	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	08-07-2021	B
Dependencia	Aprobado		Pág.	
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		1(81)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Laura Vanessa Sánchez Gómez Shara del pilar Peñaranda Sanabria		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Katerine Carreño García		
TÍTULO DE LA TESIS	Comparación de las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente y en frío, con adición de pavimento asfáltico reciclado "RAP"		
TITULO EN INGLES	Comparison of the physical and mechanical properties of hot and cold asphalt mixtures, with the addition of recycled asphalt pavement "RAP"		
RESUMEN (70 palabras)			
<p>Monografía de compilación referente a las propiedades físicas y mecánicas obtenidas en las mezclas asfálticas en caliente y en frío, al adicionar pavimento asfáltico reciclado "RAP" en distintos porcentajes. Con el desarrollo de esta monografía se buscó la difusión de un nuevo material alternativo que puedan ser incorporados en las mezclas asfálticas a favor de los nuevos requerimientos ambientales exigidos para el sector de la construcción de infraestructuras.</p>			
RESUMEN EN INGLES			
<p>Compilation monograph referring to the physical and mechanical properties obtained in hot and cold asphalt mixtures, when adding recycled asphalt pavement "RAP" in different percentages. With the development of this monograph, the dissemination of a new alternative material that can be incorporate in asphalt mixtures in favor of the new environmental requirements demanded for the infrastructure construction sector was sought.</p>			
PALABRAS CLAVES	Pavimento Asfáltico Reciclado, Densidad, Contenido de vacíos, Estabilidad, Flujo, Tracción Indirecta, y Módulo de Rigidez		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Recycled Asphalt Pavement, Density, Void content, Stability, Flow, Indirect Traction, and Modulus of Rigidity		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 82	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 0	CD-ROM: 1



Comparación de las propiedades físicas y mecánicas de mezclas asfálticas en caliente y en frío, con adición de pavimento asfáltico reciclado “rap”

Laura Vanessa Sánchez Gómez
Shara del pilar Peñaranda Sanabria

Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

Msc. Katerine Carreño García

26 Octubre del 2021

Nota

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 0012 de fecha 27 de abril del 2021, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes **Jon Edinson Prado Pérez** y **Agustín Armando Macgregor Torrado**.

Agradecimientos

Los autores de esta monografía expresan su cordial agradecimiento al MSc. Katerine Carreño García, por la dirección del trabajo, su apoyo y colaboración permanente durante toda la investigación.

Así mismo agradecen a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron en este trabajo: amigos, compañeros y docentes, así como aquellos profesionales que brindaron su ayuda, especialmente al Ing. Luis Miguel Duarte Vergara por su acompañamiento y colaboración en todas las etapas del proyecto.

Finalmente agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por brindar los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo.

Laura Vanessa Sánchez Gómez

Shara del pilar Peñaranda Sanabria

Tabla de contenido

Introducción.....	10
Capítulo 1. Generalidades del pavimento asfáltico reciclado “RAP”	14
1.1 Historia del RAP.....	15
1.2 Forma de obtención del RAP	17
1.3 Forma de empleo del RAP	18
1.3.1 Reciclado in situ en caliente.....	19
1.3.2 Reciclado in situ en frío.....	19
1.3.3 Reciclado en planta.....	20
1.4 Uso del RAP en la mezcla asfáltica.....	22
Capítulo 2. Propiedades físicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP	24
2.1. Contenido de asfalto presente en el RAP.	24
2.2 Granulometría.....	29
2.2.1 Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en caliente.	30
2.2.2 Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en frío.	33
2.3 Densidad.....	36
2.3.1 Densidad de mezclas asfálticas en caliente.	38
2.3.2 Densidad de mezclas asfálticas en frío.....	39
2.4 Gravedad específica.....	42
2.4.1 Gravedad específica de mezclas asfálticas en caliente.....	43
2.4.2 Gravedad específica de mezclas asfálticas en frío.	45
2.5 Contenido de vacíos con aire.....	46
2.5.1 Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en caliente.	47
2.5.2 Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en frío.....	49
Capítulo 3. Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP	51
3.1 Estabilidad y flujo.....	51
3.1.1 Estabilidad de mezclas asfálticas en caliente.	53
3.1.2 Flujo de mezclas asfálticas en caliente.....	55
3.2 Módulo de rigidez.....	56
3.2.1 Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en caliente.....	58
3.2.2 Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en frío.	60

