En la Parte II de la Cartilla, se integran los Capítulos dos y tres; el Capítulo dos denominado Ciclo de vida de los pavimentos, muestra las diferentes etapas que tiene un pavimento y en las cuales se genera el RAP y se visualiza su potencial reutilización. El tercer Capítulo, denominado Efectos medioambientales de los pavimentos, evidencia los procesos de la explotación de la materia prima para la construcción de pavimentos, seguido de la producción de las mezclas asfálticas y concluye con las normas existentes referentes a la sostenibilidad entre el medioambiente y la infraestructura vial del país. La Parte III está constituida por el Capítulo cuatro (4), en el cual se define claramente el RAP y su origen, seguido del Capítulo cinco (5) que establece las aplicaciones del RAP y sus ventajas dentro

de la infraestructura vial.

Una vez definidas las bondades del RAP, se planteó la Parte IV de la Cartilla, que contempla los capítulos seis (6), siete (7), ocho (8) y nueve (9). El Capítulo seis (6) presenta la gestión que se debe tener del RAP, desde el instante de su generación hasta el de su uso nuevamente en la infraestructura vial, de tal manera que se identifiquen tanto los procesos “in situ” como los de transformación que puede tener este material al ser llevado a un centro de tratamiento y aprovechamiento, para su posterior empleo como materia prima en la construcción de pavimentos. El Capítulo siete (7) plantea algunas de las técnicas utilizadas en el diseño de mezclas asfálticas y de capas granulares con RAP. Posteriormente, se tiene el Capítulo (8) que enuncia experiencias exitosas a nivel nacional e internacional con el empleo del RAP y su desempeño en función de diferentes características de este. Finalmente, el Capítulo nueve (9) muestra la construcción de pavimentos con RAP y controles de obra. La parte final de la Cartilla la constituye la Parte V, que está conformada fundamentalmente por recomendaciones, conclusiones y limitaciones del RAP.

Como objetivo trascendente, el Instituto Nacional de Vías busca, por medio de la Cartilla, socializar ante la comunidad las bondades que posee el RAP a través de su aprovechamiento, técnicamente diseñado, para aportar con adecuada calidad al desempeño de las capas que conforman la estructura de pavimento y reducir el impacto sobre el medioambiente, al disminuir tanto el consumo de materiales no renovables como la disposición final de estos materiales potencialmente reutilizables, en rellenos sanitarios, botaderos, zonas baldías, cuencas, cauces, humedales o cualquier otro sitio, con generación de notables pasivos ambientales y ecológicos.

1.2 Glosario

Términos utilizados en la Cartilla de Buenas Prácticas para el Manejo y Uso del Material Recuperado de Pavimentos y Mezclas Asfálticas.

Agregado: Material pétreo obtenido de canteras, ríos o fresado empleados para la conformación de capas granulares, mezclas asfálticas o para mejorar o estabilizar la subrasante.

Dosificación: Proporción en que participarán los diferentes materiales para formar un determinado producto.

Escarificación: Disgregación de una capa de la estructura de pavimento existente.

Fraccionamiento: Separación en dos o más tamaños o fracciones para ser incorporadas en los materiales reciclados en forma separada.

Fresado: Trituración por medios mecánicos (generalmente en frío) de la parte superior de un pavimento para corregir sus perfiles longitudinal y transversal, removiendo abultamientos, baches, excesos de asfalto y otras imperfecciones de la capa de rodadura, dejando una superficie de macrotextura rugosa de elevada resistencia al deslizamiento. Este proceso produce el material denominado RAP

In situ: Que se desarrolla en el lugar donde se ejecuta la acción.

Ligante asfáltico: Material cuyas propiedades permite unir las partículas minerales e impermeabiliza al conjunto.

Llenante (Filler): Material fino o pasa tamiz No. 200, de elevada superficie específica, que interviene en la mezcla y puede tener una o más funciones: completar la granulometría de los

materiales minerales, reducir el volumen de vacíos en la mezcla, aportar poder espesante cuando la mezcla está aún fluida, incrementar la resistencia mecánica de la mezcla, y mejorar la adherencia del par agregado-asfalto.

Mantenimiento: Conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un sistema en un estado tal que permita seguir cumpliendo la función para la cual fue concebido.

Muestra: Parte de un todo, elegida o extraída mediante un procedimiento establecido, y que se considera representativa de lo que se quiere conocer.

Pavimento: Conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, que se diseñan y construyen técnicamente con materiales apropiados y adecuadamente compactados, con el fin de brindar comfort y seguridad a los usuarios de un corredor vial, soportando durante su vida útil las cargas impuestas por el tráfico y los efectos del clima.

Pavimento asfáltico: Tipo de pavimento donde su capa superior esta compuesta por agregados pétreos y ligante asfáltico. (ligante).

Planta de producción de mezcla asfáltica continua: Emplea dosificación volumétrica continua de materiales para la producción de mezclas. En este tipo de plantas no existe interrupción del funcionamiento, y la mezcla de los materiales se da dentro del tambor secador.

Planta de producción de mezcla asfáltica discontinuas o por bachada: Emplea el pesado de materiales posterior al secado de los mismos y previo del inicio del proceso de mezclado, generando producción por lotes (batch) con intervalos de tiempo cortos.

Reciclado de pavimento: Reutilización de una o varios materiales extraídos de un o varias capas que conforman un pavimento posterior a su vida útil.

Reclaimed Asphalt Pavement - RAP : En español Material bituminoso reciclado (MBR). Material recuperado de pavimentos asfálticos mediante proceso de fresado o demolición, compuesto por agregados y asfalto envejecido. Se genera cuando un pavimento asfáltico es retirado para su rehabilitación o reconstrucción. Así mismo, cuando existe rechazo de una mezcla asfáltica en obra o en planta.

Reconstrucción de pavimentos: Remoción y reemplazo total de la estructura de pavimento existente. Intervención hasta la subrasante debido a un elevado deterioro o cambios en los requisitos de carga.

Rehabilitación de pavimentos: Remoción y reemplazo parcial de la estructura de pavimento existente, con el fin de solventar deficiencias de tipo estructural o funcional y recuperar la servicialidad de la estructura.

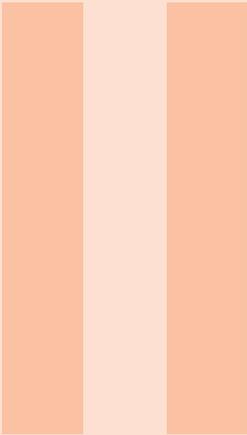
Reutilización: Prolongación de la vida útil de los materiales recuperados de una estructura, que se utilizan nuevamente, sin que para ello se requieran procesos adicionales de transformación.

Subrasante: Terreno que tiene características necesarias para soportar o apoya una estructura de pavimento.

1.3 Listado de Siglas y Acrónimos

Abreviaturas utilizadas en la Cartilla de Buenas Prácticas para el Manejo y Uso del Material Recuperado de Pavimentos y Mezclas Asfálticas.

APL: Acuerdo de Producción Limpia	Civiles
ASTM: American Society for Testing and Materials	IDU: Instituto de Desarrollo Urbano
BG: Base Granular	IGA: Instrumento de Gestión Ambiental
BTC: Base Tratada con Cemento	IMA: Indicador de mezcla asfáltica
CBR: California Bearing Ratio	INVIAS: Instituto Nacional de Vías
CE: Comisión Europea	MA: Máquina de los Ángeles
CONPES: Consejo Nacional de Política Económica y Social	MBR: Material de Pavimento Asfáltico Reciclado
CTA: Centro de tratamiento y aprovechamiento	MPa: MegaPascal
CPE: Capacidad estructural equivalente	MSE: Muros Mecánicamente Estabilizados
DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística	NAPA: National Asphalt Pavement Association
DG ENV: Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea	NEE: Número de ejes equivalentes
EAPA: Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos	PGIRS: Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos
EE. UU.: Estados Unidos	TPD: Tráfico promedio diario
EUROSTAT: Oficina Europea de Estadística	RAS: Tejas de asfalto reciclado
FHWA: Federal Highway Administration	RAP: Pavimento Asfáltico Reciclado
FRAP: RAP fraccionado	RCD: Residuos de Construcción y Demolición
ICOCIV: Indicador de Construcción de Obras	SBG: Subbase Granular
	SEIA: Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental
	UE: Unión Europea



PARTE II

2	Ciclo de vida de los pavimentos	15
2.1	Ciclo de vida de un pavimento	
3	Efectos Ambientales de los Pavimentos	17
3.1	Explotación de materiales	
3.2	Producción de mezclas asfálticas	
3.3	Normas ambientales	



2. Ciclo de vida de los pavimentos

2.1 Ciclo de vida de un pavimento

En la Figura ?? se presenta un esquema que representa el ciclo de vida de un pavimento. El ciclo de vida de una estructura de pavimento inicia con la concepción de la idea a desarrollar, seguido de los diseños donde se involucra el trazado, las fuentes de materiales, el clima y otras variables. Posteriormente, se construye y se pone en funcionamiento. Sin embargo, la vida de un pavimento no es infinita; se deteriora o daña y necesita mantenimiento, conservación y, en ocasiones, rehabilitación y reconstrucción. Estos últimos pasos generan materiales que son depositados en vertederos o reciclados nuevamente para su uso en la infraestructura vial.

La determinación de las fuentes de material de agregados pétreos empleados en la conformación de las diferentes capas del pavimento comienzan con la identificación y evaluación de un yacimiento (ya sea en una montaña o un río), para el cual se requiere el aval de la autoridad encargada de los permisos medioambientales. Sin embargo, aunque se realicen estudios y se implementen medidas de mitigación medioambiental, la explotación de recursos naturales genera efectos nocivos. Del mismo modo, el empleo de ligantes asfálticos procedentes de la destilación del petróleo o de minas de asfaltita, produce impactos ambientales desde la exploración hasta la explotación.

La construcción de los pavimentos se fundamenta en estudios, diseños y caracterización de materiales, que permiten cumplir con las necesidades de desempeño, así como optimizar los recursos naturales y económicos empleados.

Aunado a lo anterior, el mantenimiento, conservación y rehabilitación son procesos necesarios para garantizar la durabilidad de la infraestructura vial, ya que el flujo vehicular y factores medioambientales generan deterioro. Sin embargo, estos procesos también generan residuos que pueden ser reutilizados en la estructura del pavimento.

Los procesos de demolición, fresado o recuperación de los materiales que conforman la estructura del pavimento en las técnicas de mantenimiento, conservación, rehabilitación y reconstrucción tienen dos posibles destinos. El primero es un sitio denominado vertedero, y el segundo es la recuperación y empleo del material mediante procesos in situ o su transformación en nuevos agregados para la infraestructura vial.



Figura 2.1: Ciclo de vida de los pavimentos asfálticos



3. Efectos Ambientales de los Pavimentos

América Latina se caracteriza por ser la región más urbanizada del mundo en desarrollo, según el informe "Población, territorio y desarrollo sostenible" de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), un organismo de las Naciones Unidas. Este informe destaca que en 1950, tan solo ocho ciudades latinoamericanas albergaban más de un millón de habitantes; sin embargo, para el año 2010, esta cifra había crecido a 56. Este rápido crecimiento urbano ha desencadenado una serie de cambios significativos, desde la expansión de áreas metropolitanas hasta un aumento considerable en la oferta de viviendas y servicios urbanos, así como un florecimiento en el sector de la construcción.

Aunque la construcción es un motor económico clave para el desarrollo de un país, también conlleva impactos ambientales importantes. La generación de residuos y escombros, por ejemplo, puede ocasionar contaminación, agotamiento de recursos naturales y la alteración del paisaje natural, además de perturbar los sistemas de drenaje natural. Estudios han demostrado que la actividad constructiva puede tener consecuencias significativas en el aire, el suelo y el agua, así como en el entorno visual y en las condiciones de trabajo de quienes laboran en este sector. De hecho, se han identificado hasta 47 impactos ambientales asociados con proyectos de construcción, clasificados en tres categorías principales: impactos en ecosistemas, recursos naturales y comunidad. Entre estos impactos, la generación de polvo se destaca como uno de los más adversos para el medio ambiente, seguido de cerca por la contaminación acústica, la deforestación y la contaminación del aire.

Es importante reconocer que la construcción depende en gran medida de materiales cuya extracción y procesamiento también generan impactos ambientales significativos. Estos efectos se describen a continuación.

3.1 Explotación de materiales

La Guía Minero Ambiental de Explotación, elaborada por el Ministerio de Minas y Energía en colaboración con el Ministerio del Medio Ambiente (2002), ofrece un marco para las actividades relacionadas con la extracción de minerales, incluidos los materiales de construcción.

Una vez completadas las fases de planificación y diseño, se procede a la apertura y desarrollo de los frentes mineros y obras de infraestructura necesarias para el procesamiento y aprovechamiento

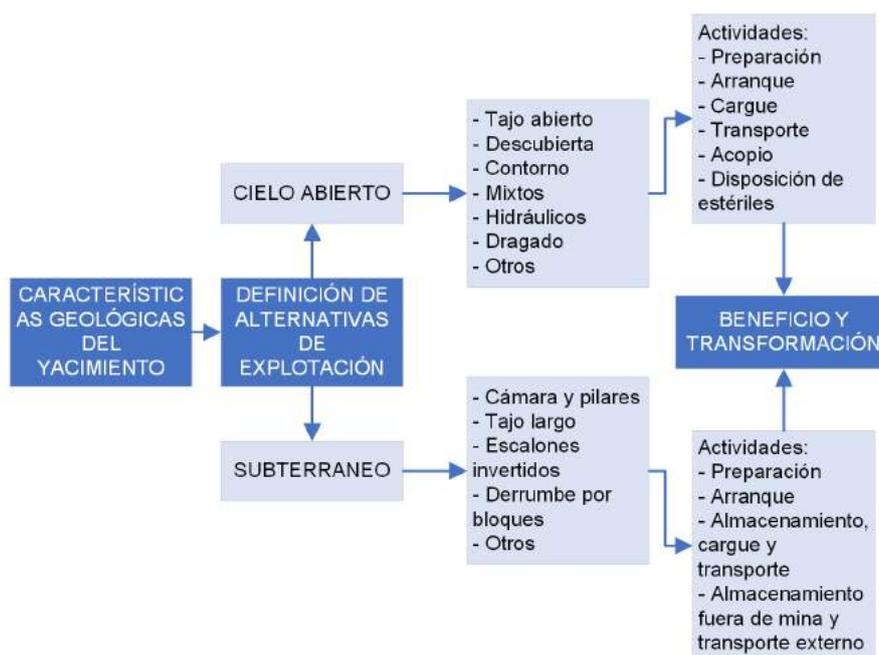


Figura 3.1: Sistemas y métodos de explotación

de los minerales. Esto implica una serie de actividades que van desde la preparación inicial hasta la puesta en marcha de las instalaciones requeridas para la extracción, almacenamiento, transporte interno y procesamiento de los materiales. La creación de frentes mineros se adapta a las particularidades del yacimiento y a la sensibilidad ambiental de la zona de trabajo, garantizando la estabilidad y seguridad durante la operación. La ejecución de estas tareas está intrínsecamente ligada a las características geológicas específicas del yacimiento en cuestión.

Además, se lleva a cabo la construcción de obras civiles e infraestructuras esenciales para respaldar y administrar las actividades mineras de manera eficiente. Estas construcciones se ajustan según las dimensiones y requerimientos específicos del proyecto minero en cuestión.

La transformación y beneficio de la materia prima extraída varían según el tipo de material y el método de extracción utilizado. Es fundamental realizar este proceso para convertir la materia prima en materiales de construcción aptos para su transporte e integración en las obras e infraestructuras requeridas.

Los impactos más significativos de las actividades mineras descritas en la figura 3.1, según la mencionada Guía, incluyen la sedimentación en cuerpos de agua, cambios en la calidad físico-química del agua, afectación de la dinámica de cuerpos de agua subterráneos y superficiales, y la disminución del caudal. Estos efectos están relacionados con la alteración de la calidad del agua, el incremento de la turbidez por sólidos suspendidos o disueltos, la modificación del drenaje natural y la colmatación de cuerpos de agua, así como los vertimientos de aguas residuales.

El aumento del material particulado y gases se origina durante la construcción de vías internas propias de la explotación minera, el cargue y transporte del mineral, la operación de maquinaria y la manipulación del mineral. También se produce por la descomposición de la roca y las voladuras. Además, se registra un incremento en los niveles de ruido debido al transporte, operación de maquinaria y voladuras.

La remoción en masa y pérdida del suelo, junto con la contaminación del mismo, son impactos asociados a la preparación y adecuación de terrenos para la construcción, montaje y explotación minera. Esto incluye la disposición de escombros y residuos sólidos y líquidos. Finalmente, el

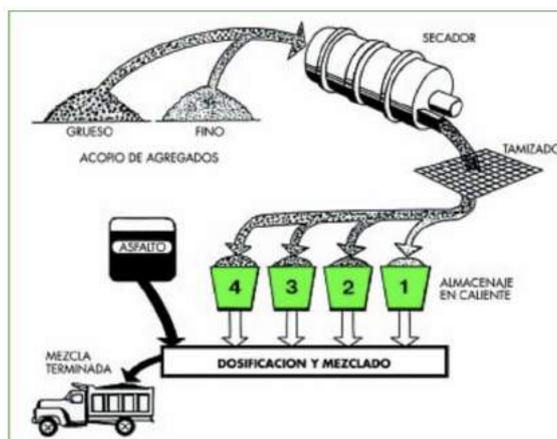


Figura 3.2: Esquema de una planta asfáltica en caliente

hundimiento del terreno y el movimiento del macizo rocoso son consecuencias de las explotaciones mineras, tanto a poca profundidad como en excavaciones profundas, que pueden causar daños a obras civiles, edificaciones e infraestructura superficial.

3.2 Producción de mezclas asfálticas

Considerando la base sobre la extracción de materiales o agregados, es crucial también analizar el proceso de producción de las mezclas asfálticas, pues es un material de construcción clave para la construcción de vías en el país.

La Asociación Europea de Pavimentos Asfálticos (2022, EAPA) explica que el asfalto utilizado en pavimentación es una mezcla de agregado mineral y ligantes asfálticos. Los agregados pueden ser naturales (explotados en canteras, ríos o minas) o artificiales, mientras que el asfalto se deriva de la refinación del petróleo crudo y se produce en diferentes grados. Una característica clave del asfalto es su termoplaticidad, que permite que se vuelva más suave cuando se calienta y se endurezca nuevamente cuando se enfría. Las mejoras en tecnologías han permitido la producción de asfalto a temperaturas más bajas, lo que reduce el consumo de energía y las emisiones de gases.

La mezcla de asfalto y agregados minerales ocurre en plantas de mezcla diseñadas para secar los agregados minerales, proporcionar los agregados gruesos y finos, para mezclarlos con el ligante en un ambiente controlado por calor.

La mezcla asfáltica se transporta desde la planta hasta el sitio de pavimentación en camiones cubiertos y aislados. Las distancias de transporte varían y solo están limitadas por la necesidad de garantizar la temperatura adecuada del material al llegar al sitio de pavimentación para su trabajabilidad y compactación.

Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en Colombia, para el mes de noviembre de 2023, en comparación con el mismo mes del año anterior, los despachos nacionales de mezcla asfáltica experimentaron un incremento del 12,6%. Los despachos destinados a la infraestructura vial urbana aumentaron un 5,9%, contribuyendo con 2,4 puntos porcentuales positivos a la variación total. Mientras tanto, los despachos para la infraestructura vial interurbana mostraron un crecimiento del 1,0%, aportando 0,6 puntos porcentuales positivos al crecimiento anual de los despachos nacionales (12,6%).

Explica Pachecho F. (2009) que no es sorprendente que, según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, las plantas de producción de mezclas asfálticas y las fábricas de producción de mantos asfálticos con este material, se encuentren entre las principales fuentes de contaminación del aire. Entre los contaminantes emitidos se incluyen el formaldehído, el

exano, el fenol, la materia orgánica policíclica y el tolueno. Además, las actividades de transporte y almacenamiento liberan compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y partículas finas condensadas. Estos procesos también pueden generar humos, gases y vapores que contienen sustancias altamente tóxicas, como el sulfuro de hidrógeno, arsénico, benceno y cadmio. Se considera especialmente peligrosa la presencia de solventes como el tolueno, el xileno y la nafta, así como el estireno, el asbesto, la sílice y el hule reciclado en el procesamiento.

3.3 Normas ambientales

En la búsqueda de un desarrollo equilibrado que responda a las necesidades actuales sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras, el concepto de desarrollo sostenible ha surgido como un principio rector fundamental. Este enfoque, definido por primera vez en el informe "Nuestro Futuro Común" de 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, establece el principio de satisfacer las necesidades presentes sin poner en riesgo la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. El desarrollo sostenible, delineado en tres pilares interrelacionados, busca un equilibrio entre el desarrollo económico, el progreso social y la protección del ambiente.

Luego de varios años y muchas cumbres que buscaban poner en práctica el desarrollo sostenible, el 15 de septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Este plan de acción, orientado hacia las personas, el planeta y la prosperidad, busca fortalecer la paz universal y promover el acceso a la justicia. En estados miembros de las Naciones Unidas aprobaron una resolución en la que reconocen que el principal desafío global actual radica en la erradicación de la pobreza. Afirmaron categóricamente que el desarrollo sostenible es inalcanzable sin lograr este objetivo fundamental. La Agenda establece 17 Objetivos con 169 metas, abordando de manera integral e indivisible las dimensiones económica, social y ambiental.

Colombia se ha destacado por liderar la implementación de agendas significativas, tales como la de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), la promoción de alianzas para abordar el cambio climático, y la adopción de estándares globales, como los establecidos por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Esto se materializó a través de la adopción del CONPES 3918 del 15 de marzo de 2018.

En este contexto, el adecuado manejo y utilización de materiales recuperados de pavimentos se vincula con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible, como el Objetivo 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), el Objetivo 13 (Acción por el Clima) y el Objetivo 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles). No obstante, se encuentra estrechamente relacionado con el Objetivo 12: "Producción y Consumo Responsables". Este objetivo se enfoca en la necesidad de asegurar patrones de consumo y producción sostenibles, lo cual implica la utilización eficiente de los recursos, la reducción de la generación de desechos y la minimización del impacto ambiental.