3.3 Resistencia a la tracción indirecta	61
3.3.1 Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en caliente.....	63
3.3.2 Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en frío.	64
3.4 Resumen de propiedades físicas y mecánicas	66
Capítulo 4. Análisis ambiental y económico derivado del uso de pavimento asfáltico reciclado RAP	68
4.1 Ventajas ambientales derivadas del uso del RAP en mezclas asfálticas	68
4.2 Aspectos económicos relacionados con el uso del RAP	70
Conclusiones.....	73
Referencias	76

Lista de tablas

Tabla 1	Contenido de asfalto del RAP	28
Tabla 2	Granulometría del RAP en las mezclas asfálticas en caliente	31
Tabla 3	Franja granulométrica de los agregados reciclados en frío	33
Tabla 4	Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en frío	34
Tabla 5	Densidad de mezclas asfálticas en caliente	38
Tabla 6	Densidad de mezclas asfálticas en frío	40
Tabla 7	Gravedad específica de mezclas asfálticas en caliente	44
Tabla 8	Gravedad específica de mezclas asfálticas en frío	45
Tabla 9	Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en caliente	48
Tabla 10	Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en frío	49
Tabla 11	Estabilidad de mezclas asfálticas en caliente	54
Tabla 12	Flujo de mezclas asfálticas en caliente	55
Tabla 13	Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en caliente	58
Tabla 14	Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en frío	60
Tabla 15	Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en caliente	63
Tabla 16	Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en frío	65
Tabla 17	Resumen del efecto de la adición del RAP en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas	66
Tabla 18	Beneficios ambientales derivados del uso del RAP en mezclas asfálticas	70

Lista de figuras

Figura 1. Material de RAP acumulado.....	15
Figura 2. Máquina fresadora de pavimento asfáltico reciclado.....	17
Figura 3. Demolición de pavimento asfáltico reciclado.....	18
Figura 4. Máquina de RAP separado granulométricamente.....	21
Figura 5. Acopio del RAP.....	21
Figura 6. Aparato de extracción de asfalto en mezclas bituminosas.....	26
Figura 7. Ejemplo de extracción del asfalto de una muestra de mezcla asfáltica (RAP)....	27
Figura 8. Gráfico del porcentaje de ahorro de asfalto en función del contenido de RAP adicionado en la mezcla. Autores citados en el gráfico.....	29
<i>Figura 9.</i> Gráfico de la granulometría del RAP empleado en mezclas asfálticas en caliente	32
<i>Figura 10.</i> Gráfico de la granulometría del RAP empleado en mezclas asfálticas en frío. 35	
Figura 11. Probeta tipo Marshall usada para calcular el valor de la densidad de la mezcla asfáltica.....	37
<i>Figura 12.</i> Gráfico de la densidad de las mezclas asfálticas en caliente.....	39
<i>Figura 13.</i> Gráfico de la densidad de las mezclas asfálticas en frío.....	41
<i>Figura 14.</i> Equipo empleado para calcular el valor de la gravedad específica.....	43
Figura 15. Gráfico de la gravedad específica de las mezclas asfálticas en caliente.....	44
Figura 16. Gráfico de la gravedad específica de las mezclas asfálticas en frío.....	46
<i>Figura 17.</i> Gráfico del contenido de vacíos con aire de las mezclas asfálticas en caliente..	48
<i>Figura 18.</i> Gráfico del contenido de vacíos con aire de las mezclas asfálticas en frío.....	50
Figura 19. Equipo Marshall para determinar la estabilidad y flujo.....	52
Figura 20. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.....	54
Figura 21. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente.....	56
Figura 22. Realización de ensayo para obtener módulo de rigidez.....	57
<i>Figura 23.</i> Gráfico del módulo de rigidez de las mezclas asfálticas en caliente.....	59
Figura 24. Gráfico del módulo de rigidez de las mezclas asfálticas en frío.....	61
<i>Figura 25.</i> Realización de ensayo de tracción indirecta.....	62
Figura 26. Gráfico de la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas en caliente.....	64
<i>Figura 27.</i> Gráfico de la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas en frío	65
Figura 28. Fabricación de mezcla asfáltica en caliente.	68
Figura 29. Ahorros derivados del aprovechamiento del RAP.....	72