Adicionalmente, los Lineamientos de Infraestructura Verde Vial (LIVV), formulados en el marco de la Agenda Ambiental Interministerial suscrita por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Transporte, proponen, entre otras recomendaciones, fomentar la reutilización de materiales de excavación y residuos provenientes de obras y demoliciones, siempre que cuenten con la debida autorización de la autoridad ambiental competente. Esta orientación se alinea con la práctica de utilizar Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) en proyectos de infraestructura vial.

El concepto de "Pavimento Asfáltico Reciclado" (RAP, por sus siglas en inglés) se refiere a materiales provenientes de capas asfálticas fresadas o demolidas, clasificados como Residuos de Construcción y Demolición (RCD) según la Resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible No. 472 de 2017 en Colombia y cuya jerarquía se muestra en la figura 3.3. Esta resolución

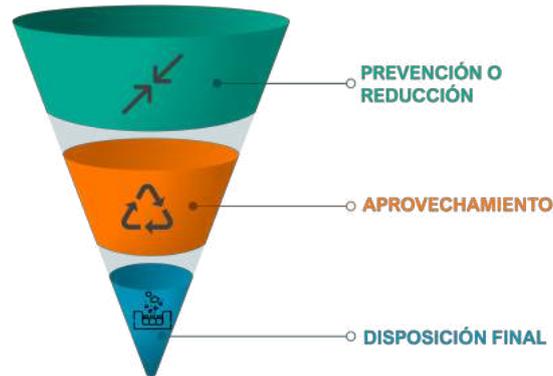


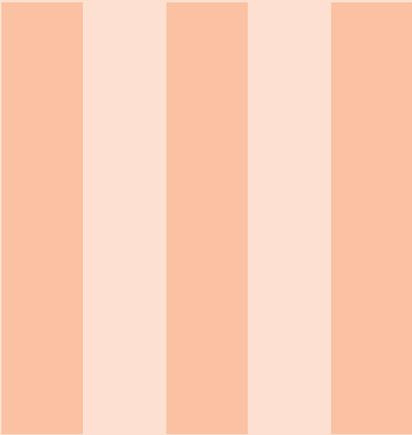
Figura 3.3: Jerarquía de gestión de RCD de la Resolución 472 de 2017.

define los RCD como los residuos sólidos derivados de actividades como excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas en obras civiles u otras actividades conexas.

El RAP experimenta un proceso de mejora al incorporar nuevos materiales de asfalto y agregados, siendo utilizado comúnmente en diversas obras. Este enfoque sostenible no solo optimiza la gestión de recursos, sino que también fomenta prácticas responsables en el ámbito de la construcción vial.

Al considerar el RAP como un Residuo de Construcción y Demolición (RCD), se convierte en un componente clave para cumplir con la normativa nacional vigente, específicamente la Resolución 1257 de 2021. Esta resolución define una jerarquía para gestionar este tipo de residuos, donde se deberán priorizar las actividades de prevención o reducción de la generación de RCD, como segunda alternativa se implementará el aprovechamiento y como última opción, se realizará la disposición final de RCD.

También, establece la obligación para grandes generadores de RCD de llevar a cabo un proceso efectivo de aprovechamiento, en un porcentaje determinado con respecto a la cantidad total de residuos generados por la obra, dependiendo de la categoría del municipio donde se ubique la obra. En este contexto, el RAP representa una oportunidad para todos los municipios, como es el caso de los municipios en categoría especial, donde las obras realizadas a partir del 1 de enero de 2023 deben comenzar a aprovechar al menos el 25 % de los residuos, y esta cifra aumentará gradualmente hasta alcanzar el 75 % para el 1 de enero de 2030.



PARTE III

4	¿Qué es el RAP?	25
4.1	Definición del RAP	
4.2	Origen del RAP	
5	Aplicaciones y ventajas del RAP	33
5.1	Aplicaciones del RAP	
5.2	Ventajas del RAP	



4. ¿Qué es el RAP?

4.1 Definición del RAP

Considerando el ciclo de vida de los pavimentos, la industria de la pavimentación ha desarrollado tecnologías para aprovechar los materiales haciendo que se reduzca la demanda de materias primas (recursos naturales no renovables) y los costos de producción de mezclas asfálticas, con los beneficios ambientales que ello conlleva. Una de ellas se presenta en la figura 4.1 donde posterior a la construcción, puesta en servicio y deterioro de la estructura de pavimentos, se debe retirar la mezcla asfáltica fallada, convirtiéndose en Pavimento Asfáltico Reciclado o RAP (acrónimo en inglés) el cual está constituido por agregados y asfalto con un alto grado de envejecimiento.

Al referirse a un material retirado y/o procesado de una capa asfáltica existente, el RAP presenta propiedades y características que dependen fundamentalmente de los materiales empleados en la composición original de las mezclas asfálticas, su grado de envejecimiento y el proceso de obtención. Por lo tanto, este material exhibe una heterogeneidad elevada en gradación, contenido de asfalto (que usualmente oscila entre 3 % y 7 % por peso) y grado de oxidación, lo que redundará en la necesidad de analizar cada uno de sus componentes (agregado y asfalto) antes de su reutilización con el fin de optimizar su aplicación. Si bien es cierto que el RAP es el conjunto de agregados y asfalto, los primeros suelen tener características adecuadas y desempeño elevado al ser materiales que cumplieron los estándares de calidad iniciales para construir las mezclas originales y durante su vida útil no sufrieron cambios relevantes, por otro lado, el asfalto contenido en el RAP presenta variaciones importantes siendo más rígido que un asfalto virgen debido a la oxidación y envejecimiento adquiridos durante su vida útil.

4.2 Origen del RAP

Como principales fuentes del RAP se establecen tres procesos a saber: a) Fresado, b) Demolición y c) Rechazo de la mezcla en planta o en obra, tal como se muestra en la Figura 4.2.

Al respecto, es preciso acotar que la determinación de fresar o demoler el pavimento se asocia a diferentes factores que involucran: 1) temas técnicos, tales como estado del pavimento, profundidad de intervención requerida, técnica de rehabilitación establecida, espacio o área a

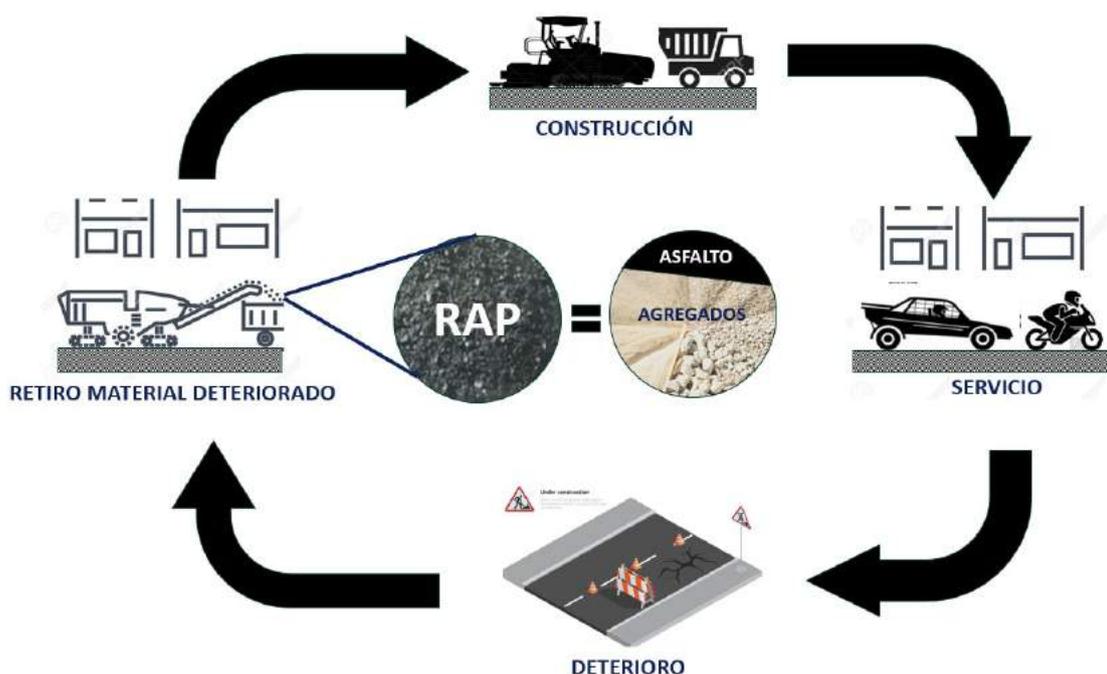


Figura 4.1: CICLO DE PRODUCCIÓN DEL RAP

intervenir, condiciones de acceso entre otras; 2) temas económicos (presupuesto, disponibilidad de equipos y tiempo requerido para la ejecución). Las ventajas y limitaciones de cada técnica se describen a continuación.

De esta manera, los métodos utilizados en los procesos de reciclaje de pavimento asfáltico pueden variar según el lugar de ejecución (en planta o *in-situ*), temperatura de desarrollo (en frío, templado o caliente), y capas o profundidades recicladas, entre otros.

4.2.1 Fresado:

Conforme con la figura 4.1, posterior al deterioro de la estructura de pavimentos, se deben realizar el retiro del material afectado siendo el fresado una de las posibles actividades para atender esta necesidad. Los equipos que permiten el desarrollo de esta labor son llamados fresadoras o perfiladoras de pavimentos, los cuales pueden realizar retiros de carpetas a profundidades controladas ya que poseen un tambor giratorio con dientes ajustables que trituran el material conforme el equipo va avanzando como se muestra en la figura 4.3. Gracias a la precisión de los equipos, es posible hacer el retiro exclusivo de la capa afectada lo cual supone una ventaja logística al no retirar más material del necesario o contaminarlo con el granular o de la subrasante.

Como resultado del fresado de mezclas asfálticas, es posible obtener una superficie plana y regular, corregir los perfiles longitudinal y transversal, así como eliminar o retirar deterioros de la capa asfáltica existente (baches, fisuras, exudación) para el apoyo de nuevas capas de mezcla, dejando una superficie rugosa capaz de unirse con la capa nueva.

Las características de granulometría y tamaño máximo del producto obtenido por fresado son función de la condición y estado de integridad de la capa a fresar, la velocidad de avance, el espesor de fresado y las características de la fresadora y del rotor (potencia, espaciado y tipo de puntas, velocidad de giro etc) tal cual como se muestra en la figura 4.4.

Así las cosas, la fresadora dependiendo de la configuración que tenga puede realizar intervenciones con anchos que van desde los 0.35 m hasta 2.2 m, junto a diferentes profundidades de fresado

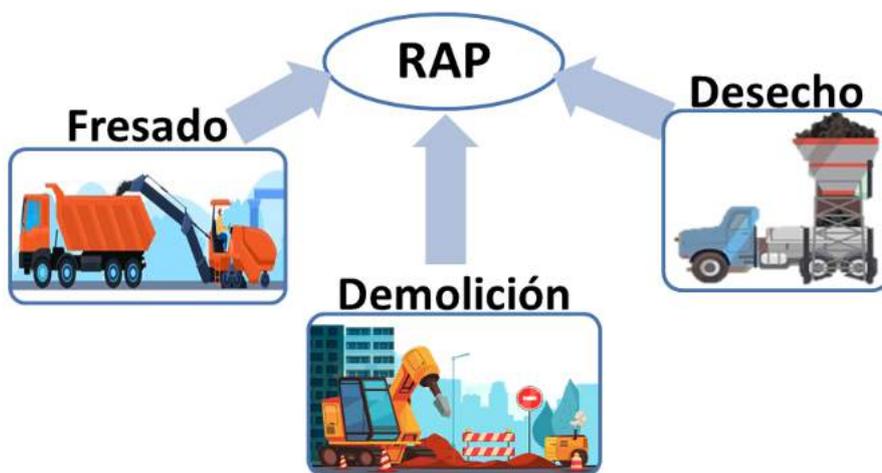


Figura 4.2: Origen del RAP



Figura 4.3: Fresado de pavimento asfáltico

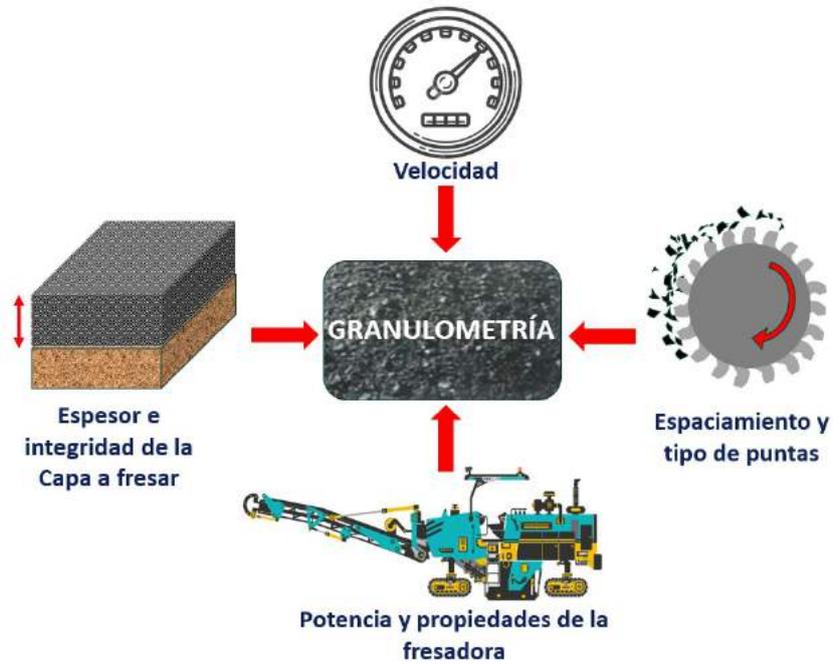


Figura 4.4: Fresado de pavimento asfáltico



Figura 4.5: Características proceso de fresado

que oscilan entre 0 mm y 300 mm (figura 4.5). De esta manera, en función de la profundidad de intervención es posible establecer dos niveles de intervención, a saber:

- Fresado tradicional (Figura 4.6 a). El fresado tradicional comprende una remoción de material entre 0 y 300mm de profundidad con una separación entre dientes de aproximadamente 15mm, como resultado de este tipo de intervención se obtiene una superficie rugosa.
- Microfresado (Figura 4.6 b). El microfresado remueve menos material que el fresado tradicional, encontrando profundidades de 0 a 30 mm con espaciamiento en los dientes de corte entre 6 y 2 mm, como resultado de esta intervención la superficie tiende a ser más lisa.

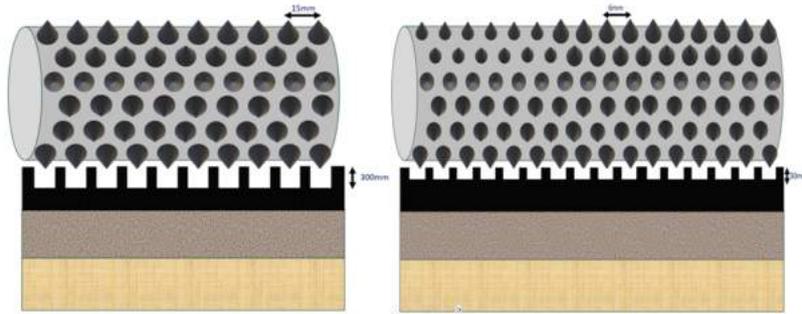


Figura 4.6: a. Fresado tradicional b. microfresado

Por lo anterior, se debe prestar especial cuidado al espesor de la capa asfáltica existente, ya que intervenciones profundas pueden contaminar los materiales asfálticos con suelos granulares, además de incurrir en costos innecesarios, mientras que intervenciones superficiales pueden conservar parte de los daños haciendo que el nuevo pavimento falle prematuramente.

El proceso de fresado constituye la mejor alternativa para hacer el retiro de las capas asfálticas deterioradas debido a su posibilidad de mantener la mezcla asfáltica retirada libre de materiales no deseables, de este modo, es aconsejable que la mayoría de las intervenciones se realicen con fresadora, no obstante, esto no siempre es posible debido a limitantes de espacio o a la falta de disponibilidad del equipo adecuado para adelantar esta labor.

4.2.2 Demolición:

Las actividades de demolición (Figura 4.7) suelen realizarse con excavadoras, retroexcavadoras, martillos mecánicos u otro equipo capaz de impactar la capa asfáltica haciendo que esta se fracture, obteniendo bloques o grandes trozos de mezcla asfáltica como se muestra en la Figura 4.8, los cuales por la naturaleza del proceso suelen presentar una alta heterogeneidad implicando tratamiento posterior de trituración y clasificación, además de contener finos de las capas granulares inferiores los cuales son considerados como materiales no deseables para la reutilización del RAP. El producto resultante de la demolición debe ser transportado a un centro de tratamiento y aprovechamiento - CTA, para su transformación y reintegro en los ciclos de vida del pavimento.

A diferencia del fresado, la demolición del pavimento es un proceso que no requiere de maquinaria especializada, por lo que se puede ejecutar en pequeñas áreas, zonas de difícil acceso o proyectos en donde el costo o disponibilidad de las fresadoras resulta inviable.

Por otra parte, las actividades de demolición pueden llegar a afectar las capas granulares del pavimento, haciendo que estas se levanten junto con los trozos de mezclas asfálticas, esto constituye un problema ya que se genera una superficie irregular la cual debe ser mejorada con la colocación de una sobrecapa que garantice la uniformidad y sirva de soporte para las capas superiores. Esta exposición de las capas granulares supone un reto importante dado que las actividades para colocar la sobrecapa deben hacerse de forma rápida o se deben contemplar actividades adicionales de drenaje para proteger la superficie expuesta de la acción del agua.

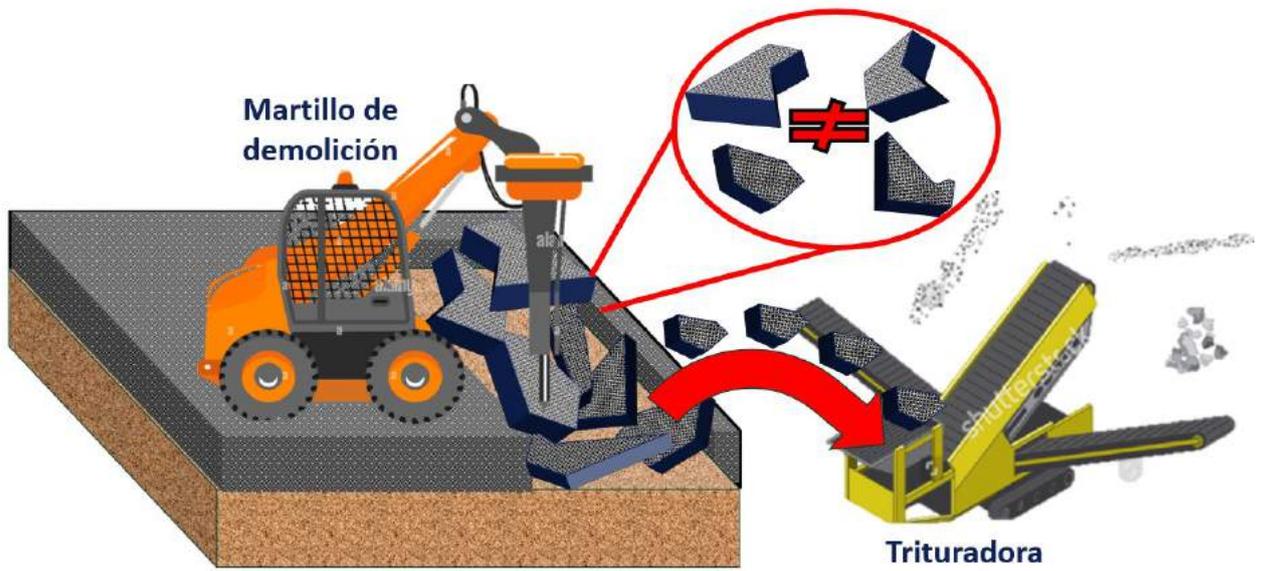


Figura 4.7: Proceso de demolición del RAP



Figura 4.8: Bloques producto de demolición

Aunque la mejor opción para retirar una capa asfáltica deteriorada es el fresado, como se mencionó anteriormente, la demolición es el método adecuado cuando las limitaciones de espacio, el radio de giro, los costos o los problemas logísticos hacen inviable el uso de una fresadora. Además, es importante tener en cuenta que la cantidad de material aprovechable obtenido mediante demolición suele ser menor que la obtenida mediante fresado, debido a la presencia de materiales no deseados adheridos a los bloques o trozos de mezcla asfáltica demolidos.

4.2.3 Rechazo de materiales en planta y obra.

Para mezclas asfálticas existen dos tipos de plantas, las que generan mezclas de forma discontinua (bacheo) es decir que mezclan los agregados y asfalto por lotes y las continuas que producen mezcla de forma ininterrumpida. Las plantas de mezcla asfáltica de tipo continuo mayoritariamente generan residuos de mezclas asfálticas en diferentes momentos de su operación como por ejemplo en la transición entre mezclas o la limpieza al final del día, este material de rechazo puede convertirse en RAP para ser utilizado de nuevo y evitar su disposición final. En la Figura 4.9 se presenta el flujo del material en planta, donde la zona izquierda representa un proceso convencional con controles de calidad adecuados que permiten el uso de la mezcla asfáltica para la construcción de nuevas estructuras de pavimentos. En la zona derecha se presenta una mezcla de rechazo debido diferentes aspectos como por ejemplo bajas temperaturas, mala gradación, transición entre mezcla o mezcla adherida a los elementos de la planta al final de la jornada, estas mezclas de agregados y asfalto son aptas para ser utilizadas como RAP. Cuando se trata de materiales material de desperdicio al inicio y cierre de operación se debe tener en cuenta que este suele tener un bajo contenido de asfalto comparado con otros materiales de rechazo. Otras formas de desechos es la mezcla rechazada de un proyecto por temperatura inadecuada, mala logística o por el resultado de las inclemencias del tiempo.