Introducción

La construcción de pavimentos flexibles, es una de las actividades de la ingeniería civil que genera mayores efectos contaminantes al medio ambiente, principalmente por la utilización de materiales no renovables (agregados y cemento asfáltico), que deben ser extraídos de fuentes naturales, generando consigo un consumo elevado de energía (Contreras, 2018; Miranda & Aguiar, 2019).

Los pavimentos flexibles son diseñados y construidos para trabajar durante un período determinado de tiempo, el cual puede verse reducido o extendido de acuerdo a las exigencias del tráfico vehicular, las condiciones climáticas y al mantenimiento. Cumplida la vida útil del pavimento, se hace necesario retirar la carpeta de rodadura para su posterior reemplazo. Este material removido suele ser trasladado a determinados lugares sin ningún tipo de tratamiento, convirtiéndose de esta manera en un generador de contaminación (Valenzuela, 2019; Reyes, O., et al., 2012).

Las problemáticas ambientales ocasionadas por los materiales removidos del pavimento, los cuales se denominan como “RAP”, por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), han conllevado a que se busquen alternativas para su aprovechamiento mediante métodos de reciclaje en caliente o en frío. En el caso del reciclado en caliente, se requiere de mucha energía eléctrica para calentamiento, lo que conduce a una limitación de los beneficios ambientales y económicos, por otra parte, el reciclado en frío evita la utilización de energía calórica para la

realización de las mezclas, lo que conduce a ahorros energéticos mayores (Castro, 2018; Ramos, 2017).

Con el uso del “RAP” se busca aprovechar este material en nuevas mezclas asfálticas, para que aporten una parte importante del cemento asfáltico, y especialmente, el agregado pétreo que constituirá la nueva mezcla, sin embargo, el empleo del “RAP” sigue suscitando dudas, por lo que existe el interrogante de si es adecuada o no su utilización, pues todavía no existen recomendaciones exactas o metodologías donde se indique la correcta integración de este material en la mezcla, por tal razón, se han desarrollado diversos estudios, principalmente en universidades e instituciones gubernamentales, donde se ha buscado determinar cuál es el porcentaje adecuado de RAP en la mezcla asfáltica, y como afectan los distintos porcentajes sus propiedades físicas y mecánicas.

El objetivo general de esta monografía es recopilar la información existente sobre las mezclas asfálticas fabricadas en caliente y en frío, en las cuales se ha adicionado porcentajes de pavimento asfáltico reciclado “RAP”, con el fin de comparar los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas de cada tipo de mezcla, para lo cual fue necesario el desarrollo de los siguientes objetivos específicos:

- Describir las generalidades del pavimento asfáltico reciclado “RAP”.

- Indicar las propiedades físicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP.
- Especificar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP.
- Realizar un análisis ambiental y económico derivado del uso de pavimento asfáltico reciclado RAP.

Se empleó para ello una metodología enfocada en sintetizar la información más relevante sobre las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de distintos porcentajes de RAP, basados en investigaciones y publicaciones realizadas hasta la fecha. Específicamente se utilizó una metodología denominada como metaanálisis, la cual consiste en una técnica estadística que permite sintetizar la evidencia procedente de estudios disponibles sobre el tema de interés en el marco de una revisión sistemática previa (Botella & Zamora, 2017).

La investigación fue de tipo descriptiva y cualitativa. Se desarrolló en tres etapas, la primera etapa comprendió la recopilación de información bibliográfica referente al tema de estudio, en la segunda etapa se analizó y seleccionó la información, y en la tercera etapa se desarrollaron los capítulos planteados. La duración de esta monografía fue de 16 semanas (4 meses).

La importancia de esta monografía es debida a que incentiva el aprovechamiento de pavimentos asfálticos reciclados que se encuentran deteriorados o que van a ser reemplazados, ya sea por su antigüedad, falta de mantenimiento, exposición a un alto tráfico vehicular, o por las fuertes condiciones climáticas a las que han estado expuestos. De esta manera se emplea un material que bajo otras circunstancias terminaría totalmente dispuesto en vertederos o basureros.

Capítulo 1. Generalidades del pavimento asfáltico reciclado “RAP”

La búsqueda de nuevas alternativas para el desarrollo de la infraestructura de transporte, ha estado asociada con aspectos como el cambio climático, la contaminación, y el agotamiento de recursos no renovables, además del progresivo aumento de las materias primas, por lo que la sostenibilidad tiende a convertirse en la opción más lógica y viable para hacer frente a este conjunto de factores (Leiva, F. & Vargas, A., 2017).

Durante décadas, la tendencia general del sector de la construcción de pavimentos, era remover completamente el material existente y reemplazarlo con nuevos materiales, sin embargo, ante los aspectos mencionados anteriormente, surgió la creciente necesidad de aprovechar los materiales usados, especialmente el denominado Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP) (Buitrago & González, 2016).

El RAP hace referencia al material proveniente del pavimento asfáltico que es recuperado, este se caracteriza por haber alcanzado el final de su vida útil, especialmente como carpeta de rodadura, por lo que debe ser removido del pavimento (Miranda & Aguiar, 2019).

La importancia del RAP radica en la cantidad de este material que anualmente es recolectada. Solo en los Estados Unidos se estima una recolección anual de cerca de 77 millones de toneladas de RAP desde el año 2016, y para el caso de la Unión Europea esta cifra supera los 260 millones de toneladas anuales. Esta alta cantidad de material removido se ha convertido en

una problemática de carácter ambiental, pues el alto efecto contaminante que producen repercute negativamente en el ambiente. En la figura 1 se observa un montículo de RAP previamente removido (Contreras, 2018).



Figura 1. Material de RAP acumulado. (Federal Highway Administration, 2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, p. 20.

En este capítulo se abordan los aspectos clave para describir las características del RAP, por lo que a continuación se abordan los aspectos generales que permiten lograr este propósito.

1.1 Historia del RAP

El aprovechamiento del RAP no es relativamente reciente, los primeros usos de este material se remontan a principios del Siglo XX en los Estados Unidos, sin embargo, la amplia oferta de petróleo en ese entonces hacía fácil la obtención de asfalto, por lo que esta técnica no fue desarrollada en profundidad, y solo se limitó a publicaciones científicas de investigadores que promovían su reutilización, como lo hizo R. Taylor, quien expuso en un congreso en

Singapur, en el año 1930, que era viable emplear el RAP en mezclas asfálticas en caliente (Villafuerte, 2014).

A pesar de que ya existían evidencias de su utilidad, fue hasta la década de los 70's que se tomó en consideración el aprovechamiento del RAP, esto debido al Embargo Petrolero Árabe de principios de esta década, lo que conllevó a un incremento sustancial del precio de los hidrocarburos, y por tanto de sus derivados, el asfalto o cemento asfáltico. Ante este panorama, se buscó implementar el reciclado de pavimentos asfálticos, ya que estos eran totalmente desechados en ese entonces, para ello, fue necesario el desarrollo de equipos, los cuales permitían retirar el material que conforma la carpeta de rodadura del pavimento, y que se encuentra en mal estado, fisurado, o agrietado (Ramos, 2017).

Desde entonces, en distintos países se dio importancia al uso del RAP, sin embargo, con los acuerdos logrados con los países árabes a comienzos de 1980, y por tanto, con la normalización de los precios del petróleo, se redujo la importancia de esta técnica. Fue hasta comienzos del Siglo XIX, y ante la celebración de importantes acuerdos y cumbres en pro del desarrollo sostenible, que se retomó e incentivó el uso masivo de esta técnica, ya para el año 2016 en países como Estados Unidos y la Unión Europea se reportó un uso del 99% del RAP para la construcción de pavimentos asfálticos nuevos (Villafuerte, 2014).