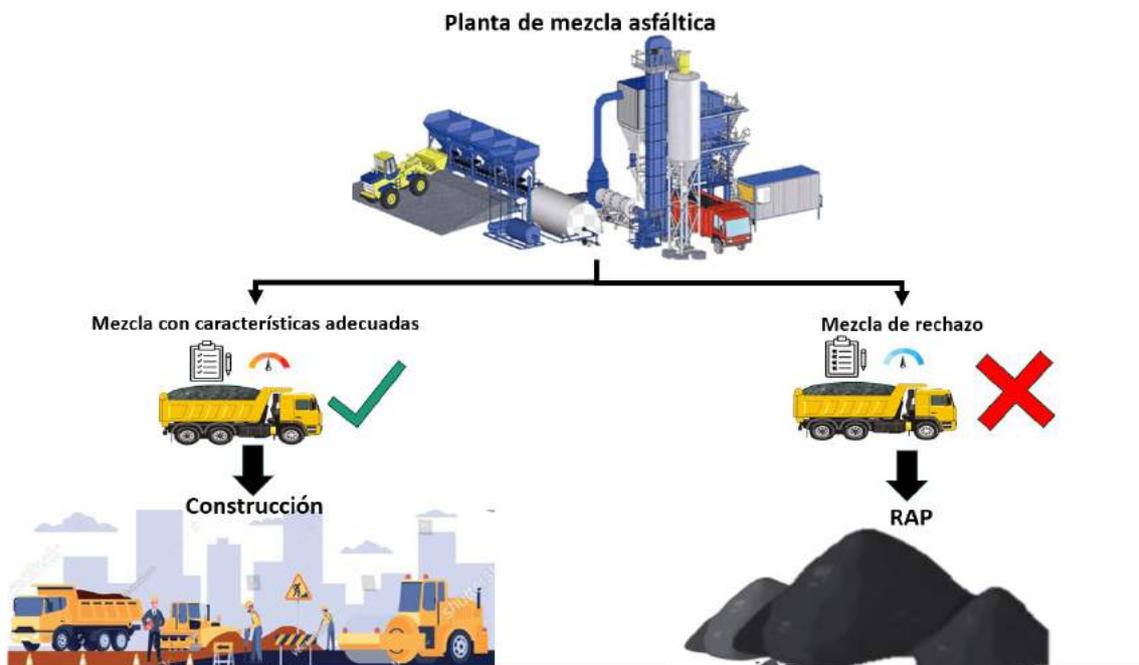


Figura 4.9: Producción de mezclas asfálticas

Debido a que estas mezclas no han sido sometidas al envejecimiento ambiental debido a años de servicio, el ligante asfáltico tiene menos envejecimiento que el RAP recuperado desde la carretera. Además, poseen menos finos que el RAP de otras fuentes al no estar sometida a procesos de

degradación para su obtención (fresado o demolición). No obstante, los materiales deben mezclarse y procesarse minuciosamente para convertirlos en materiales uniformes y para su empleo dentro de una mezcla asfáltica deben estar soportados por diseños de mezcla.

5. Aplicaciones y ventajas del RAP

5.1 Aplicaciones del RAP

El uso del RAP es variado, y puede ser empleado en diferentes partes de la infraestructura vial, abarcando desde el reciclado (como material constituyente de capas granulares –con o sin estabilización, como mejoramiento de la subrasante o como parte de los sistemas de drenaje o como llenante de geoceldas) hasta la reutilización (empleo en elaboración de mezclas asfálticas) según sus características. En la Figura 5.1, se presentan sus principales aplicaciones.

5.1.1 Aplicaciones del RAP en mezclas asfálticas

En la actualidad el uso de RAP en mezclas asfálticas cuenta con más de cuarenta años de experiencia, con tasas de reutilización bajas (<30%) a altas (30% a 100%), toda vez que cuanto mayor es la tasa de RAP mayor es el impacto en el equipo y proceso de fabricación de la mezcla, requiriéndose en algunos casos un tipo de planta específico y el uso de rejuvenecedores para tasas



Figura 5.1: Aplicaciones del RAP

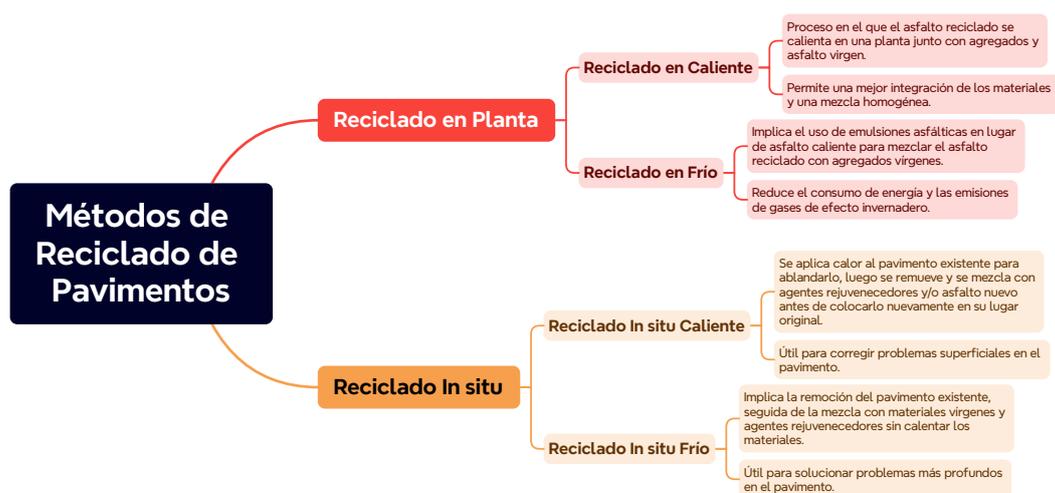


Figura 5.2: Tipos de reciclado de mezclas asfálticas

de RAP que superan el 30 %.

Cuando se trata de RAP en mezclas asfálticas es importante anotar que existen distintas metodologías para su utilización como se muestra en la figura 5.2 y se detalla a continuación.

Reciclado en Planta en Caliente

Uno de los métodos más utilizados para la incorporación del RAP en una nueva estructura de pavimentos es el reciclado en caliente en planta como se muestra en la Figura 5.3, para esto, es necesario que el RAP haya pasado por un proceso de recuperación (fresado, demolición o residuos de producción), trituración y acopio. Una vez acopiados, los agregados cubiertos de asfalto envejecido son mezclados en una planta de mezcla asfáltica (continua o discontinua) con agregados y asfalto vírgenes, como generalidad las proporciones de RAP incluida en estas mezclas varían desde 5 % hasta 50 %.

Para la producción de mezclas asfálticas en caliente en planta se implementa alguno de los siguientes procedimientos: precalentamiento del RAP y supercalentamiento de los agregados vírgenes para que exista transferencia de calor; calentamiento del RAP y el material virgen juntos a la misma temperatura; o alimentación del RAP en alguna etapa de mezclado. Después de alcanzar la temperatura deseable para los granulares y el RAP, se procede a mezclarlos con asfalto con o sin rejuvenecedor, para finalmente hacer su extendido y compactación. Se resalta que para la transformación del RAP a mezcla asfáltica siempre es necesario aplicar una metodología de dosificación o diseño de mezcla asfáltica.

En cuanto a su utilización, este método es aplicable para corregir problemas de diseño de mezcla, corregir y mantener la geometría, o como un método de rehabilitación en obra.

Reciclado en Planta en frío

El proceso de reciclado en frío de pavimentos asfálticos presenta similitudes al proceso anterior en cuanto a la recuperación, trituración y acopio del material, sin embargo, en las actividades de planta presenta la variante que los agregados vírgenes y el RAP no se calientan, de este modo, solo se realiza un proceso de mezclado. Al ser mezclas en frío, no es posible utilizar asfaltos

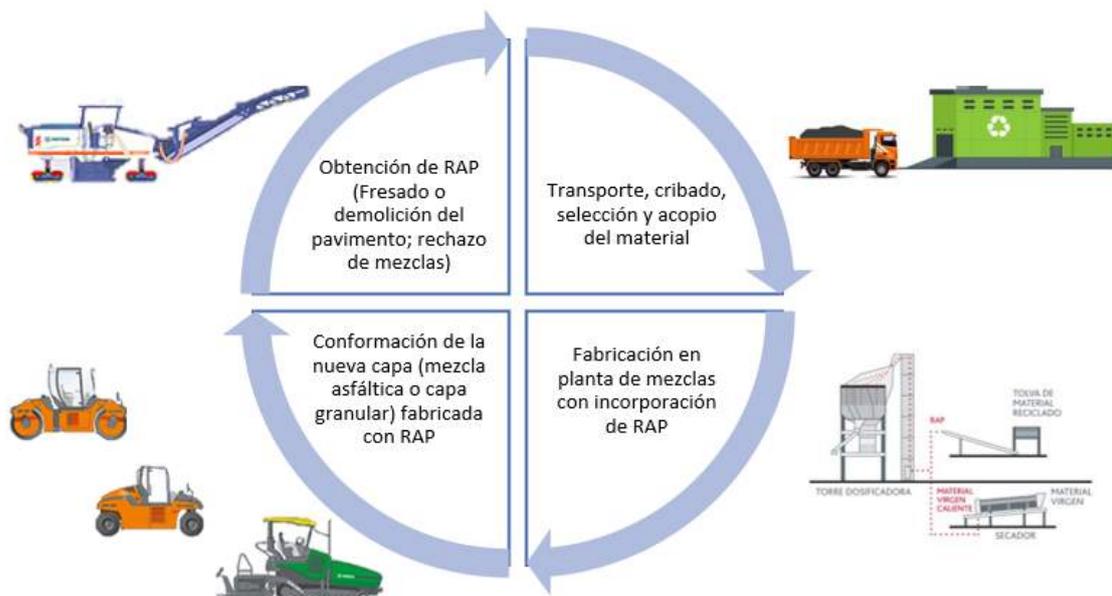


Figura 5.3: Ciclo de reutilización y reciclado de mezclas asfálticas en planta

convencionales, y por ello para su elaboración se utilizan emulsiones asfálticas, siendo común la adición de cal hidratada o cemento portland como aglutinantes de la mezcla. Como diferencia importante con el proceso anterior, este proceso de producción permite incorporar RAP hasta en un 100%. Dentro de las ventajas que supone realizar este procedimiento en planta se encuentra el mayor control en el diseño, producción de la mezcla e incremento de su resistencia y desempeño.

Esta tecnología suele usarse para corregir patologías que involucran la base y la carpeta asfáltica, sin embargo, no es apta para corregir defectos como el agrietamiento por fatiga. Como limitantes se tiene que estas capas deben ser cubiertas por un tratamiento superficial o una capa de mezcla asfáltica en caliente para protegerlas del daño por humedad, abrasión y el paso del tránsito.

Reciclado In situ Caliente

Para este tipo de intervenciones primero se debe ablandar el pavimento existente aplicando calor, después se procede con la escarificación o remoción del material, seguido de la mezcla del pavimento retirado con agentes rejuvenecedores, asfalto nuevo o mezcla asfáltica nueva, para finalmente extender y compactar la mezcla recientemente conformada.

Los equipos involucrados en esta operación se presentan en la figura 5.4 donde el primer equipo es una unidad pre-calentadora que eleva la temperatura del pavimento existente, seguida de una unidad calentadora y recicladora, la cual calienta aún más el material y lo escarifica con un set de dientes fijos que a su vez dispensan agentes recicladores. Este proceso inicial de calentamiento simula el proceso de planta, sin embargo, las unidades calentadoras aplican fuego directamente al material para calentarlo en corto tiempo, este efecto además de activar el asfalto residual también suele quemar el asfalto. Por lo anterior, se debe controlar muy bien la intensidad de calor, tiempo de aplicación y mezclado entre otros factores

El pavimento viejo es mezclado ya sea con mezcla nueva, con asfalto virgen o con el agente rejuvenecedor con ayuda de un barreno, después de esto, un compactador de rodillo neumático es usado para compactar y dar el acabado final a la capa de mezcla asfáltica.

El método de reciclado en sitio en caliente es utilizado para rehabilitar pavimentos asfálticos deteriorados con problemas simples en superficie (como descascamiento, fisuración, surcos menores, exudación, entre otros) en los cuales, la estructura del pavimento no está comprometida.

Esta técnica se utiliza principalmente cuando se requiere recubrir agregados pulidos, reconformar coronas o drenajes, modificar gradaciones, mejorar la fricción de la superficie y corregir ondulaciones entre otros fines. La profundidad típica de esta intervención está entre 20 mm y 50 mm, siendo la más común de 25 mm.



Figura 5.4: Proceso para reciclado de RAP In situ Caliente

Reciclado In situ Frío

El reciclado en frío y en sitio es la técnica mediante la cual se remueve un pavimento asfáltico existente y es reutilizado mezclándolo con materiales vírgenes, agentes rejuvenecedores o emulsiones asfálticas, todo esto sin aumentar la temperatura del material.

El reciclado en sitio puede realizarse de dos maneras. La primera es “profundidad total (full depth)” donde las capas ligadas (mezcla asfáltica) y las no ligadas (bases y subbases) son trituradas, mezcladas con asfaltos e instaladas como bases estabilizadas. La segunda manera “profundidad parcial (partial depth)” contempla la trituración de una parte de la capa ligada a una profundidad entre 50 mm y 100 mm para generar una nueva mezcla, la cual es recomendable principalmente para vías con bajos volúmenes de tránsito.

El proceso para la ejecución de los trabajos se presenta en la figura 5.5 y comienza con el fresado del pavimento existente, seguido de la adición de agentes recicladores y materiales vírgenes, extensión y compactación de la mezcla. Para el reciclado en frío en sitio se puede usar una sola maquina capaz de romper, pulverizar y agregar el agente reciclador en una sola pasada.

Este proceso es utilizado para solucionar patologías como fisuras transversales y longitudinales, ahuellamientos, restaurar la corona y pendiente transversal, eliminar huecos y áreas con desgastes. Dentro de las ventajas que supone la utilización de esta técnica de reciclado se encuentran la habilidad de mantener los perfiles originales, reducción en el costo ambiental al usar un reciclado y no consumir energía para calentarlo, reducción en costos de mantenimiento y mínima alteración del tráfico.

Finalmente, es de resaltar que la principal ventaja de las técnicas de reciclaje en sitio es la reducción o incluso eliminación del transporte de material, razón por la cual en lugares alejados donde existen importantes costos de transporte, se presenta como una mejor alternativa que el reciclado en planta, ya que el objetivo es reutilizar el material existente en un 100% , reducir costos y mitigar los impactos medioambientales.

5.1.2 Aplicaciones del RAP en capas granulares no tratadas

El uso de RAP ha sido explorado desde hace más de tres décadas, resaltándose desde 1994 como aplicaciones “probadas” su uso en capas de base y subbase granular, con la limitante del cumplimiento de gradación. La FHWA informa que el RAP ha sido utilizado en capas de base granular durante más de 20 años a partir de 1998, y que en la mayoría de los casos se ha mezclado con agregados pétreos convencionales, demostrando un desempeño satisfactorio como base granular para carreteras.

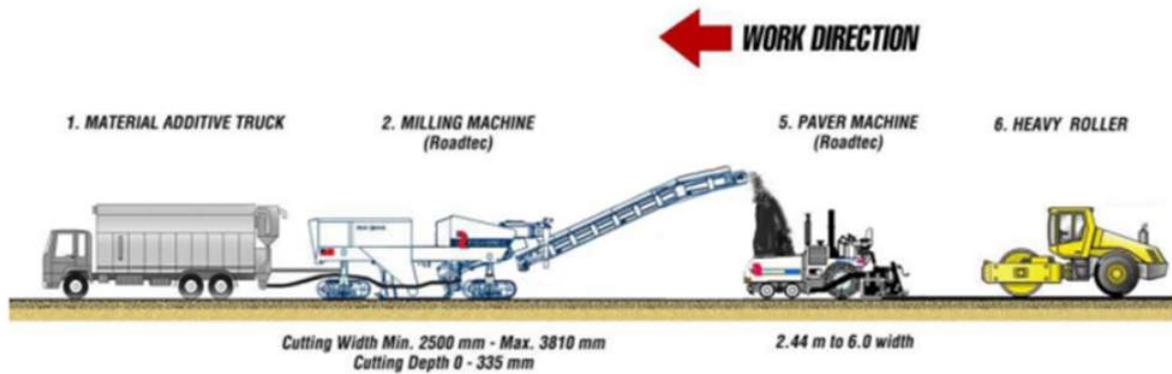


Figura 5.5: Proceso para reciclado de RAP In situ Frío

A partir de una revisión de la literatura, (Hoppe, Lane, Fitch, Shetty, 2015) resaltan que el RAP es un material pobre en términos de capacidad de carga cuando se usa solo y sin un agente aglutinante o que genere cohesión entre las diferentes partículas que lo componen, por lo que se recomienda mezclarlo con agregado virgen o bien con cemento o cal, para que los materiales adicionados puedan ayudar en la respuesta de la capacidad portante.

De esta manera, teniendo en cuenta que diferentes pruebas ejecutadas, resaltaron que elevados contenidos de RAP (>50%) presentaban dificultades en el mezclado y la compactación, lo que se traduce en baja resistencia y posibles problemas de segregación a largo plazo, se recomienda validar el porcentaje o contenido de aporte de este material que permita satisfacer los requerimientos contractuales establecidos por las especificaciones vigentes. Lo anterior, considerando que las aglomeraciones de agregado fino y ligante asfáltico pueden tender a ser maleables y exhibir deformaciones permanentes.

Aplicaciones del RAP en bases estabilizadas

EL RAP es procesado y mezclado con agentes estabilizadores y compactado de manera que obtenga una mayor capacidad mecánica en la mezcla final. Esta aplicación permite una disminución en el espesor de la capa requerida en comparación con una base granular convencional, toda vez que los materiales tratados presentan un mayor aporte desde el punto de vista estructural debido al aditivo aglutinante que se utilice.

Dentro de este tipo de aplicaciones es posible encontrar:

Capas de base y/o subbase estabilizadas con ligantes bituminosos

- **Cemento asfáltico:** Este proceso de estabilización en caliente, implica la mezcla de agregados vírgenes, cementos asfáltico y RAP en planta; de ser necesario se podrán incorporar aditivos. La capa conformada deberá satisfacer lo descrito en las especificaciones generales de construcción (Artículo 462 del Invias).
- **Emulsión asfáltica:** Este proceso implica la mezcla en frío (*in situ* o en planta), de agregado virgen, emulsión y RAP, incluyendo en algunos casos la adición de llenantes como la cal o el cemento, requiriendo un tiempo mínimo de curado. La capa conformada deberá satisfacer lo descrito en las especificaciones generales de construcción (Artículo 461 del Invias). En la figura 5.7 se presenta el esquema del tren de trabajo requerido en dicha conformación.
- **Asfalto espumado:** El proceso de mezclado en este caso se desarrolla a temperaturas medias (entre los 100°C y 140°C). El asfalto espumado se produce mediante la inyección de agua y aire a presión al asfalto caliente, para generar una espuma. La capa conformada deberá satisfacer lo descrito en las especificaciones generales de construcción (Artículo 461 del



Figura 5.6: Proceso de capas estabilizadas con cemento asfáltico



Figura 5.7: Esquema tren de ejecución capa estabilizada con emulsión

Invias). La figura 5.8 esquematiza el tren de trabajo requerido para la conformación de estas capas.

Capas de base y/o subbase estabilizadas con cemento hidráulico y cal

En este caso, la capa a conformar corresponderá a la mezcla de agregados vírgenes, RAP y cemento hidráulico o cal (mínimo 3 % en peso) y agua que deberá satisfacer los requisitos establecidos en las especificaciones generales de construcción (Artículo 350 Invias). En la figura 5.9 se esquematiza el tren de ejecución necesario para dicha actividad.

5.1.3 Otras aplicaciones

Otra de las aplicaciones comprende la utilización de RAP en bloques de asfalto como adoquines, de acuerdo a las investigaciones desarrolladas por Abdelgalil Nor (2014), Jenkins (2000), Armijos (2011) y por la empresa HANOVER de los Estados Unidos (HANOVER). La investigación liderada por Marín (2016) evaluó el desempeño de un tramo experimental construido con adoquines conformados con material de RAP, a nivel de planta se identificaron problemas de cohesión en la mezcla para contenidos por encima de 25 % de RAP. Consistente con los hallazgos anteriores, se recomienda la utilización de este material para vías con bajos volúmenes de tráfico.

También se han desarrollado tramos experimentales donde el RAP ha sido empleado como relleno en geoceldas y en muros mecánicamente estabilizados (MSE). Específicamente, en Bogotá, el IDU empleó como relleno de geoceldas 100 % RAP no procesado (material sin aditivos ni tratamiento posterior al proceso de recuperación), en la rehabilitación de cerca de 50 calles.



Figura 5.8: Esquema tren de ejecución capa estabilizada con asfalto espumado



Figura 5.9: Esquema tren de ejecución capa estabilizada con cemento

5.2 Ventajas del RAP

5.2.1 Ventajas ambientales

El uso de RAP a través de los años en infraestructura vial, ha permitido a diferentes investigadores concluir que tiene las siguientes ventajas :

Disminución en la disposición final de Residuos de Construcción y demolición: Teniendo en cuenta que el material recuperado (RAP) es reciclado o reutilizado en la conformación de nuevas capas, se presenta una disminución en los RCD obtenidos durante los procesos de mantenimiento, rehabilitación y/o reconstrucción de los pavimentos. Este contexto, permite aumentar la vida útil de estos sitios, y que sean utilizados para aquellos RCD que no son sujetos de tratamiento y/o aprovechamiento.

Reducción de la explotación de materiales de construcción no renovables: La elaboración de pavimentos flexibles vírgenes requiere la explotación de agregados de canteras y nuevos asfaltos en refinerías. Por lo tanto, el uso de RAP en nueva infraestructura vial reemplaza, dependiendo del diseño de mezcla, el uso total o parcial de materiales vírgenes.

Ahorro de energía: Un estudio realizado para el Departamento de Transporte del Estado de Nueva York, Estados Unidos, (National Technology Development LLC, 2009) evaluó cómo el uso de asfalto reciclado (RAP) en mezclas asfálticas afecta al medio ambiente y al consumo de energía. Utilizando modelos matemáticos, se examinaron aspectos como el secado, calentamiento, transporte y procesamiento del RAP, así como las energías caloríficas involucradas. Los resultados muestran que incorporar RAP en cualquier proporción conlleva ahorros significativos de energía. La cantidad de energía ahorrada varía según factores como el contenido de RAP, la humedad presente en el material reciclado y la temperatura de la mezcla asfáltica. En resumen, el estudio señala que se consumen más de 500 mil BTU (146,54 kW) adicionales de energía al utilizar agregados vírgenes en lugar de RAP.