En Colombia, y la mayor parte de países latinoamericanos no se ha prestado importancia al uso del RAP, por lo que existen pocos reportes sobre la cantidad de RAP que se produce anualmente en el país, además de ser pocos los casos de aplicación de este material.

1.2 Forma de obtención del RAP

Actualmente para la obtención del RAP se emplean dos procesos mecánicos. El primero de ellos es el denominado fresado, el cual consiste en emplear maquinaria especializada para esta actividad, la cual retira el pavimento hasta cierto espesor, generalmente el correspondiente a la carpeta de rodadura, aunque también puede incluirse la capa de base, en los casos que se considere necesario. En la figura 2 se observa un ejemplo de este tipo de técnica (CEDEX, 2011).



Figura 2. Máquina fresadora de pavimento asfáltico reciclado. Victoryepes.blogs.upv.es, 2021. Obtenido en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/fresadora/>

El segundo método es el de demolición mecánica, el cual consiste en emplear maquinaria pesada, como bulldozers, o retroexcavadoras, las cuales fragmentan la capa superior del pavimento a reciclar, generando por tanto bloques de tamaños heterogéneos. Este procedimiento, aunque más económico que el anterior, genera una mayor afectación hacia los agregados, por lo que el material obtenido de esta forma debe ser usado en vías de poco requerimiento técnico, generalmente vías de tipo secundario o terciario. En la figura 3 se observa un ejemplo de este tipo de demoliciones (CEDEX, 2011).

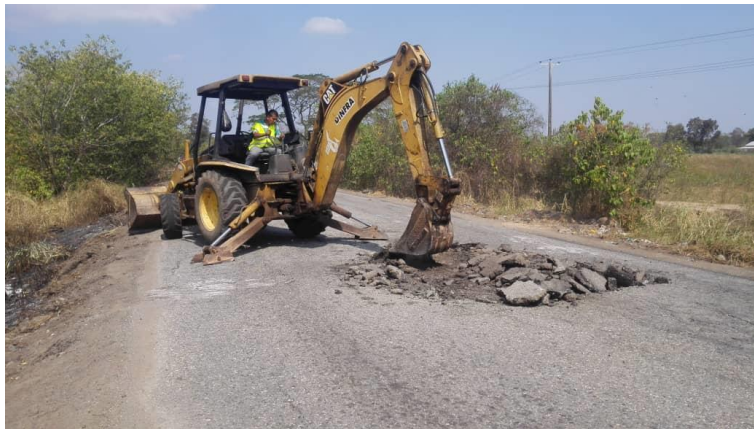


Figura 3. Demolición de pavimento asfáltico reciclado. Lacarbonífera, 2021. Obtenido en: <https://lacarbonifera.com/inician-demolicion-de-pavimento-danado-en-palau-colocaran-concreto-hidraulico/>

1.3 Forma de empleo del RAP

El RAP recolectado puede ser usado in situ, empleándose en la elaboración de las nuevas mezclas asfálticas en el mismo sitio donde son obtenidas, o ser transportado a plantas asfálticas, los métodos de utilización se describen a continuación:

1.3.1 Reciclado in situ en caliente.

Es el método más convencional para el uso del RAP, el material reciclado es empleado en el lugar de la obra sometiéndolo a altas temperaturas, comprendidas entre los 120 y los 180°C, mezclándose con agentes químicos rejuvenecedores y con los materiales que complementan la nueva mezcla, finalmente esta es extendida y compactada según los requerimientos de espesor de cada vía. Con esta técnica se emplea la totalidad del material reciclado (Méndez, 2015).

Este método tiene como principal ventaja, el producir la menor degradación de los áridos, ya que se aprovecha más la capacidad aglomerante del asfalto contenido en el RAP, sin embargo, no permite solucionar los problemas estructurales del pavimento, además de que el calentamiento oxida y fragiliza el asfalto. Debe añadirse los inconvenientes derivados de la emisión de humos, el peligro de quemaduras para los operarios, los sobrecalentamientos, y las paradas de las máquinas, lo que en conjunto dificultan la aplicación de esta técnica (CEDEX, 2011).