Disminución de emisiones de CO₂: Estudios realizados han permitido demostrar que para las mezclas con un 20 % de RAP, el ahorro fue del 6,7 %, mientras que para las mezclas con un 70 % de RAP, alcanzó un 13,5 % en la situación específica considerada. Este ahorro se atribuye principalmente a la reducción del asfalto requerido y a la disminución en la extracción y procesamiento de agregados pétreos. No obstante, los autores observan que el sobrecalentamiento necesario para los agregados, derivado del uso de RAP, incrementa las emisiones durante la fabricación de la mezcla asfáltica. El ahorro de agregado asfáltico con una eficiencia de mezcla del 100 % mediante el uso del 50 % de RAP podría reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) hasta un 20 %, que es el límite superior de los beneficios proporcionados por el RAP. Chen XWang H (2018)

5.2.2 Ventajas de desempeño

Las mezclas asfálticas deben cumplir con ciertos requisitos de calidad y rendimiento para su uso en estructuras de pavimentos, y las mezclas asfálticas con inclusión de RAP no son una excepción. Por lo tanto, diversas agencias e investigadores se han esforzado por comprender la respuesta de estas mezclas ante diferentes parámetros. Se ha logrado identificar que las características de rendimiento pueden variar considerablemente según el tipo de mezcla (caliente, tibia o fría). En la Figura 5.10 se muestra un resumen de las ventajas de rendimiento que presentan las mezclas asfálticas según su tipo, las cuales se tratarán en detalle a continuación.



Figura 5.10: Ventajas de desempeño en mezclas asfálticas con inclusión de RAP

Mezclas en caliente:

Un componente importante del RAP es el asfalto que recubre los agregados, el cual con el paso del tiempo y la exposición a la intemperie se encuentra oxidado y envejecido, volviéndose potencialmente más rígido y menos deformable que el asfalto virgen. Cuando se llevan a cabo procesos de reciclaje de RAP en caliente, el asfalto envejecido se activa, lo que afecta el desempeño de las mezclas asfálticas. Por lo tanto, es posible observar que a medida que aumenta el contenido de RAP en una mezcla, la resistencia al ahuellamiento aumenta, mientras que la resistencia a la fatiga disminuye. Otros factores, como la resistencia a la tracción indirecta, el módulo dinámico y el ángulo de fase, muestran mejoras leves o exhiben comportamientos estadísticamente similares a las mezclas sin RAP.

Mezclas tibias

Para la fabricación de mezclas tibias, existen dos tecnologías ampliamente estudiadas. La primera consiste en reducir la viscosidad de los asfaltos convencionales mediante la adición de productos orgánicos o químicos que aumenten su trabajabilidad a temperaturas más bajas. La segunda tecnología empleada para fabricar mezclas tibias es la inclusión de asfaltos espumados, que son asfaltos calentados a altas temperaturas que generan un choque térmico con agua fría, produciendo espuma de asfalto que es más manejable y permite su mezclado con los agregados.

El desempeño de las mezclas tibias puede ser comparativo en algunos casos al de las mezclas asfálticas en caliente. Sin embargo, pueden presentar mayores niveles de deformación permanente a edades tempranas, posiblemente causados por la falta de envejecimiento inicial debido a la disminución de temperatura durante el mezclado y la compactación. No obstante, la adición de RAP ayuda a contrarrestar este efecto, elevando la rigidez de la mezcla y haciéndola más resistente a este tipo de deterioro.

En cuanto al daño por humedad, la presencia de RAP en mezclas tibias presenta ventajas, ya que el asfalto envejecido actúa como recubrimiento estructural de los agregados, ayudando a disminuir el potencial efecto del agua sobre ellos. Por otro lado, la inclusión de RAP aumenta el módulo dinámico, mientras que los resultados de la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la fatiga son ambiguos y varían según el estudio o la tecnología implementada en la elaboración de la mezcla.

Mezclas en frío

En las mezclas asfálticas en frío el asfalto residual o asfalto envejecido presente en el RAP no se activa, es decir que este RAP es tomado como si fuera un agregado granular. En este sentido, este tipo de estructuras es usada generalmente en vías con bajos volúmenes de tránsito donde se ha podido identificar que estas mezclas tienen comportamientos adecuados en cuando a ahuellamiento y fisuración.

Mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado

Con la búsqueda de nuevas tecnologías y la aplicación de la economía circular en los pavimentos, en las últimas décadas se ha consolidado el uso del grano de caucho dentro de las mezclas asfálticas. Esto puede realizarse de diversas formas: como reemplazo de los agregados pétreos (vía seca), como modificador del asfalto (vía húmeda) o mediante una combinación de ambas. Entre estas modificaciones, la más ampliamente aceptada y utilizada es la llevada a cabo por vía húmeda, que resulta en un asfalto con grano de caucho considerado como un material con alta resistencia al envejecimiento.

Las evaluaciones del comportamiento del RAP con adición de grano reciclado en mezclas asfálticas calientes han identificado que la presencia de asfalto con grano de caucho en la mezcla aumenta la temperatura de compactación y mezclado, así como la resistencia a la tracción indirecta, al ahuellamiento y a la fatiga. En mezclas asfálticas tibias con RAP, la adición de grano de caucho por vía seca como reemplazo de los agregados pétreos aumenta la estabilidad Marshall, la resistencia a la susceptibilidad a la humedad, la resistencia a la fatiga y la resistencia a la deformación. En mezclas asfálticas frías, la adición de grano de caucho reciclado por vía seca como reemplazo de los agregados del RAP mejora la compactación y la resistencia a la fatiga.

Debido a las intervenciones de años anteriores con grano de caucho reciclado, en la actualidad se presentan pavimentos asfálticos reciclados que fueron construidos en su momento con grano de caucho, los cuales son denominados RARP (acrónimo en inglés). Este tipo de materiales son comparables con el RAP si son rejuvenecidos adecuadamente. Bajo este supuesto, se ha evidenciado que los pavimentos con RARP son más rígidos y, por lo tanto, tienen una mejor respuesta al ahuellamiento pero una menor resistencia a la fatiga que los pavimentos con asfalto con grano de caucho virgen. La interacción del asfalto envejecido con el asfalto nuevo aumenta conforme se eleva la temperatura de mezclado. El uso de aditivos para reducir la temperatura en RARP ayuda a la interacción entre el asfalto envejecido y el asfalto virgen, mejorando la eficiencia de mezclado, pero afecta negativamente la resistencia a la fatiga de la mezcla. Para rejuvenecer el asfalto con grano de caucho envejecido, es aconsejable reponer el grano de caucho perdido por acción del envejecimiento y evaluar la posibilidad de usar aditivos que ablanden el asfalto.

Mezclas asfálticas con rejuvenecedores

El RAP presenta alteraciones considerables en las características de las nuevas mezclas asfálticas, especialmente cuando el asfalto presente el RAP se activa ya que este asfalto es más rígido por su grado de envejecimiento. Debido a lo anterior, se ha estudiado el efecto de agentes rejuvenecedores orgánicos o químicos que contribuyen a una recuperación parcial del asfalto envejecido reduciendo su rigidez, lo cual permite mejorar el comportamiento a fatiga de estas mezclas a la vez que permiten la disminución del contenido óptimo de asfalto.

Mezclas asfálticas con otros materiales reciclados.

Adicional al grano de caucho otros materiales reciclados son incorporados a las mezclas asfálticas con adición de RAP, estos materiales principalmente son asociados a aditivos rejuvenecedores y están dados por aceites reciclados, de motor, de cocina, o producto de biomasa de desechos de animales o de fibras de madera. El efecto que estos materiales tienen en las mezclas asfálticas es el mismo que se presenta en la sección de rejuvenecedores.

Capas granulares

En el caso de capas granulares, se requiere menor cantidad de agua para alcanzar el grado de compactación de la mezcla, asociado fundamentalmente al recubrimiento que proporciona el asfalto a las partículas.

5.2.3 Ventajas económicas

Desde el punto de vista económico, el aprovechamiento del RAP se constituye en una opción atractiva toda vez que presenta las siguientes ventajas significativas:

a. Menor volumen de transporte de nuevos materiales e incluso la inexistencia de transporte en algunos casos, lo que se traduce en disminución de molestias por el tráfico de obra, disminución en los costos asociados al transporte de materiales y, finalmente menor posibilidad de generación de daños a la red adyacente.

b. Ahorro en energía durante el proceso de fabricación al manejar temperaturas inferiores de producción o incluso realizarse a temperatura ambiente, lo que se traduce en disminución de costos en la producción.

c. Aumentar la cobertura en las intervenciones viales y disminuir el costo de las mismas.

IV

PARTE IV

6	Gestión del RAP: De la recuperación al uso	45
6.1	Gestión del RAP en obra - Proceso de recuperación	
6.2	Gestión del pavimento recuperado en el centro de acopio	
6.3	Trituración y Almacenamiento del RAP	
7	Diseño de mezclas con RAP	53
7.1	Diseño de mezclas asfálticas	
7.2	Diseño de capas granulares	
8	Experiencias de uso de RAP	67
8.1	Experiencias de uso de RAP en Colombia	
8.2	Experiencias de uso de RAP Internacional	
9	Equipos de construcción y listas de verificación	77
9.1	Equipos	
9.2	Listas de verificación	



6. Gestión del RAP: De la recuperación al uso

6.1 Gestión del RAP en obra - Proceso de recuperación

El RAP tiene diversas fuentes de origen. Una de las formas más comunes de obtenerlo es mediante el fresado del pavimento, que suele llamarse cepillado. Otras importantes fuentes incluyen la demolición completa del pavimento y los residuos generados en las plantas de asfalto (Ver numeral 4.2 Origen del RAP). La producción de RAP está directamente relacionada con las condiciones del pavimento deteriorado que será fresado o demolido. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis del pavimento antes de comenzar cualquier proceso de recuperación (Figura 6.1).

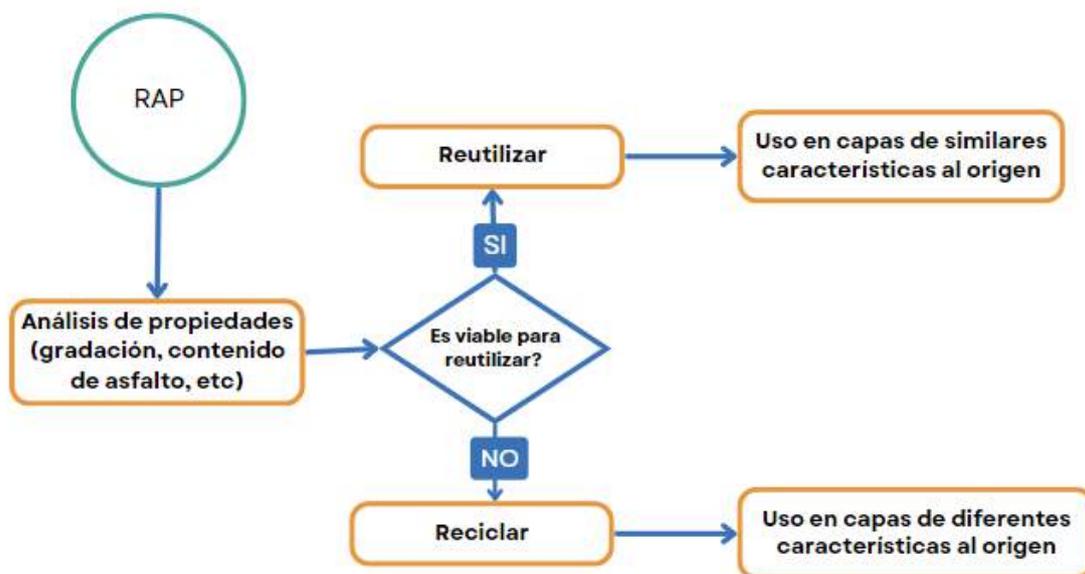


Figura 6.1: Árbol de decisión - Gestión del RAP

6.1.1 Preclasificación y evaluación del pavimento recuperado

En la primera etapa, se extraen núcleos o muestras representativas de la capa que se va a retirar. Este procedimiento tiene como objetivo establecer varios parámetros importantes, como el grosor, la granulometría, el contenido de asfalto y el volumen del material. Además, se busca identificar posibles fuentes de contaminación y determinar el destino final del material recogido.

Este análisis también ayudará a definir las estrategias de trituración primaria y secundaria en función del tamaño de la mezcla asfáltica generada durante el proceso de fresado o demolición. Se considerará la posibilidad de emplear aditivos rejuvenecedores o aportes de materiales como cal o cemento, entre otras alternativas disponibles, en caso de ser recuperado in situ.

6.1.2 Demolición del pavimento

En algunos proyectos, es necesario llevar a cabo la demolición de capas de pavimento en áreas específicas y aisladas, como por ejemplo cuando se van a realizar parches específicos, intervención de servicios públicos, o la demolición completa de un pavimento existente. En las Figura. 6.2 se muestran dos ejemplos de los escombros resultantes de la demolición de una vía y de una intervención en una área puntual. Normalmente, este proceso se limita a áreas pequeñas de pavimento.



Figura 6.2: Demolición de pavimentos

La eliminación de pavimento mediante este método es un proceso lento y produce grandes trozos de escombros que pueden ser más difíciles de procesar para convertirlos en un material reciclado utilizable. Es importante supervisar el proceso de demolición para asegurar la calidad del pavimento demolido resultante para evitar la contaminación y la presencia de materiales nocivos. Cuando los escombros del pavimento están contaminados con capas subyacentes y suelo, es preferible triturar este material y utilizarlo como material en capas de base en lugar de incorporarlo en una mezcla asfáltica.

6.1.3 Fresado del pavimento

En algunos casos, resulta estratégico emplear técnicas de fresado para eliminar capas específicas de pavimento. Por ejemplo, al planificar la repavimentación de una vía con una nueva capa de



Figura 6.3: Fresado del pavimento

rodadura delgada, puede ser ventajoso eliminar únicamente la superficie sin afectar las capas subyacentes. Este proceso permite crear una superficie con la textura adecuada para adherirse a la nueva capa por instalar. Asimismo, esta técnica es beneficiosa cuando se necesita retirar la primera capa superficial en una pasada y las capas subyacentes en otra.

El proceso de fresado se ha convertido en una técnica clave en pavimentación debido a sus diversas ventajas, como la eliminación de capas deterioradas, la restauración de pendientes y perfiles del pavimento, y la creación de una textura rugosa que mejora la adherencia con la nueva capa. Además, es un procedimiento eficiente que puede llevarse a cabo sin interrupciones significativas del tráfico, convirtiéndolo en una opción favorable para la renovación de carreteras.

6.2 Gestión del pavimento recuperado en el centro de acopio

6.2.1 Preclasificación en el centro de acopio

El proceso de ingreso del material de recuperado de pavimentos a los centros de acopio comienza con una preselección visual o predeterminada in situ, basada en los tamaños resultantes del fresado, la demolición o el rechazo del pavimento. Esta preselección determina si el material se dirige a trituración primaria, secundaria o directamente al acopio. Es crucial considerar el origen del asfalto como una variable fundamental en esta preselección, ya que los asfaltos modificados presentan procesos diferentes en la obtención de nuevas mezclas asfálticas y en la gestión de la producción de mezclas asfálticas con RAP. Además, aunque menos crítico, el nivel de envejecimiento del asfalto también debe ser considerado debido a sus características de rigidez y adherencia con el agregado virgen y el asfalto utilizado en la nueva mezcla asfáltica.

6.3 Trituración y Almacenamiento del RAP

Los objetivos básicos del procesamiento (trituración y almacenamiento) del RAP son:

- Crear una reserva uniforme de material
- Reducir y controlar el tamaño máximo de la partícula para que pueda ser empleado en diferentes gradaciones de mezcla.



Figura 6.4: Fresado de capa superficial de pavimento para proceso de repavimentación



Figura 6.5: Clasificación en el centro de acopio

De esta manera, la trituración del RAP puede llevarse a cabo mediante procesos de impacto o por trituración con mandíbula, y esta elección depende principalmente del tamaño y la dureza del material. Sin embargo, para materiales de gran tamaño, se prefiere comenzar con procesos de impacto y luego reducir los tamaños mediante la trituración con mandíbula.

Los materiales resultantes de los procesos de trituración (ya sea por impacto o mandíbula) deben ser dispuestos de manera que se garanticen dos aspectos fundamentales. En primer lugar, los tamaños producidos deben ser clasificados por granulometría y por las características del origen del asfalto, evitando mezclar asfaltos modificados con polímeros o gránulos de caucho con asfaltos no modificados, ya que estas diferencias pueden provocar diseños de mezclas muy heterogéneos o dificultar su proceso de reciclado. En segundo lugar, los procesos de acopio deben tener limitaciones en cuanto a su altura para prevenir la consolidación del material o la formación de aglomeraciones, además de proteger el material para evitar su segregación y cubrirlo para evitar la absorción de humedad del medio ambiente.



Figura 6.6: Trituración en el centro de acopio

Recomendaciones de evaluación y muestreo

El proceso de caracterización resulta fundamental para la determinación de la variabilidad de los materiales objeto de estudio, permitiendo establecer la calidad del material y la implementación de estrategias de gestión del mismo. En este orden de ideas, la caracterización del RAP se enfoca entre aspectos fundamentales que se presentan en la Figura 6.7.

A fin de establecer la variabilidad del material procesado, y garantizar que los acopios sean lo más homogéneos posibles, se recomienda ejecutar como mínimo los ensayos de caracterización que se presentan en la Tabla 6.1:

Recomendaciones de almacenamiento

Teniendo en cuenta las características del RAP, a continuación se presentan lineamientos mínimos a considerar durante su acopio, a fin de garantizar el adecuado aprovechamiento y desempeño del material:

- Cada uno de los acopios debe estar caracterizado y ser lo más homogéneo posible, siguiendo una forma cónica.
- Se deben evitar sobretamaños.



Figura 6.7: Caracterización de RAP

Tipo de ensayo	Norma	Número requerido / Frecuencia	Observaciones
Inspección visual	-	Cada que llega nuevo material	Verificar homogeneidad y presencia de materiales extraños/nocivos
Análisis granulométrico	INV E782	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Contenido de ligante	INV E732	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Contenido de humedad	INV E755	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Densidad máxima Rice	INV E735	1 @ 3000 t	Mín. 3 pruebas por acopio
Penetración del ligante	INV E706	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Punto de ablandamiento	INV E712	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Índice de penetración	INV E724	1 @ 1000 t	Mín. 5 pruebas por acopio
Viscosidad absoluta	INV E716/717	Acopio	
Caras fracturadas	INV E227	Mín. 1 @ 1000 t	Si el lote excede 5000t, aumentar 1 @5000t
Índices de forma (alargamiento y aplanamiento)	INV E240	Mín. 1 @ 1000 t	Si el lote excede 5000t, aumentar 1 @5000t
Desgaste en máquina de los ángeles	INV E218	Mín. 1 @ 1000 t	Si el lote excede 5000t, aumentar 1 @5000t
Equivalente de arena	INV E133	Mín. 1 @ 1000 t	Si el lote excede 5000t, aumentar 1 @5000t

Tabla 6.1: Ensayos de caracterización sugeridos para evaluar variabilidad

- El material deberá ser clasificado en fracciones lo más parecidas a la de los agregados normalmente empleados en la fabricación de la capa (Fraccionamiento del RAP).
- La zona donde se disponga el material deberá estar cubierta (techado) para proteger el material de la lluvia. Así mismo, se recomienda que el tiempo de almacenamiento sea mínimo para evitar que el contenido de humedad del material aumente.
- Se recomienda que el material sea dispuesto sobre zonas consolidadas o pavimentadas, con el fin de evitar la contaminación con suelos naturales. En caso de disponer sobre terreno natural, no se deben emplear los 15 mm inferiores del acopio.
- Con miras a prevenir aglomeración del material se recomienda que una altura máxima de 3.0m en el acopio.
- El terreno sobre el cual se dispone el material deberá tener una pendiente mínima (se recomienda superior o igual al 2,5 %) para garantizar un adecuado drenaje.
- El volumen de cada acopio deberá ser suficiente para garantizar, al menos, el trabajo de un día o la producción requerida si ésta es menor, con objeto de no cambiar la fórmula de trabajo y poder controlar e identificar adecuadamente la mezcla fabricada.
- Cada acopio deberá mantenerse limpio, libre de suciedad, desechos de otros materiales o vegetación.
- Se debe evitar la circulación de vehículos pesados en la parte superior del acopio, con el fin de evitar la compactación del material.



7. Diseño de mezclas con RAP

7.1 Diseño de mezclas asfálticas

Las mezclas asfálticas en su forma más básica se componen por agregados pétreos y ligantes asfálticos como se muestra en la Figura 7.1. Debido a la variedad de ligantes y fuentes de materiales pétreos, no es posible estandarizar unas proporciones ideales de agregados y ligante que sean adecuadas para todas las mezclas asfálticas, por esta razón surge la necesidad de realizar un diseño de mezcla con el cual se busca determinar las proporciones ideales con las cuales la mezcla asfáltica alcance características adecuadas.

Los métodos de diseño que involucran pavimento asfáltico reciclado tienen como parámetros de entrada la caracterización del material bituminoso existente, determinando la gradación, contenido de asfalto y propiedades del asfalto recuperado como se muestra en la figura 7.1, adicionalmente, se debe tener en cuenta que para algunos fines es necesario adicionar otros materiales vírgenes ya sean agregados pétreo, asfalto virgen, rejuvenecedores u otro material necesario para mejorar las características de la mezcla o para cumplir con alguna especificación en concreto. No obstante, cada método tiene variables y objetivos particulares. A continuación, se presentan algunos métodos de diseño para obtener la fórmula de trabajo de mezclas con adición de RAP:

7.1.1 Marshall Modificado (Para uso en mezclas frías con emulsión asfáltica)

Este método es volumétrico, lo cual quiere decir que busca satisfacer ciertas condiciones de densidad, porcentaje de vacíos, y vacíos en agregados minerales. En la figura 7.1.1 se presenta el flujo-grama a seguir para llevar a cabo este método, donde se deben preparar muestras con diferentes contenidos de emulsión y un porcentaje de humedad de 3% (distribuida entre el agua en la emulsión y agua en el RAP + agua añadida). Estas muestras se compactan mediante 50 golpes por cara y se dejan curar de 16 a 24 horas. Fabricadas las muestras, se realizan ensayos de gravedad específica bulk (INV E 733), estabilidad (INV E 748), flujo (INV E 748) y contenido de vacíos (INV E 799) de los cuales es posible determinar el contenido óptimo de emulsión. En seguida, se fabrican muestras con el porcentaje óptimo de emulsión y se varía el contenido de humedad en 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,5% y 4%, a las cuales se les realizan los ensayos descritos anteriormente, determinando el contenido óptimo de humedad.