1.3.2 Reciclado in situ en frío.

Consiste en emplear el RAP y mezclarlo con equipos multifunción con adiciones de agua, y de materiales conglomerantes, como el cemento, o de ligantes, cemento asfáltico. Este proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque también puede aumentarse hasta valores no superiores

a los 70°C. Con el reciclado in situ en frío se utiliza la totalidad de los materiales reciclados (Zúñiga, 2016).

Tanto el reciclado in situ en caliente como en frío, suele aplicarse cuando solo se busca mejorar los problemas superficiales del pavimento, correspondientes a la carpeta de rodadura, pues el RAP puede emplearse en el mismo sitio de forma rápida. En caso de que se busque dar solución a problemas de tipo estructural, que incluyan mejoramientos de las capas inferiores del pavimento asfáltico, como la sub base o la subrasante, se debe trasladar el material hacia las plantas asfálticas, o almacenarlo hasta que se considere necesario su empleo (Romero, 2011).

1.3.3 Reciclado en planta.

Cuando el RAP va a ser empleado en planta, debe ser transportado a los acopios correspondientes para el almacenamiento del material. Se recomienda que en estos lugares se permita la separación del RAP proveniente de diferentes sitios, pues de acuerdo a su procedencia se pueden obtener propiedades diferentes, especialmente en lo referente a los agregados y al ligante asfáltico. Ya en planta, el RAP puede ser utilizado posteriormente tanto en mezclas asfálticas en caliente, como en frío, sin embargo, en ambos casos se somete al RAP a un proceso de tamizado para separar los agregados, generalmente en dos grupos: finos y gruesos, de esta manera, resulta más eficiente el uso del material, el cual puede ser empleado en las proporciones requeridas para cada mezcla a fabricar, en la figura 4 se observa los agregados del RAP separados de acuerdo a su granulometría. Esta consideración es fundamental, ya que una de las

principales razones por las que se recicla el RAP, es porque proporciona gran parte de los agregados de la nueva mezcla, con lo cual se permiten ahorros económicos (Villafuerte, 2014; Contreras, 2018).



Figura 4. Máquina de RAP separado granulométricamente. Villafuerte, 2014. Diseño de mezclas asfálticas elaboradas con concreto asfáltico reciclado RAP y Agentes Rejuvenecedores, p. 5.

Cuando el material RAP es tamizado y separado, es apilado en los acopios correspondientes ubicados en la planta, de esta manera, los agregados permanecen disponibles para su uso, en la figura 5 se observa un ejemplo de este proceso.



Figura 5. Acopio del RAP. Zúñiga, 2016. Mezcla asfáltica en caliente con pavimento asfáltico recuperado RAP, p. 6.

1.4 Uso del RAP en la mezcla asfáltica

Aunque el RAP es un material reutilizado, existen ciertas recomendaciones generales para su empleo, una de las principales, es que este no provenga de pavimentos que presenten deformaciones plásticas (ahuellamiento). Por otra parte, se deben aplicar los respectivos ensayos al material en lo referente a granulometría, densidades, absorción, contenido de humedad, además de determinarse el porcentaje de asfalto presente. Se suele indicar que si el porcentaje de asfalto en el RAP es inferior al 3%, se considera a este como un agregado dentro de la nueva mezcla, pero si la cantidad de asfalto es mayor al 3%, se debe considerar este valor, y restarlo al porcentaje óptimo de asfalto de la nueva mezcla, para evitar un exceso de ligante. Estas recomendaciones fueron publicadas por la National Pavement Association (NAPA) de los Estados Unidos, quienes en el año 2009 publicaron el Manual MS-2, donde se estipula las condiciones que debe cumplir el RAP (Rivero, 2018).