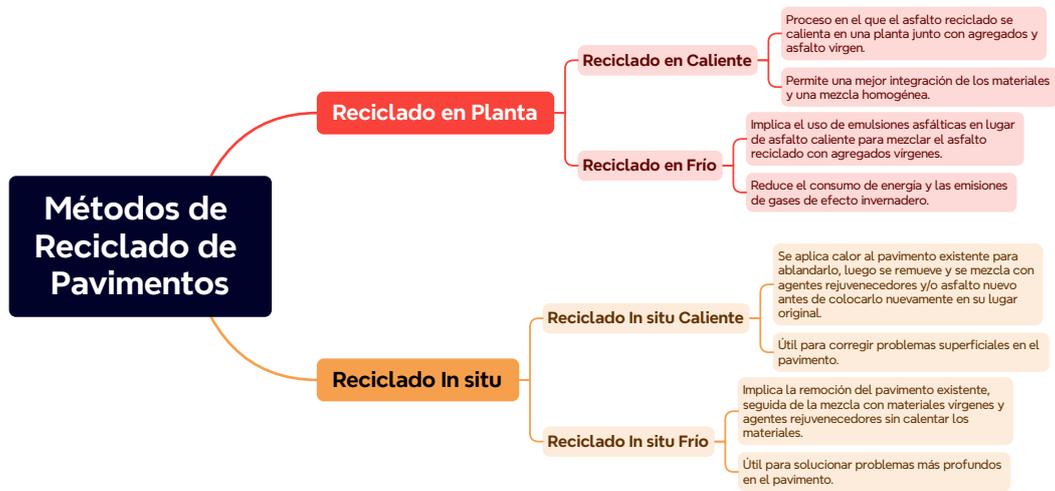


Figura 7.1: Composición básica de una mezcla asfáltica.

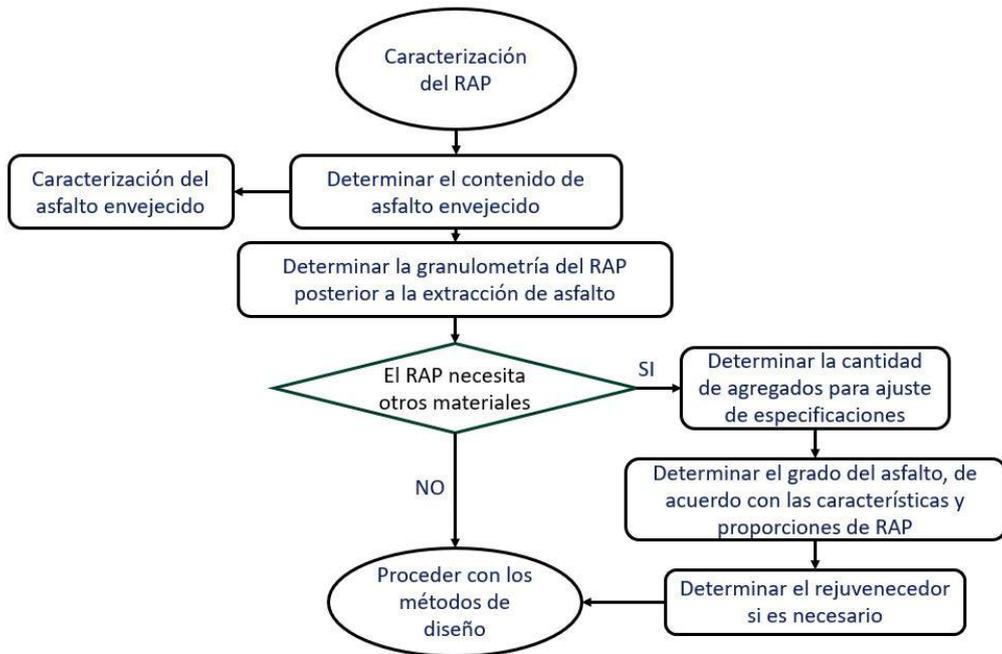


Figura 7.2: Caracterización RAP

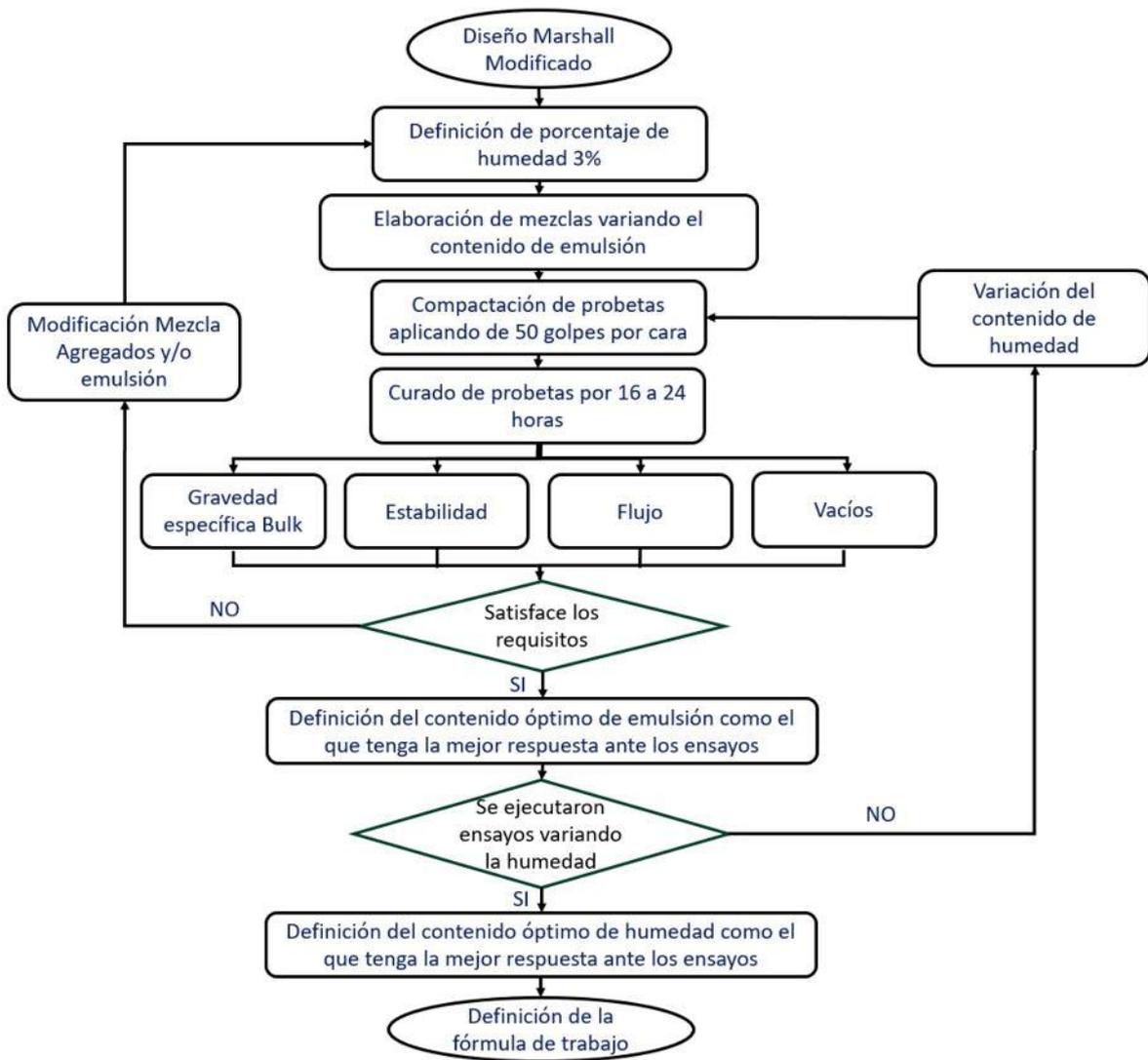


Figura 7.3: Diseño Marshall

7.1.2 Método Hveem

Este método tiene por objetivo asegurar la durabilidad a largo tiempo del pavimento, por esta razón algunos departamentos de transporte como el de Nevada (EE.UU) lo utiliza para elaborar sus diseños de mezcla. este método se presenta en la figura 7.1.2 y comienza con una definición preliminar el contenido óptimo de asfalto por experiencias previas o por el método de centrífuga de Queroseno, posterior a esto se realizan ensayos de Estabilidad, Densidad, hinchamiento y contenido de vacíos. De las muestras elaboradas, se seleccionan los 3 contenidos de ligante que no presenten exudación, enseguida se seleccionan los dos contenidos de ligante que cumplan con estabilidad mínima. Por último se selecciona el contenido de ligante que cumpla con el 4% de vacíos.

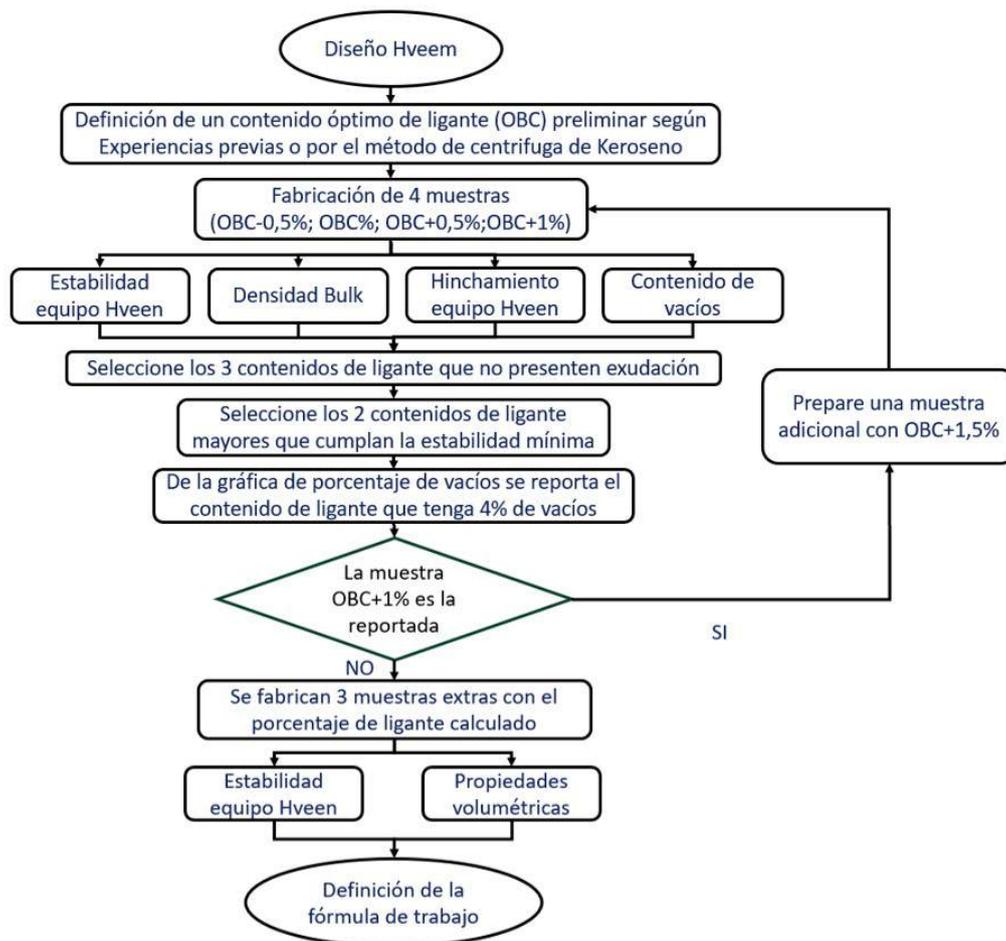


Figura 7.4: Diseño Hveem

7.1.3 Método de diseño por balanceo

Este método incluye ensayos de desempeño para evaluar diferentes patologías de las mezclas asfálticas, de esta forma para el desarrollo del diseño por balanceo, se presentan cuatro enfoques:

Diseño volumétrico con verificación de desempeño:

Este enfoque es el más conservador. En la Figura 7.5 se presenta el flujo del método, donde se realiza un diseño teniendo en cuenta las características volumétricas, como Marshall, Hveem o Superpave, para determinar un contenido óptimo de asfalto. Posteriormente, se llevan a cabo ensayos de ahuellamiento (INV E 756) y fatiga (INV E 808/784) para verificar que la mezcla

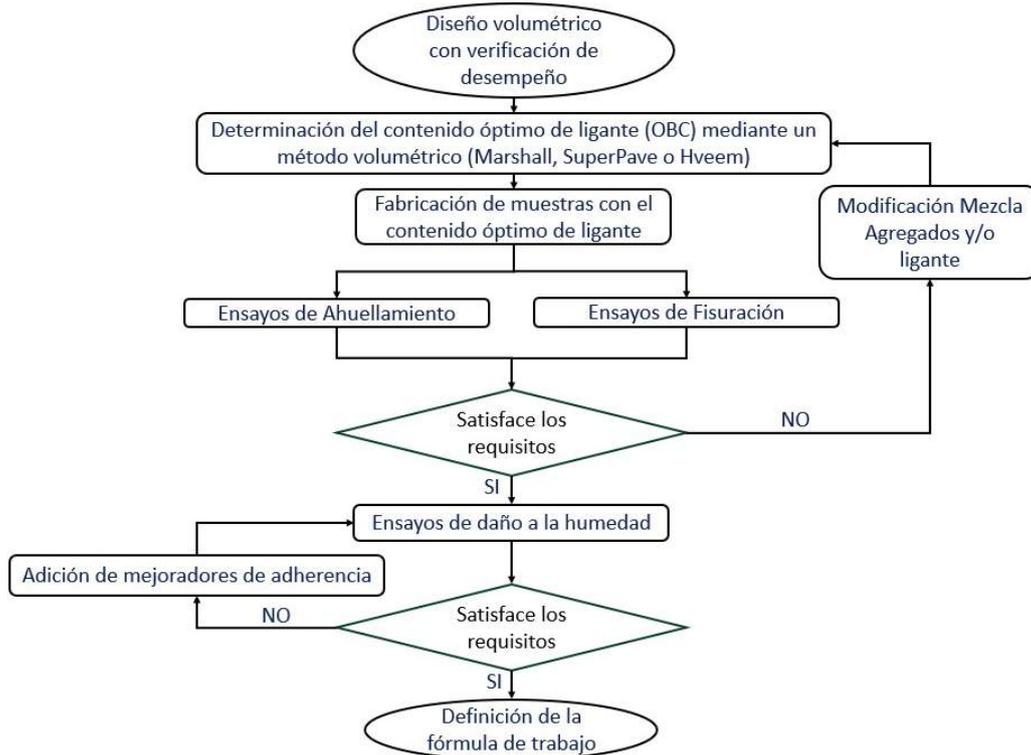


Figura 7.5: Diseño volumétrico con verificación de desempeño

cumpla con estos criterios. Si la mezcla cumple con los requisitos de ahuellamiento y fatiga, se procede a determinar el daño por humedad (INV E 725), y finalmente se alcanza una fórmula de trabajo. En caso de que las verificaciones no satisfagan los criterios de ahuellamiento y fatiga, se ajustan las proporciones de los materiales. Si el daño por humedad no se cumple, se pueden agregar agentes mejoradores de adherencia.

Diseño volumétrico con optimización de desempeño:

Este enfoque es una extensión del anterior, donde después de realizar el diseño volumétrico, se evalúa el contenido óptimo de asfalto y dos contenidos adicionales, con un incremento o decremento de $\pm 0,3$ o $0,5\%$ respecto al contenido óptimo. A estas tres muestras se les realizan ensayos de desempeño, como ahuellamiento (INV E 756) y fatiga (INV E 808/784), para verificar cuál de las mezclas cumple con estos requisitos, definiéndola como la mezcla óptima de asfalto. Con el nuevo contenido de asfalto determinado, se procede a evaluar el daño por humedad (INV E 725), para finalmente llegar a una fórmula de trabajo definitiva. En caso de que las verificaciones no satisfagan los criterios de ahuellamiento y fatiga, se ajustan las proporciones de los materiales. Si no se cumple con el daño por humedad, se pueden agregar agentes mejoradores de adherencia. El procedimiento descrito anteriormente se representa en forma de flujograma en la Figura 7.6.

Diseño volumétrico de desempeño modificado:

Este método es menos conservador que los anteriores y como se presenta en la Figura 7.7 comienza con un contenido inicial de asfalto estimado por un método volumétrico (Marshall, Hveem, o superpave), después se realizan ensayos de ahuellamiento (INV E 756) y fatiga (INV E 808/784), con los cuales se modifica el contenido óptimo de asfalto para alcanzar el mejor resultado, enseguida se verifica el daño por humedad (INV E 725) y finalmente se evalúan las propiedades volumétricas de la mezcla. Si todos los requisitos se satisfacen, se elige este contenido como el

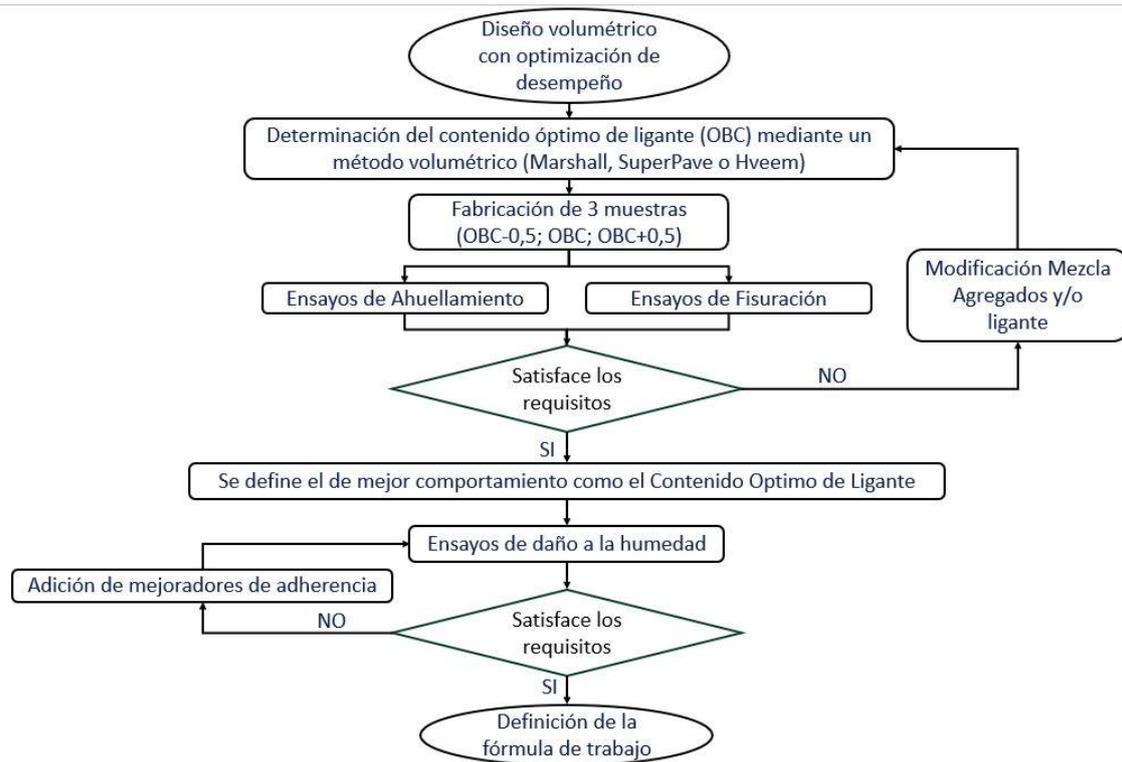


Figura 7.6: Diseño Volumétrico con optimización de desempeño

óptimo.

Diseño por desempeño:

Este enfoque es el que permite mayor innovación. En la Figura 7.8 se evidencia que el diseño comienza con la selección de un contenido de asfalto con otros tres intervalos definidos como $\pm 0,3$ o $0,5\%$ del contenido de asfalto determinado. Se realizan ensayos de ahuellamiento (INV E 756) y fatiga (INV E 808/784), el contenido de asfalto que satisface este requerimiento es definido como el óptimo, después de esto se realizan ensayos de daño por humedad (INV E 725), si la mezcla satisface este criterio es definida la formula de trabajo, de lo contrario, se deben hacer ajustes a las proporciones o tipos de materiales.

7.1.4 Superpave

Para este método de diseño se seleccionan 4 contenidos de asfalto diferentes con intervalos de $0,5\%$. Para cada contenido de asfalto se debe preparar la cantidad de mezcla necesaria para poder elaborar dos probetas en el compactador giratorio. Se selecciona el contenido de asfalto que satisfaga el criterio de 4% de porcentaje de vacíos (INV E 799). Después se realiza el ensayo de susceptibilidad a la humedad (INV E 725), donde se evalúa que este parámetro sea superior a 80% , de ser así, se toma esta mezcla como la formula de diseño, de lo contrario se deben ajustar los parámetros y volver a ejecutar el diseño, el procedimiento completo con su paso a paso se presenta en el flujo-grama de la Figura 7.9.

7.1.5 Método de diseño de mezcla Chevron para mezclas en frío

Este método consiste en evaluar las características del RAP como la gradación (INV E 782), contenido de asfalto y características del asfalto recuperado (INV E 732), seguido de la selección de

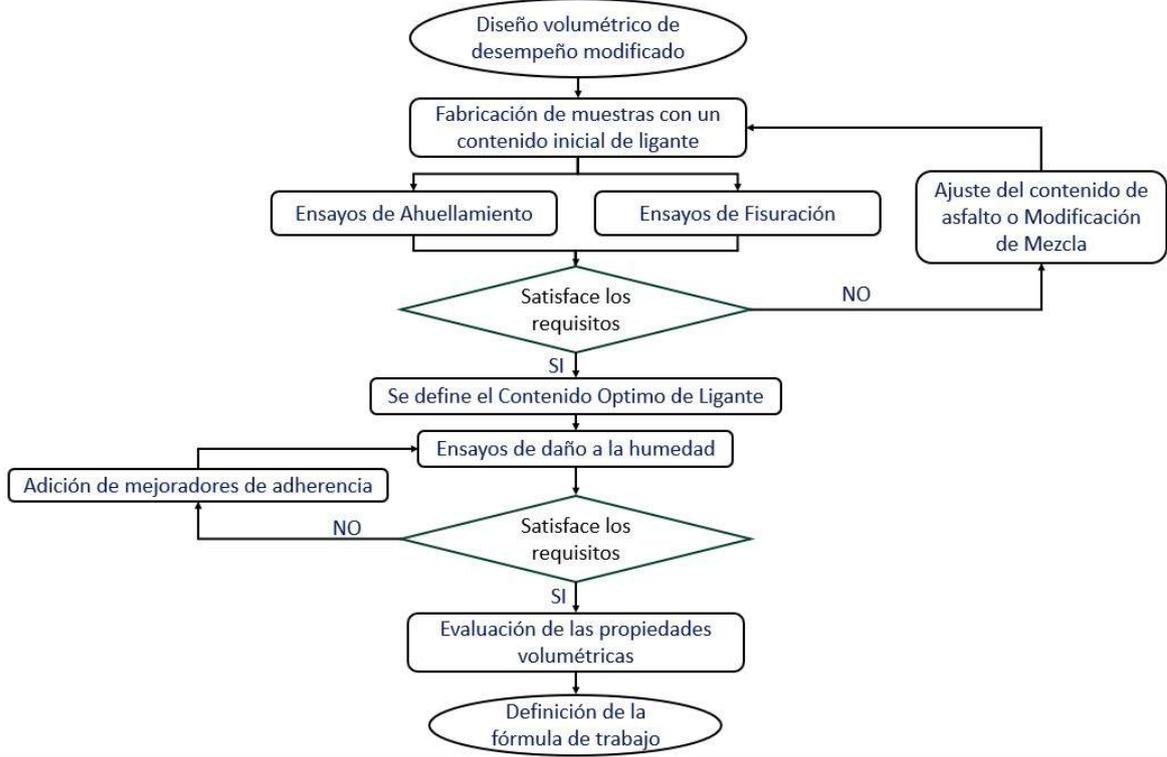


Figura 7.7: Diseño Volumétrico de desempeño modificado

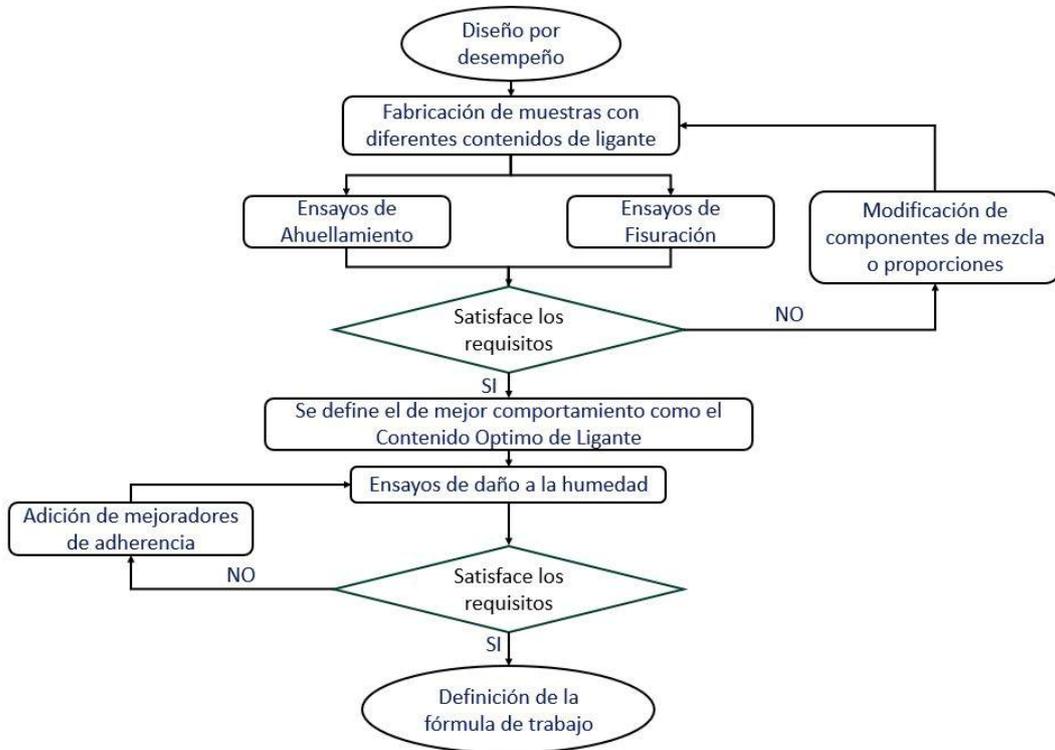


Figura 7.8: Diseño por desempeño

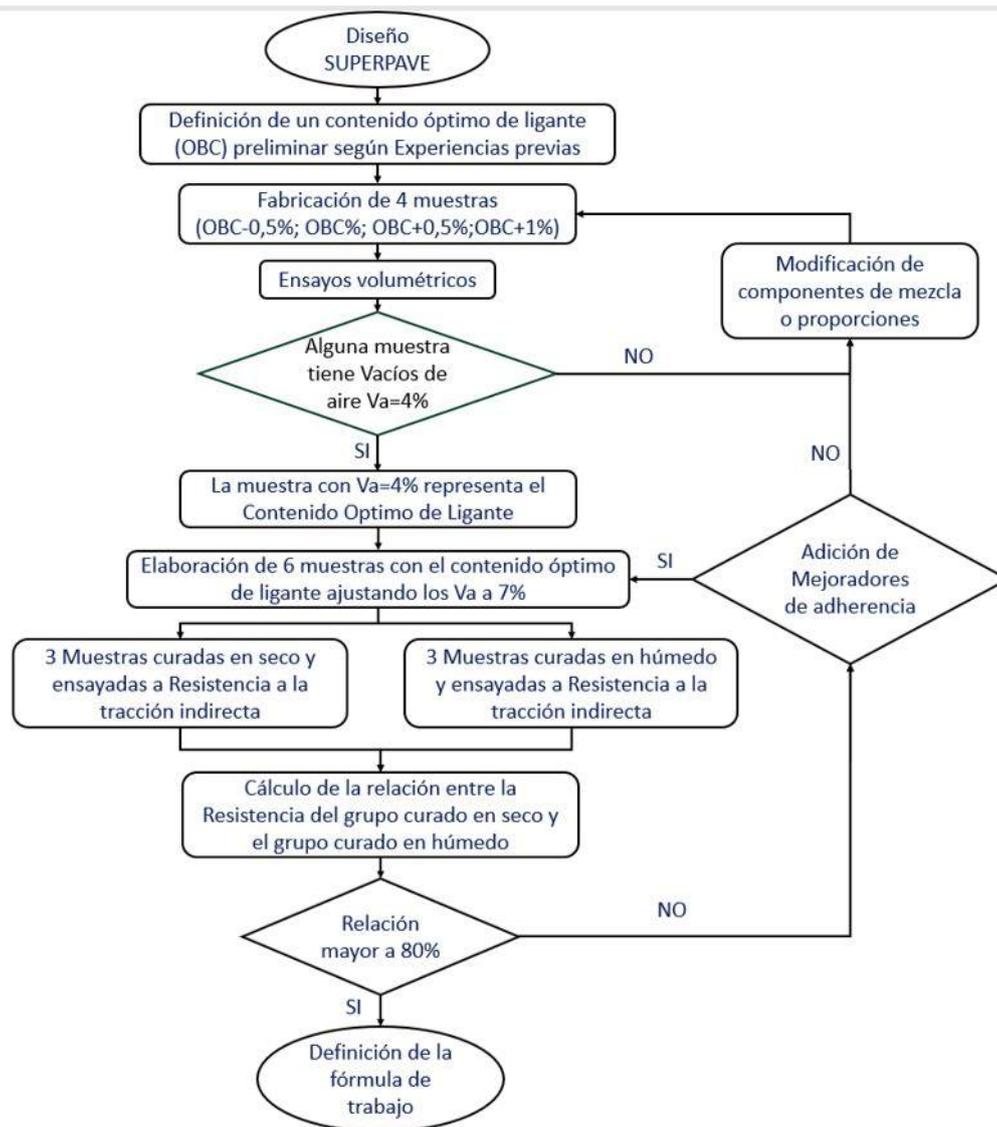


Figura 7.9: Diseño SUPERPAVE

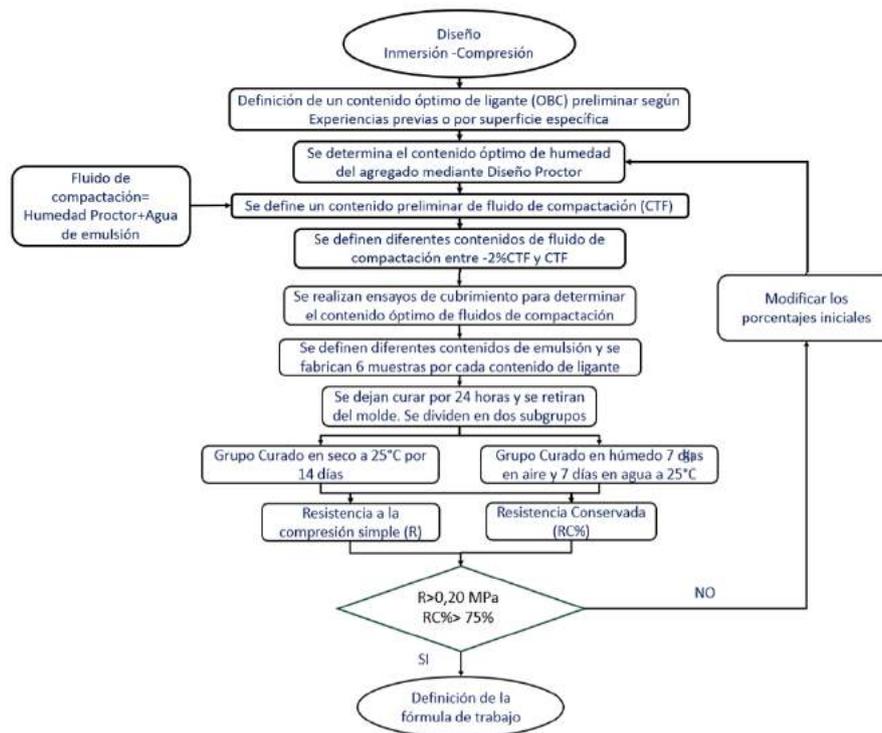


Figura 7.10: Diseño inmersión-Compresión

la cantidad de RAP que se desea utilizar. Definido esto, se procede a fabricar muestras con diferentes contenidos de emulsión separándolas en tiempos de curado inicial y total. A estas muestras se les realizan pruebas para identificar el contenido óptimo de emulsión, determinándolo como el contenido mínimo de emulsión necesario para satisfacer los requerimientos de módulo resiliente (INV E 749), estabilidad (INV E 748) y cohesión.

7.1.6 Método basado en Inmersión-Compresión

Este método determina la pérdida de cohesión en mezclas bituminosas por la acción de la humedad. Para este diseño, se emplea el ensayo de inmersión compresión según la norma INV E-621, el cual se resume en la Figura 7.10 y muestra los pasos de diseño que comprenden los métodos para fabricar las muestras y separarlas en dos grupos para realizar un curado en seco (24 horas al aire a 25°C) para el grupo 1 y un curado en húmedo (24 horas en agua a 60°C y después 2 horas en agua a 25°C) para el grupo 2, las cuales son falladas posteriormente mediante compresión simple, determinando una resistencia en seco y una húmedo, las cuales al ser contrastadas dan como resultado la resistencia conservada. Este mismo procedimiento se realiza sobre diferentes testigos variando el porcentaje de emulsión, tomando como la fórmula de trabajo el porcentaje de emulsión que satisfaga los requerimientos de las especificaciones (generalmente 0,20 MPa para la resistencia en seco y 75% de resistencia conservada)

7.2 Diseño de capas granulares

Considerando los beneficios ambientales, técnicos y económicos descritos previamente, se busca el aprovechamiento del RAP para la construcción de capas granulares (no tratadas y tratadas), empleadas en la conformación de estructuras de pavimento. El proceso de diseño del tipo de capa a emplear permite definir la proporción de materiales que garantizará el cumplimiento de la

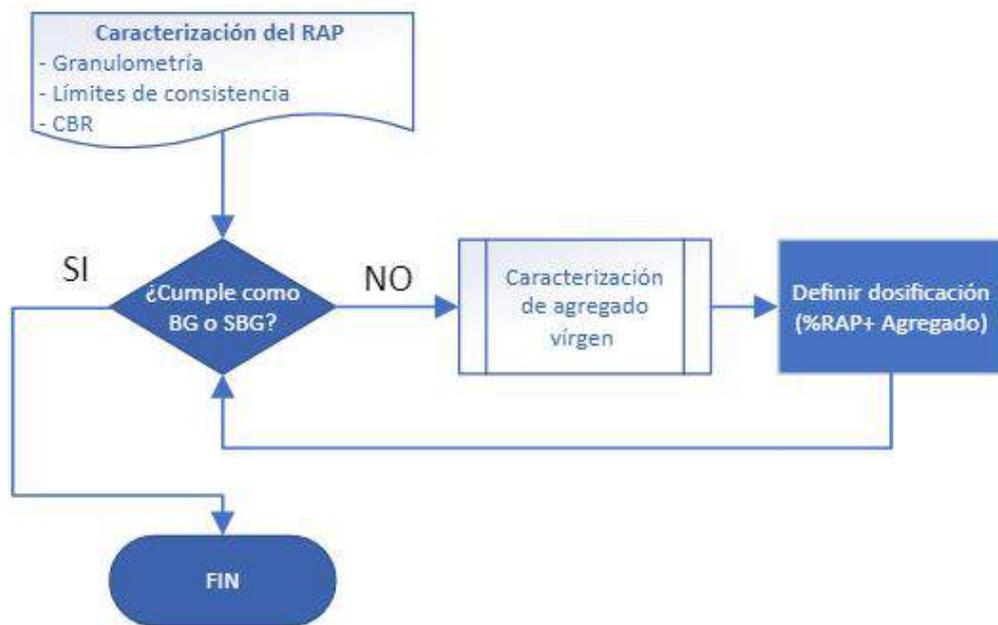


Figura 7.11: Proceso diseño capas granulares no tratadas

especificaciones, así como el adecuado comportamiento de dicha capa.

La proporción de agregado virgen y RAP, que definirá la fórmula de trabajo, se establece en función de la calidad de los materiales que los constituyen, las características de gradación y resistencia establecidas en las especificaciones generales de construcción que rigen el contrato (según el nivel de tráfico).

Aunado a lo anterior, se recomienda que el agregado de aporte (agregado virgen) presente características mineralógicas similares a las del agregado reciclado.

7.2.1 Capas granulares no tratadas

Tomando como referencia experiencias previas, se recomienda emplear en capas de base granular un menor aporte o proporción que en capas de subbase granular, estableciéndose en el primer caso tasas hasta del 40% y en el segundo hasta del 60% (sujeto al desempeño de la combinación agregado virgen + RAP).

En la figura 7.11 se presenta el proceso a seguir para la determinación de la fórmula de trabajo.

7.2.2 Capas granulares tratadas

- **Emulsión asfáltica:** El diseño se establece tomando como referencia el ensayo de resistencia INV E-622 y el cumplimiento el umbral de susceptibilidad a la humedad (TSR), norma INV E-725.

La figura 7.12 sintetiza el proceso de diseño establecido.

- **Asfalto espumado:** El diseño de mezcla se fundamenta en los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (ITS), norma INV E-785 y susceptibilidad a la humedad (TSR), norma INV E-725. Así mismo se debe garantizar la relación de expansión y vida media del asfalto espumado. En la Figura 7.13 se esquematiza el proceso de diseño establecido para esta aplicación, resaltando que, en caso de ser necesaria la incorporación de *filler* o llenante mineral (usualmente cal o cemento), se realizará con el fin de mejorar la adhesión y dispersión del asfalto en la mezcla.

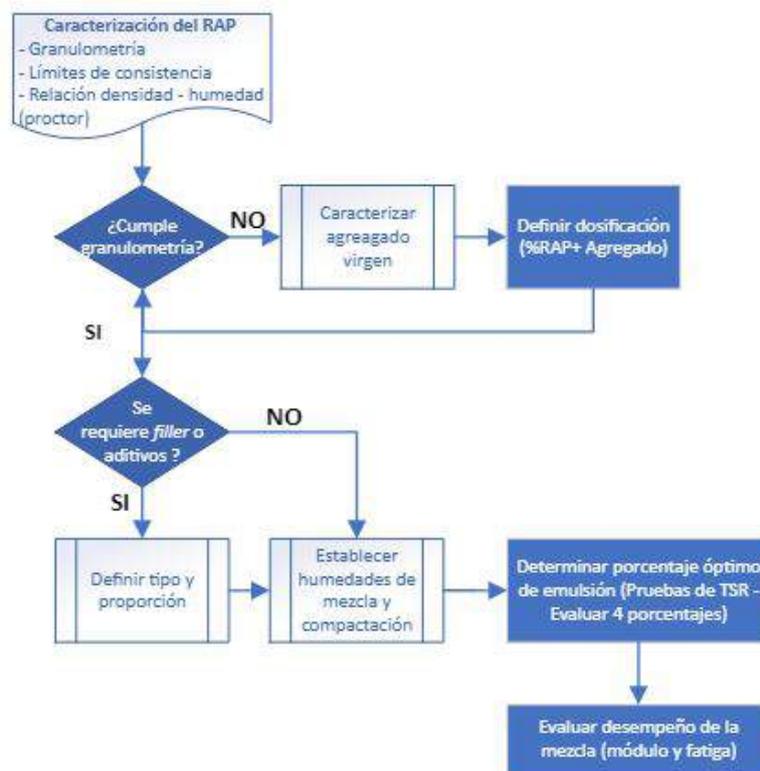


Figura 7.12: Proceso de diseño capas granulares tratadas con Emulsión asfáltica

- Cemento hidráulico:** En este caso, el proceso de diseño debe responder al contenido mínimo de cemento que permita la satisfacción de los criterios de resistencia a la compresión (INV E-614) y durabilidad (INV E-612). Conforme lo establecido el Artículo 350 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, el contenido de cemento mínimo es del 3 % en peso de la masa seca del material a estabilizar. En la Figura 7.14 se sintetiza el proceso de diseño.

En todos los casos como parte de las comprobaciones del diseño, se pueden adelantar ensayos de adherencia (INV E-738) y módulo resiliente (INV E-749)

Los métodos de diseño mencionados anteriormente para mezclas asfálticas y capas granulares representan solo una muestra pequeña del total de métodos disponibles. Su objetivo es proporcionar una visión general de algunos procedimientos de diseño para orientar a los diseñadores sobre su implementación. En este sentido, se espera que el diseñador adopte el método que considere más conveniente según sus objetivos y la disponibilidad de equipos. Bajo esta premisa, es responsabilidad del diseñador profundizar en el método elegido para lograr un resultado adecuado.

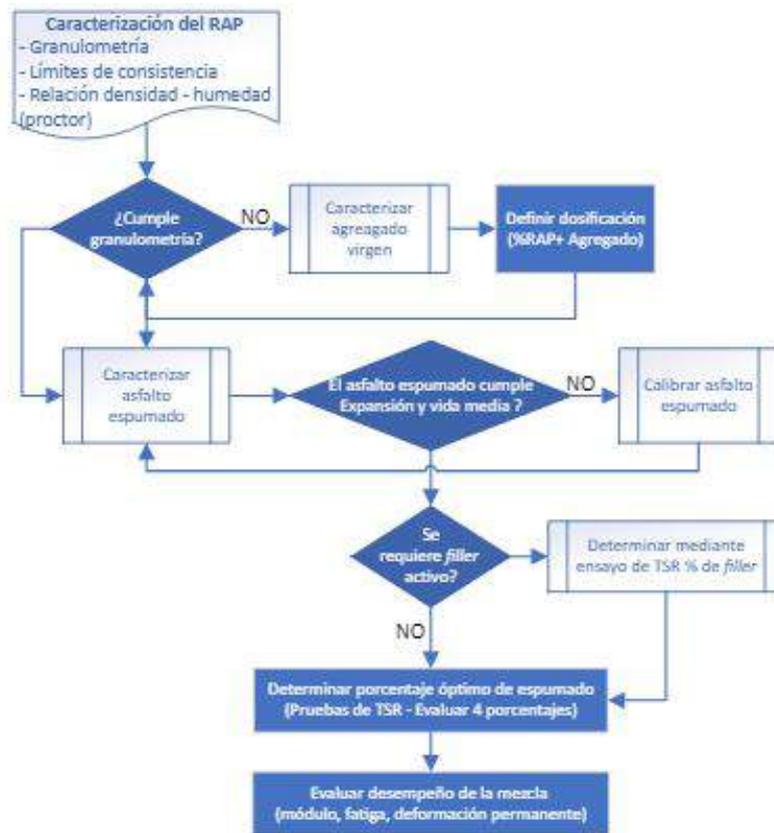


Figura 7.13: Proceso de diseño Capas granulares tratadas con asfalto espumado

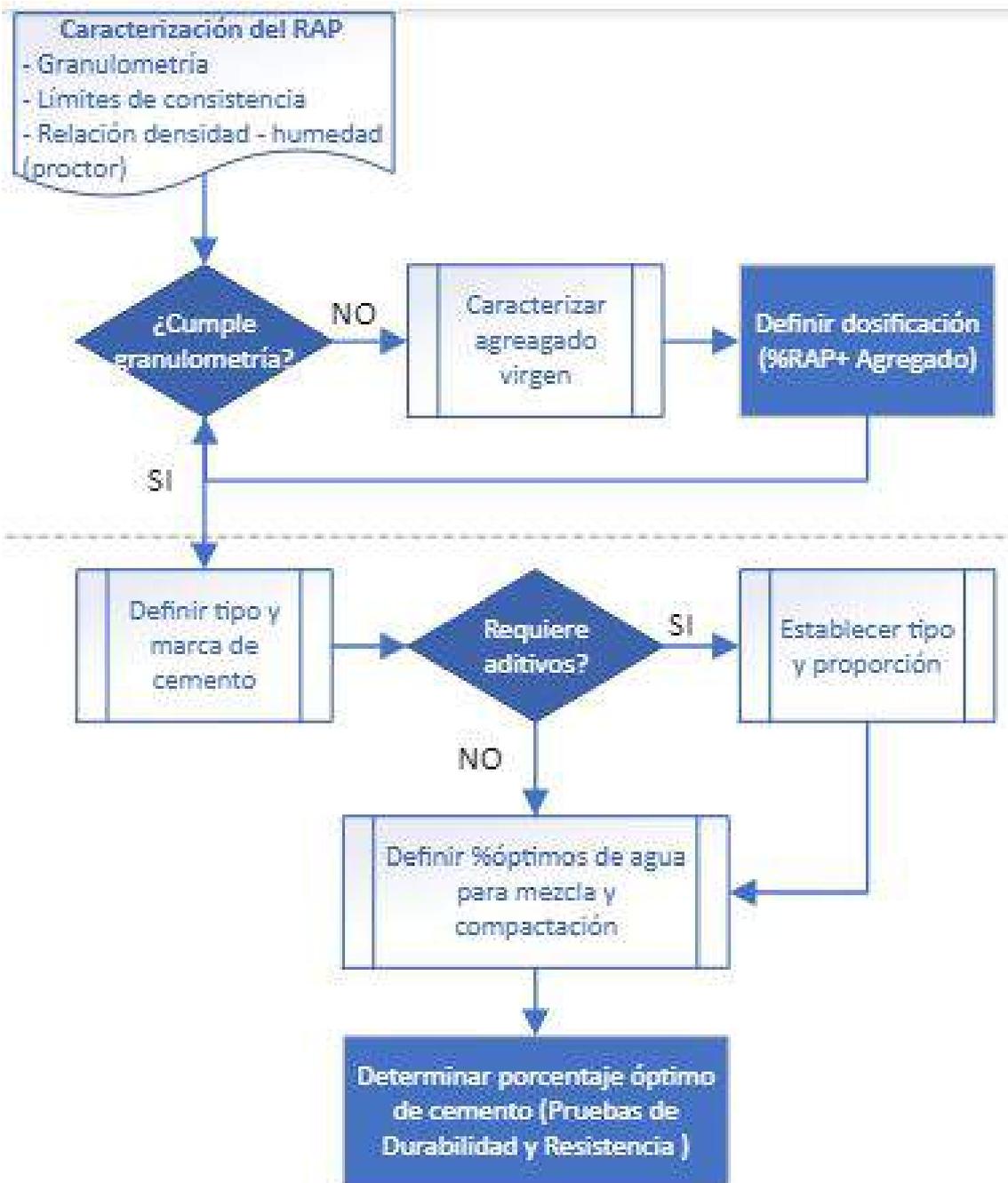


Figura 7.14: Proceso de diseño capas granulares tratadas con cemento hidráulico



8. Experiencias de uso de RAP

8.1 Experiencias de uso de RAP en Colombia

Según la cámara colombiana de la infraestructura en Colombia a 2007 se habían realizado varios proyectos que involucraban el uso de pavimentos asfáltico reciclado (RAP), entre ellos la vía Puertos López – Puerto Gaitán (Meta), Quibdó – Yuto (Chocó), Medellín – Santuario (Antioquia), Cali - Loboguerrero (Valle del Cauca), Manizales - Mesones (Caldas), Autopista Bogotá – Villavicencio (Cundinamarca).

En la ciudad de Bogotá se tiene experiencia en el uso de pavimentos asfálticos reciclados en capas de bases y subbases, así como en carpetas de rodadura. El enfoque del RAP en bases y subbases esta liderado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), mientras que el enfoque de RAP como carpetas de rodadura esta liderado por la Unidad Administrativa Especial de Mantenimiento y Rehabilitación Vial (UAERMV).

En el uso de RAP en las capas granulares de pavimento, se encuentra que el IDU ha hecho un trabajo importante al desarrollar la guía GU-GE-011 “Para el reciclaje de pavimentos asfálticos in situ estabilizados con aditivos bituminosos y/o hidráulicos” la cual busca incentivar el uso de los materiales reciclados de pavimento asfáltico y generar una metodología de referencia para el estudio de estos materiales. En esta misma línea, el IDU desarrolló la guía GU-IC-019 para el “Diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá D.C.”, en donde presenta algunas alternativas de diseño incluyendo pavimentos asfálticos reciclados (RAP o MBR) estabilizados con emulsión asfáltica y cemento como capas de base para diferentes niveles de tránsito expresados en tránsito promedio diario o ejes equivalentes (TPDo o NEE) y capacidades estructurales equivalentes (CPE. En la siguiente figura es posible apreciar estas propuestas de diseño que incluyen RAP o MBR desde 13 cm hasta 26 cm de espesor en las cuales sirven de apoyo para capas asfálticas o tratamientos superficiales.

Con el fin de consolidar el reciclado de pavimentos y atender a la resolución 2397 de abril de 2011 publicada para la Secretaría de Ambiente, el IDU presenta su apuesta ambiental para el 2 012 al exigir que sus obras civiles cuenten por lo menos con el 10 % de pavimentos asfálticos reciclados.

Experiencias documentadas en la ciudad de Bogotá en el uso de RAP como granulares se tiene la Troncal NQS tramo II (Calle 92 a Calle 68), donde se utilizó base estabilizada con material

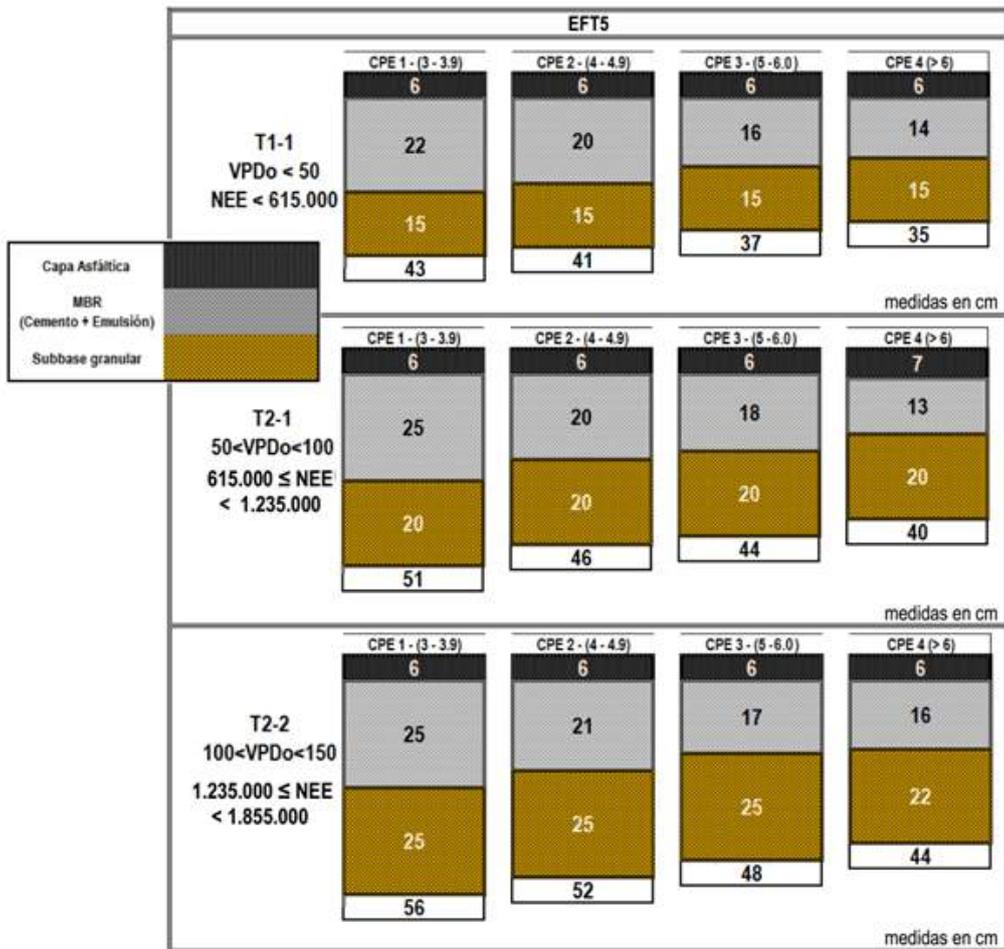
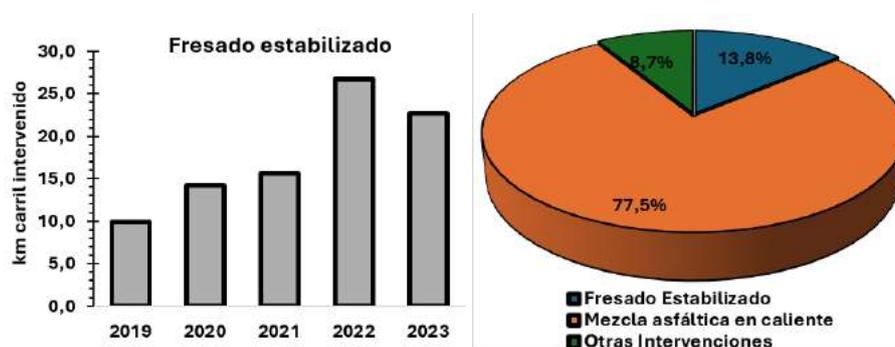


Figura 8.1: Estructuras flexibles diseñadas para la ciudad de Bogotá D.C
Fuente: Recuperado de la guía IDU GU-IC-019

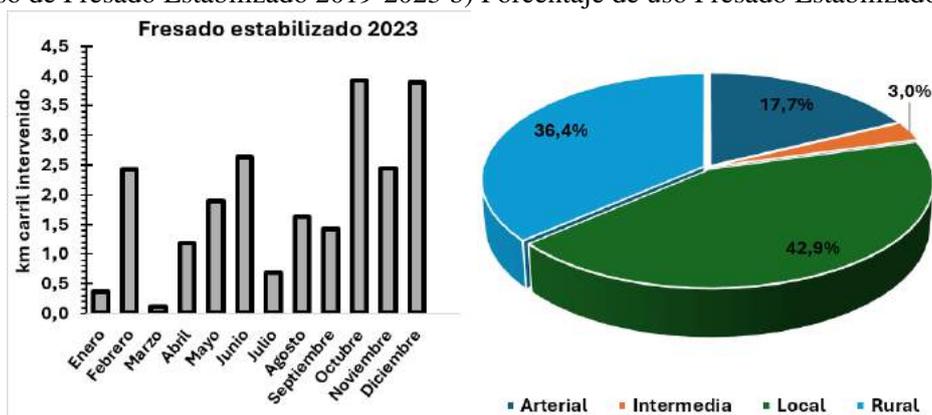
reciclado (MBR o RAP) en 80 % mezclado con granulares de aporte en un 20 % y cemento portland en 4 % (del peso la mezcla MBR+Granulares de aporte), en esta intervención se atendieron 13 000 m² con un volumen de 1 620 m³, adicionalmente se tienen registro de materiales asfálticos reciclados en contratos de mantenimiento IDU con volúmenes de 5 579 m³, intervenciones de la brigada IDU-SOP con áreas de aproximadamente 130 000 m² y volúmenes de material asfáltico reciclado instalado en el convenio IDU-IDIPRON por 228 m³.

Como carpeta de rodadura, la Unidad administrativa especial de rehabilitación y Mantenimiento vial (UAERMV) tiene registro de uso de RAP, denominado “fresado estabilizado” (mezcla de RAP con emulsión asfáltica) desde el año 2 007, reportándose para el periodo comprendido entre 2 007 y 2 009 la restauración de más de 987 000 metros cuadrados de malla vial local, lo que equivale a cerca de 164 km y aproximadamente 150 000 m³ de material empleado. Para el 2 010, las cifras ascendían a 176 km de intervención con 74 781 m³ de material aplicado.

Así mismo según los consolidados de intervención anuales publicados por la unidad de mantenimiento vial, en la ciudad de Bogotá entre el año 2 019 y el 2 023 se utilizó fresado estabilizado en 98 km carril, distribuidos como se presenta en la figura 8a ?? a, donde se puede observar un incremento importante en el uso de este material desde 2 019 hasta 2 022. En la figura ?? b se presenta una relación entre los km carril intervenidos con fresado estabilizado, con mezcla asfáltica y otras intervenciones realizadas por la UAERMV, evidenciando que la mayoría de las intervenciones se realizan con mezcla asfáltica en caliente, seguida por el fresado estabilizado.



a). Uso de Fresado Estabilizado 2019-2023 b) Porcentaje de uso Fresado Estabilizado 2023



c). Uso de Fresado Estabilizado 2023 d) Uso de Fresado Estabilizado según la malla vial
Fuente: Recuperado de datos abiertos Bogotá

Figura 8.2: Fresado estabilizado

En la figura 8.1 c se presenta la distribución de las intervenciones que involucraron fresado estabilizado en el año 2 023, evidenciando que los meses con mayores intervenciones fueron octubre y diciembre, mientras que los meses con menores intervenciones fueron enero y marzo.



Figura 8.3: Fresado estabilizado en BosaFuente: Recuperado de Nota de Movilidad



Figura 8.4: Fresado estabilizado en UsmeFuente: Recuperado redes sociales URMV

La UAERMV presenta el fresado estabilizado como una opción viable en la intervención de vías de bajos volúmenes de tránsito al encontrar su mayor aplicación en vías rurales y locales como se evidencia en la figura 8.1 d, esta política se encuentra en línea con lo establecido en el convenio interadministrativo adelantado por esta entidad y la Universidad Militar Nueva granada.

Así mismo, en el periodo mencionado, unas de las intervenciones más destacadas con fresado estabilizado son la instalación de aproximadamente 2,5km en la vereda Quiba Alta , localidad de Ciudad Bolívar en 2 022 y un tramo vial de 2 759 m² (418 m lineales) en la localidad de Bosa (figura 8.3) o intervenciones en Usme en la diagonal 100B Bis entre la carrera 2B hasta la carrera 3 (figura 8.4).

Otros ejemplos de aplicación del RAP se presentan en las alcaldías locales y fondos de desarrollo local, donde se implementaron 1,6km de fresado estabilizado en la localidad de Sumapaz en la vía Istmo-Tabaco (figura 8.5), intervenciones con fresado estabilizado en el barrio Monteblando Los Pinos localidad de Usme, 2 000 m de intervenciones en el sector animas bajas en la localidad de Sumapaz y 3 955 m de vía en el barrio Villa Hermosa de la localidad de Usme, entre otras intervenciones.

Otro referente nacional al momento de hablar de RAP es la ciudad de Medellín, la cual ha aplicado esta tecnología en vías terciarias alcanzando desempeños adecuados, de este modo, la alcaldía ha definido algunas proporciones para el uso del RAP según la superficie de uso como se muestra en la Tabla 8.1.

En la ciudad de Medellín se tiene registro de instalación de RAP incluido como base estabilizada en la autopista sur calzada occidental desde Motores hasta Jardines Montesacro en 1997 (Figura 8.6), la cual evidencia agrietamiento y parcheos aislados, pero su capacidad funcional es adecuada, otros ejemplos son la Av 80-81 entre carrera 70 y Avenida Guayabal, Av 51 entrada principal desde Calle 57A hasta Calle 51, carrera 70 entre calle 9 y calle 30, entre otras.



Figura 8.5: Fresado estabilizado en UsmeFuente: Recuperado de alcaldía local de Sumapaz

Tabla 8.1: Proporciones para el uso del RAP según la aplicación

Proporciones		Aplicación
RAP	Agregado Virgen	
100 %	0 %	Vías terciarias
75 %	25 %	Sub base
40 %	60 %	Base
25 %	75 %	Mezcla asfáltica



Figura 8.6: Autopista Sur Calzada Occidental desde Motores hasta Jardines Montesacro, Medellín
Fuente: Recuperada de XVIII SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

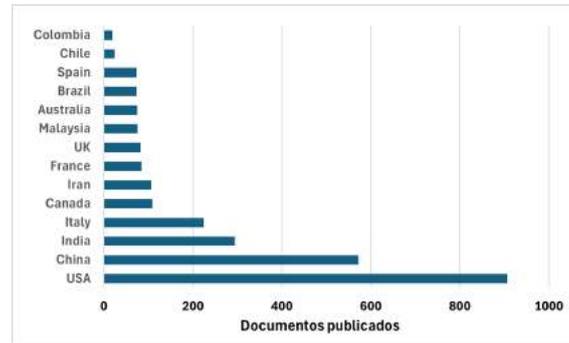


Figura 8.7: Distribución de documentos publicados por país. Fuente: Recuperado de Scopus

8.2 Experiencias de uso de RAP Internacional

Internacionalmente, el uso del RAP es una práctica común, esto debido a que cada vez existe más regulaciones que permiten la inclusión de este tipo de materiales, dicha regulación está fundamentada en investigaciones académicas, por esta razón se presenta en la figura 8.7 se presenta la distribución de documentos académicos publicados por los diferentes países, evidenciando que Estados Unidos y China son los países con más publicaciones asociadas a RAP.

Teniendo esto presente se hace necesario presentar las experiencias de Estados Unidos y China en la incorporación de RAP dentro de algunos de sus tramos viales.

En la provincia China de Jiangsu se han ejecutado labores de mantenimiento de la infraestructura con mezcla asfáltica reciclada en caliente. En seguimiento a estos tramos se encuentra que el material reciclado mejora la resistencia al ahueamiento del material, en este mismo sentido, se tiene que el agrietamiento es mejorado en la etapa inicial, pero con el tiempo la mejora en este aspecto es menor debido a que el envejecimiento del asfalto decrece la penetración y ductilidad a la vez que aumenta la viscosidad y punto de ablandamiento, debilitando la resistencia al agrietamiento de la mezcla. Adicionalmente, el asfalto envejecido lleva a una adhesión insuficiente entre asfalto y agregados. Esto demuestra la necesidad de un agente rejuvenecedor que reconstituya las propiedades físicas y químicas del asfalto envejecido.

En campo se generaron 3 secciones variando la capa asfáltica de base con 0%, 15% y 25% RAP como se muestra en la figura 8.8, realizando diseños de mezcla según la metodología Marshall, resultado de estas muestras en laboratorio se realizan ensayos de módulo dinámico donde no su variación es muy baja, ensayos de ahueamiento identificando que la inclusión de RAP mejora este comportamiento en la mezcla, resistencia a la tensión indirecta mejora levemente al igual que la energía requerida para fracturar el material y el potencial de fracturación disminuye levemente. De la evaluación en campo a los tramos se hizo seguimiento a los 19 y 26 meses posteriores a su construcción evidenciando buen estado, sin presencia de patologías.

Seis tramos de prueba de 154 m de largo y 5 cm de espesor son elaborados en una vía de Oklahoma con TPD 5 3000 de los cuales el 20% es tráfico pesado. Las secciones 1 a la 5 tienen 12% RAP y 3% RAS (Tejas de asfalto reciclada), la sección 1 es una mezcla en caliente, la sección 2 es una mezcla tibia con asfalto espumado y las secciones de 3 a 6 son mezclas tibias con aditivos químicos variando el grado del ligante asfáltico. Este tramo se evaluó por 4 años indicando que la mezcla tibia es igual o mejor que la mezcla en caliente en resistencia al agrietamiento, daño por humedad, pero inferiores en resistencia al ahueamiento.

En Alabama se adelantó una investigación en un tramo de vía con 10 millones de ejes equivalentes donde se instalaron mezclas tibias con asfalto espumado, mezclas tibias con aditivo químico, mezclas tibias con espumado y 5% RAP, mezclas en caliente y mezclas en caliente con 50% RAP. Como resultado las secciones con RAP tienen menores ahueamientos, siendo menor la mezcla en



Figura 8.8: Mezclas asfáltica en caliente con RAP



Figura 8.9: Mezclas asfáltica tibia con asfalto espumado y RAP en Colorado

caliente que la mezcla tibia. La mezcla que presenta mayor ahuellamiento es la mezcla en caliente sin RAP, sin embargo, todos los ahuellamientos reportados a 20 meses son inferiores a 10mm. En laboratorio, la muestra con mejor ahuellamiento es la mezcla en caliente y las muestras con RAP frente a las mezclas tibias y las mezclas vírgenes respectivamente. El uso de mezclas tibias no redujo el envejecimiento del asfalto por el RAP, por lo cual el ahuellamiento se mejoró. En este sentido, se evidencia que los resultados en campo y laboratorio no son iguales.

En Colorado, se realizaron tramos de prueba con mezclas asfálticas tibias con asfalto espumado (137°C-146°C) y en caliente (154°C-160°C) incluyendo 20 y 30 %RAP con adición de 1% de cal hidratada para prevenir posibles descascaramientos, de estos tramos se tomaron densidades evidenciando cumplimiento en este parámetro lo cual indica que la mezcla tibia tiene buen grado de trabajabilidad. En cuanto a los ensayos ejecutados, se evaluaron las muestras por ahuellamiento, mostrando que las mezclas tibias tienen peor ahuellamiento que las mezclas calientes a la vez que el aumento de RAP tiene efectos negativos para el ahuellamiento de la mezcla. De la resistencia a la tracción indirecta, se encontró que aumentar el contenido de RAP tiene efectos negativos en este parámetro. El módulo dinámico y el daño por humedad no se ven impactados por el RAP ni por la temperatura de compactación de la mezcla. En cuanto a fatiga, se evidencia que la mezcla tibia con 30 %RAP tiene el mejor comportamiento.

En campo (figura 8.9) los tramos son evaluados a 13, 25 y 38 meses donde después de 38 meses el ahuellamiento es de 2mm para todas, las fisuras se propagan rápidamente en los primeros 13 meses, después el comportamiento no varía significativamente, las fisuras son mayores en las mezclas tibias con 20 %RAP seguidas por las mezclas frías y calientes con 30 %RAP. La textura de las mezclas es similar, y solo la mezcla en caliente con 30 %RAP presenta descascaramiento leve a los 38 meses.



Figura 8.10: Mezclas asfáltica fría con RAP

Para mezclas frías con RAP se presenta un ejemplo en la figura 8.10, adicionalmente, se presenta una revisión del estado de 18 vías construidas con mezclas asfálticas en frío con inclusión de RAP en el estado de Iowa donde se muestra que, después de su puesta en servicio, estas estructuras tienen comportamientos adecuados, esto se sustenta con la evaluación de patologías de pavimentos realizados desde los 2 años de antigüedad hasta los 10 años en algunas vías. Los resultados evidencian que las vías inspeccionadas a 7, 8, 9 y 10 años tienen problemas de ahuecamiento, sin embargo, antes de este tiempo, ninguna vía presenta esta condición. De otra parte, las grietas transversales se presentan en 11 de las 18 vías evaluadas, no obstante, la cantidad de grietas reportadas en cada vía no es alta, por lo que este parámetro no constituye un problema. Otros daños como piel de cocodrilo, descascaramiento y fisuras de bloque, de borde y longitudinales son evaluadas encontrando caso aislados, lo cual no es contundente. Finalmente, el valor de PSI es valuado encontrando que las vías evaluadas entre 2 y 3 años tienen valores de 100, de 4 a 5 años tienen valores entre 100 y 85, de 6 a 7 años valores de 72 a 94 con una excepción de 60 y de 8, 9 y 10 años valores de 71, 52 y 81 respectivamente.

De otra parte, en lo que refiere al uso de RAP en capas granulares, es preciso resaltar que desde hace más de 30 años se ha venido estudiando mediante la construcción y seguimiento de tramos de prueba, e inclusive su uso se concibe dentro de las especificaciones generales de construcción en diferentes países con tasas de aplicación admisibles entre el 20% y 30% para el caso de bases granulares y entre el 25% y 100% para subbases granulares, tal como se puede apreciar en la Figura 8.11. Así las cosas, uno de los primeros tramos de prueba registrados corresponde a la construcción de la Av Lincoln de Urbana, Illinois (1993), en donde se empleó como base de la estructura una capa de RAP, monitoreando la respuesta estructural y el desempeño a lo largo del tiempo evidenciándose un adecuado desempeño. Aunado a lo anterior, como punto de partida para el desarrollo de especificaciones en Florida, se reporta la construcción de un tramo de prueba en el año 2001, que involucró una capa de base de 0.90m (constituida por 80% RAP y 20% agregado virgen), el cual permitió evidenciar que este material tenía poca susceptibilidad a la humedad pero no satisface los requisitos de CBR establecidos para uso como base granular.

En 2011, (Foye, 2011), experimentó el uso de RAP, en un proyecto de rehabilitación de parqueadero (19.500m²) en Minnesota (EEUU), junto con el empleo de una geomalla para el mejoramiento de la subrasante y con ello se pudo establecer que las propiedades del RAP son comparables al material granular virgen, con un ahorro significativo en costos. Resultados similares fueron obtenidos por (Montepara, Tebaldi, Marradi, & Betti, 2012), quienes a través de ensayos con el deflectómetro de impacto (FWD), en diferentes instantes de tiempo, evidenciaron que los

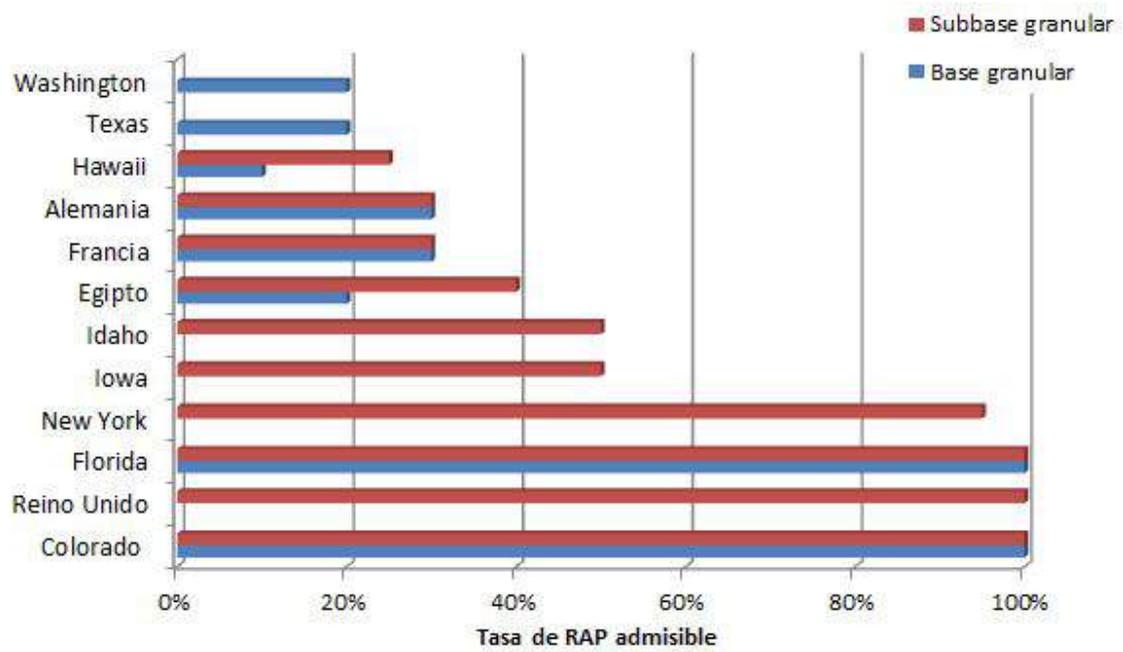


Figura 8.11: Tasas de RAP admisibles por país . Fuente: Propia a partir de Hoppe, Lane, Fitch, & Shetty, 2015

módulos elásticos eran similares e incluso ligeramente superiores a los obtenidos por el agregado virgen.



9. Equipos de construcción y listas de verificación

En esta sección, se presenta una descripción detallada y concisa de los diversos equipos involucrados en la ejecución de capas provenientes de RAP, considerando los diferentes procesos de construcción. La información presentada tiene como objetivo brindar una visión clara sobre los equipos necesarios, sus características y función dentro del proceso.

9.1 Equipos

En esta sección, se presenta una breve descripción de los diversos equipos a emplear en la ejecución de capas provenientes de RAP, considerando los diferentes procesos de construcción.

9.1.1 Fresadora

Máquina con controles automáticos, capaz de fresar el pavimento asfáltico con una profundidad precisa de corte y con el perfil y la pendiente transversal establecidos. El equipo debe estar provisto de dispositivos para verter el material fresado directamente en camiones de transporte. Su uso se enfoca en la remoción de material con fines de nivelación (eliminación de irregularidades), mejora de textura (la cual incide directamente en la resistencia al deslizamiento) y preparación para la instalación de nuevas mezclas.

En el mercado, dependiendo del modelo y fabricante, se cuenta con equipos que permiten intervenir anchos desde los 0.35m hasta los 2.2m, junto a profundidades también variables hasta los 0.30m.

9.1.2 Recicladora

Máquina montada sobre orugas o neumáticos de flotación, que posee un rotor fresador-mezclador equipado con un gran número de puntas, especialmente diseñadas para este proceso. El tambor normalmente rota y pulveriza el material del pavimento existente, como se ilustra en la Figura

En el mercado, dependiendo del modelo y fabricante, se cuenta con equipos que permiten anchos de intervención que van desde los 2.0m hasta los 3.8m, junto a profundidades también



Figura 9.1: Fresadora



Figura 9.2: Fresadora



Figura 9.3: Recicladora

variables hasta los 0.5m

9.1.3 Volqueta

Equipo para transportar tanto agregados como mezclas asfálticas, con platón liso y estanco debidamente acondicionado para tal fin. En el caso de transporte de mezclas asfálticas, la superficie interna del platón debe ser tratada con un producto cuya composición y cantidad deben ser aprobadas por parte del responsable de validar el cumplimiento de los requisitos técnicos, con el fin de evitar la adherencia de la mezcla a esta. La forma y la altura del platón deben ser tales que, durante el vertido en la pavimentadora, la volqueta solo toque a esta a través de los rodillos previstos para ello.

9.1.4 Carro tanque irrigador

Equipo empleado en la aplicación de productos asfálticos en forma de riego a presión, garantizando la aplicación uniforme y constante del producto asfáltico, a la temperatura apropiada. Sus dispositivos de irrigación deben proporcionar una distribución transversal adecuada del ligante.

9.1.5 Motoniveladora

Máquina automotriz sobre ruedas con una hoja regulable situada entre los ejes delantero y trasero, que corta, desplaza y extiende material generalmente para la nivelación de superficies. Se considera una máquina de terminación superficial, toda vez que se encarga de mezclar los materiales y ajustar el nivel de la capa que se conforma, garantizando uniformidad (sin irregularidades). El ancho de la hoja suele ser usualmente de 3.70m llegando hasta los 4.3m, según modelo y fabricante.

9.1.6 Pavimentadora o terminadora

Equipo autopropulsado, equipado con un vibrador y un distribuidor de tornillo sinfín, de tipo reversible, capacitado para colocar o extender la mezcla uniformemente por delante de los enrasadores. Este equipo se emplea si el mezclado se realiza en planta, para lograr una distribución homogénea de acuerdo con los anchos, espesores, pendientes y alineamientos especificados en el



Figura 9.4: Enter Caption



Figura 9.5: Camión irrigador de la UMV



Figura 9.6: Motoniveladora

contrato.

9.1.7 Compactador de rodillo liso

Equipo autopropulsado empleado para compactar diferentes materiales, con el fin de garantizar una densidad adecuada y con ello una mejora de su desempeño mecánico. No se recomienda el empleo de equipos con carga estática inferior a 300N/cm. Deben tener un sistema que permita mantener siempre limpia y húmeda la superficie del cilindro, sin exceso de agua.

Estos equipos, dependiendo del modelo y fabricante, pueden tener anchos que varían entre 1.0m y 2.5m, junto a pesos desde 1.5t hasta 15.0t. La selección del equipo estará asociada al espesor y granulometría de la capa a compactar.

9.1.8 Compactador de rodillo neumático

Equipo empleado en la fase final del proceso de compactación con el fin de "sellar" la superficie terminada y eliminar las marcas dejadas por los otros equipos, logrando un acabado superficial adecuado. Debe tener ruedas lisas, en número, tamaño y disposición tales, que permitan el traslapo de las huellas delanteras y traseras y, en caso necesario, faldones de lona protectora contra el enfriamiento de los neumáticos. Se recomienda validar la presión de inflado de los neumáticos, acorde a las necesidades de profundidad e intensidad de la compactación.

Estos equipos, dependiendo del modelo y fabricante, pueden tener anchos que varían entre 1.7m y 2.0m, junto a pesos desde 5.0t hasta 8.0t.

9.2 Listas de verificación

En este acápite se presentan listas de verificación, que permitirán identificar los datos del proyecto, equipos, materiales, procedimientos y controles de calidad, a tener en cuenta durante la etapa de construcción o conformación de capas que emplean RAP. Dichas listas corresponden a:

- Inventario del tramo intervenido
- Verificación inicial de Materiales y equipos
- Registro y estado de equipos
- Proceso constructivo - Mezclado *in - situ*



Figura 9.7: Pavimentadora o terminadora



Figura 9.8: Compactador de rodillo liso



Figura 9.9: Compactador de rodillo neumático

- Proceso constructivo - Mezclado *en planta*

El objetivo de las mismas es permitir una rápida verificación e identificación de aspectos claves para asegurar que los procedimientos mínimos sean ejecutados de manera organizada y eficiente, contribuyendo a la calidad y seguridad en cada una de las etapas del proceso.

Al respecto es preciso recalcar que los ítems propuestos constituyen una guía básica, y por tanto pueden ser ampliadas o complementadas (según necesidad o particularidad del proyecto). La calidad del producto ejecutado deberá satisfacer las especificaciones generales de construcción vigentes.

Tabla 9.1: Inventario de tramo intervenido

Datos de proyecto					
Fecha de inspección					
Ruta y tramo					
Contratista					
Estación	Inicio		Final		
Longitud intervenida (m)					
Ancho promedio intervenido (m)					
TPD - Nivel de tráfico					
Pavimento existente					
Espesor de capa reciclada / Fre-sada (m)					
Avance promedio por día (m/día)					
Tamaño máximo del agregado					
Dosificación empleada	RAP	Agregado	Agua	Cemento	Emulsión
En caso de uso de cemento (No de sacos empleados/día)					
Condiciones climáticas					
Observaciones generales					
Densidad del material (kg/m ³)					
Registro fotográfico					

Tabla 9.2: Materiales y equipos

Verificación inicial			
Materiales	SI	NO	No Aplica
Agregados			
Agua			
Emulsión asfáltica			
Cemento			
RAP			
Equipos y maquinaria	SI	NO	No Aplica
Carrotanque			
Motoniveladora			
Recicladora			
Distribuidor de emulsión			
Pavimentadora			
Compactador de rodillo liso			
Compactador de rodillo neumático			
Equipos y herramientas manuales			

Tabla 9.3: Registro y estado de equipos

Recicladora	
Marca y modelo	
Fecha de último cambio de puntas	
Las puntas se encuentran en buen estado?	
Camión cisterna	
Marca y modelo	
Se observan fugas de agua?	
Compactador de rodillo liso	
Marca y modelo	
Peso (ton)	
Compactador de rodillo neumático	
Marca y modelo	
Peso (ton)	
Pavimentadora	
Marca y modelo	
Velocidad promedio (km/h)	
Observaciones generales	
(Describa si se presenta alguna eventualidad en los equipos o se emplean equipos adicionales)	

Tabla 9.4: Proceso constructivo - Mezclado *in - situ*

Hora de inicio de las labores						
Profundidad de intervención (m)						
Coincide la profundidad recuperada con lo indicado en los diseños?	SI			NO		
Tamaño máximo del material recuperado (mm)						
Se encuentran sobretamaños?	SI			NO		
Contenido de humedad del material (seco, húmedo o con exceso de agua)						
Dosificación empleada	RAP	Agregado	Agua	Cemento	Emulsión	Aditivo
Método de dosificación	Sacos		A granel		Vía húmeda	
Conformación, compactación y acabado						
Equipo empleado en la conformación de la mezcla						
Indique el tipo de cobertura del abanico del camión dosificador (simple, doble o triple).						
Equipo empleado en la compactación de la mezcla						
Cantidad de pasadas que realiza cada compactador						
Espesor de capa compactada (m).						
Densidad de la capa compactada						
Hora de fin de compactación						
Temperatura al finalizar compactación (°C)						
Se identifican huellas o hundimientos en la superficie terminada?						
Observaciones generales						

Tabla 9.5: Proceso constructivo - Mezclado *en planta*

Hora de inicio de las labores						
Placa del vehículo que transporta desde la planta						
Temperatura de la mezcla (°C)						
Volumen de material (m3)						
El material viene cubierto con algún manto impermeable?						
El color del material es uniforme?						
Dosificación de la mezcla a instalar	RAP	Agregado	Agua	Cemento	Emulsión	Aditivo
Conformación, compactación y acabado						
Equipo empleado en la conformación de la mezcla						
Indique el tipo de cobertura del abanico del camión dosificador (simple, doble o triple).						
Equipo empleado en la compactación de la mezcla						
Cantidad de pasadas que realiza cada compactador						
Espesor de capa compactada (m).						
Densidad de la capa compactada						
Hora de fin de compactación						
Temperatura al finalizar compactación (°C)						
Se identifican huellas o hundimientos en la superficie terminada?						
Observaciones generales						



PARTE V

10	Recomendaciones, Limitaciones y Conclusiones	91
10.1	Recomendaciones	
10.2	Limitaciones	
10.3	Conclusiones	



10. Recomendaciones, Limitaciones y Conclusiones

10.1 Recomendaciones

- Realizar una gestión del RAP (inventario, caracterización y usos) a fin de evitar problemas de almacenamiento, heterogeneidad y degradación en el tiempo.
- Procurar un adecuado manejo en los sitios de acopio/almacenamiento, así como un bajo tiempo de almacenaje para minimizar el incremento de humedad en el material.
- Pese a que el uso de RAP en capas granulares es viable, dado el valor económico y ambiental que dicho material puede aportar, se recomienda enfocar su uso a capas de mayor impacto (capas asfálticas).
- La implementación de un riguroso control de calidad durante todo el proceso de aprovechamiento del RAP, permitirá garantizar un adecuado desempeño en el tiempo (resistencia y durabilidad).
- Brindar una capacitación adecuada a los diversos actores sobre el manejo, procesamiento y aplicación del RAP con el ánimo de maximizar el aprovechamiento del material.
- Elegir cuidadosamente los aditivos a emplear como parte del proceso, a fin de evitar comprometer ciclos futuros de reciclaje.
- Considerando la heterogeneidad del material, se recomienda establecer un sistema de monitoreo y evaluación en las obras viales donde se emplee dicho material, a fin de verificar desempeño e identificar posibilidades de mejora.
- Fomentar la investigación de prácticas y tecnologías que permitan mejorar la calidad y eficiencia en las aplicaciones del RAP.

10.2 Limitaciones

Las principales limitaciones del uso del RAP en capas de base y/o subbase, y en mezclas asfálticas son las siguientes:

- **Mayor heterogeneidad en el proceso de producción:** Las características del material recuperado dependen en gran medida de las propiedades del pavimento original, incluyendo los materiales constituyentes y el tipo de mezcla asfáltica.

- **Necesidad de un estudio previo de los materiales:** No todos los materiales de RAP pueden ser aprovechados de la misma manera, por lo que se requiere un análisis detallado previo a su utilización.
- **Requerimiento de grandes superficies de almacenamiento en caso de aprovechamiento en caliente:** Para el proceso de reciclaje en caliente, se necesitan amplias áreas de almacenamiento para el material recuperado.
- **Posibles inversiones necesarias en las plantas de producción:** En algunos casos, pueden ser necesarias adaptaciones en las plantas de producción para llevar a cabo el proceso de reciclaje de manera eficiente.
- **Necesidad de controlar la procedencia y el tipo de mezcla:** Es fundamental gestionar diferentes acopios para asegurar la homogeneidad en la composición y calidad de las mezclas producidas.
- **Sensibilidad del material reciclado a los efectos climáticos:** Con el paso del tiempo, el material recuperado puede ser afectado por factores climáticos como la humedad, la oxidación y las altas temperaturas, lo que puede comprometer su calidad.
- **Riesgo de fisuras en la superficie si no se sigue un proceso constructivo adecuado:** Es importante realizar un proceso de colocación adecuado para evitar la aparición de fisuras en la superficie de la carretera.
- **Necesidad de un control preciso de la temperatura durante la producción de mezclas asfálticas:** En la elaboración de mezclas asfálticas con RAP, es crucial controlar cuidadosamente las temperaturas para garantizar el adecuado calentamiento y secado del RAP mediante la temperatura del agregado virgen, y para evitar daños en el tambor secador y garantizar la calidad del producto final.
- **Incremento del contenido de humedad con el tiempo de almacenamiento:** El RAP tiende a absorber más humedad a medida que pasa el tiempo, lo que puede dificultar su secado y su posterior utilización en mezclas asfálticas.
- **Mayor necesidad de calentamiento durante el proceso de secado en caso de exposición a la lluvia:** Si el material de RAP se expone a la lluvia, absorberá agua adicional, lo que requerirá un mayor calentamiento durante el proceso de secado.
- **Posible degradación de los agregados durante el proceso de obtención o generación del RAP:** Durante la producción del RAP, los agregados pueden sufrir cierta degradación, lo que resulta en una granulometría más fina y densa en comparación con el agregado virgen utilizado en la mezcla original.

10.3 Conclusiones

- Las prácticas y recomendaciones planteadas buscan promover el uso responsable y eficiente del RAP.
- Las propiedades del RAP, no solo dependen de las características del pavimento del cual se deriva, sino también de la forma en como éste se ha recuperado (origen), procesado y almacenado.
- El uso de materiales reciclados disminuye el costo de la infraestructura, especialmente cuando los mismos se emplean en la zona de donde se extraen (adicional al tema de explotación de agregados y disposición de sobrantes, se disminuye el costo de acarreo).
- El uso de RAP en capas granulares es viable, siempre y cuando se adelanten las correcciones necesarias en términos de gradación y se evalúe el máximo porcentaje de aporte que satisfaga las especificaciones generales de construcción aplicables a cada capa.
- La difusión de resultados y casos de éxito en el uso del RAP facilita la transferencia de conocimiento entre profesionales del sector, promoviendo la estandarización y la mejora continua.



Bibliografía

Cámara Colombiana de la Infraestructura. (2007). Escuela Colombiana de Ingeniería. Reciclaje de Pavimentos. Bogotá D.C.

Instituto de Desarrollo Urbano. (2011). GU-GE-011 Guía para el reciclaje de pavimento asfáltico in situ estabilizado con aditivos bituminosos y/o hidráulicos. Bogotá D.C.

Instituto de Desarrollo Urbano. (2013). GU-IC-019 GUÍA DISEÑO DE PAVIMENTOS PARA BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y VÍAS LOCALES PARA BOGOTÁ D.C. Bogotá D.C.

El Espectador. (2010, abril). Se han restaurado 987 mil metros cuadrados de vías con material reciclado. Recuperado de <https://www.elespectador.com/bogota/se-han-restaurado-987-mil-metros-cuadrados-de-vias-con-material-reciclado-article-199468/>

Datos Abiertos Bogotá. (s.f.). Priorización intervenciones año 2020. Recuperado el 7 de marzo de 2024, de <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/priorizacion-intervenciones-ano-2020>

UMV, UMNG. (2018). Estudiar la respuesta mecánica y dinámica de mezclas asfálticas fabricadas con pavimento reciclado (RAP) (Informe final convenio 469 de 2017). Bogotá D.C.: Unidad de Mantenimiento Vial.

Secretaría de Movilidad Alcaldía Mayor de Bogotá. (2022, junio). La Bogotá que estamos construyendo (Boletín 3)

Secretaría de Movilidad. (2023, agosto). UMV entregó obra que beneficiará a mil personas en localidad de Bosa | Bogota.gov.co. Recuperado de <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/umv-entregó-obra-que-beneficiara-mil-personas-en-localidad-de-bosa>

Echeverría Gerena, J. (2011, junio). Coeficientes estructurales para materiales reciclados y

estabilizados con aditivos químicos desarrollados y producidos en Colombia. Especificaciones constructivas y ahorro en costos. Ponencia presentada en el [nombre de la conferencia o evento], Cartagena.

Pan, Y., Han, D., Yang, T., Tang, D., Huang, Y., Tang, N., Zhao, Y. (2021, febrero). Field observations and laboratory evaluations of asphalt pavement maintenance using hot in-place recycling. *Construction and Building Materials*, 271, 121864. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121864>

Zalghout, A., Castro, S., Karam, J., Kaloush, K. (2022, octubre). Laboratory and field evaluation of plant produced asphalt mixtures containing RAP in hot climate: A case study from Phoenix, Arizona. *Construction and Building Materials*, 351, 128322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128322>

Zalghout, A., Castro, S., Karam, J., Kaloush, K. (2022). Laboratory and field evaluation of plant produced asphalt mixtures containing RAP in hot climate: A case study from Phoenix, Arizona. *Construction and Building Materials*, 351, 128322. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128322>

Vargas-Nordbeck, A., Timm, D. H. (2012, junio). Rutting characterization of warm mix asphalt and high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13(sup1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.6>

Xie, Z., Tran, N., Taylor, A., Julian, G., West, R., Welch, J. (2017, noviembre). Evaluation of foamed warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement: field and laboratory experiments. *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup4), 328-352. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389077>

Jahren, C. T., Cawley, B., Ellsworth, B., Bergeson, K. L. (1998). Review of cold in-place asphalt recycling in Iowa.

Lee, H. (2008). Examination of Curing Criteria for Cold In-Place Recycling.