En cuanto al porcentaje de RAP a emplear, las recomendaciones resultan muy divididas, por un lado, en países como España, por ejemplo, no se permiten porcentajes superiores al 50%, mientras que en Estados Unidos, Bélgica, Alemania, y otros países europeos, se acepta el uso del 100% del RAP, siempre y cuando este no presente un deterioramiento excesivo. Así mismo en Colombia el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), en las especificaciones del Artículo 450 *Reciclaje de pavimento asfáltico en el sitio con emulsión asfáltica*, permite el empleo de este material en mezclas asfálticas nuevas, en un porcentaje máximo de 20%. En el caso del Instituto

Nacional de Vías (INVIAS), este permite un máximo de 40% de RAP en las mezclas asfálticas, regidas por las normas I.N.V. 461 y 462, para mezclas en frío y en caliente, respectivamente (Contreras, 2018).

En lo referente al diseño, se recomienda aplicar la metodología tipo Marshall, para lo cual se deben probar diferentes dosificaciones con adiciones de RAP y obtener las propiedades correspondientes, así mismo, se debe elaborar una muestra patrón sin empleo de RAP, a las que también es necesario obtener todas sus propiedades. Se debe escoger la dosificación de RAP que por lo menos cumpla con los resultados de la mezcla patrón (sin RAP) (Rivero, 2018).

Capítulo 2. Propiedades físicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP

Para comprobar si el uso del RAP es adecuado, se debe realizar la determinación de un conjunto de propiedades que permitan corroborar la idoneidad de la mezcla asfáltica fabricada. En este capítulo se abordan las propiedades físicas que han sido evaluadas en diferentes investigaciones donde se realizó el empleo del RAP.

Es necesario para el desarrollo de la nueva mezcla asfáltica, tanto en caliente como en frío, conocer las características previas que posee el material reciclado RAP, para lo cual deben realizarse pruebas de granulometría, además de determinar su contenido de asfalto presente.

2.1. Contenido de asfalto presente en el RAP.

El RAP, aunque representa un material reciclado y por tanto deteriorado, conserva un gran porcentaje del contenido de asfalto original, por lo que debe calcularse el porcentaje de asfalto presente, el cual será considerado en el diseño de la nueva mezcla, si el porcentaje obtenido es mayor a 3%, como ya se hizo mención en el capítulo anterior. Para calcular el porcentaje de asfalto a incluir en la nueva mezcla, simplemente se debe restar al porcentaje de asfalto óptimo, el porcentaje de asfalto que contiene el RAP multiplicado por el porcentaje a emplear en la mezcla. El cálculo se resume en la ecuación 1 (Rivero, 2018).

$$P_{b(\text{virgen})} = P_{b(\text{óptimo})} - P_{RAP} \times P_{b(RAP)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $P_{b(\text{virgen})}$: Porcentaje de asfalto virgen a utilizar en la mezcla.
- $P_{b(\text{óptimo})}$: Porcentaje de asfalto óptimo calculado para la mezcla.
- P_{RAP} : Porcentaje de RAP a utilizar.
- $P_{b(RAP)}$: Porcentaje de asfalto contenido en el RAP.

Para calcular la cantidad de asfalto presente en el RAP, se debe emplear la norma ASTM D2172 *Métodos de prueba estándar para la extracción cuantitativa de betún de mezclas bituminosas de pavimento*. En Colombia, la norma semejante corresponde a la I.N.V. 732 *Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos*. En esta norma se establece que el método más adecuado para extraer el asfalto presente en una mezcla asfáltica (en este caso, RAP), es empleando un aparato de extracción como el que se observa en la figura 6 (I.N.V. E-732, 2013).



Figura 6. Aparato de extracción de asfalto en mezclas bituminosas. Obtenido en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/stct-4a-asphalt-centrifugal-bitumen-extraction-test-equipment-517185342.html>

El procedimiento consiste en emplear una muestra de la mezcla asfáltica, la cual se coloca en un recipiente, donde se adicionan disolventes como el tricloroetileno, el cloruro de metileno o bromuro n-propilo, y se deja el tiempo suficiente para que el disolvente desintegre la muestra. Posteriormente el material es centrifugado en el aparato de extracción hasta que se retire todo el asfalto contenido en la muestra, como se observa en la figura 7. Este proceso se realiza de forma lenta y se aumenta gradualmente hasta alcanzar una velocidad de máximo 3600 rpm o hasta que deje de fluir el disolvente por el desagüe. Posteriormente se determina la cantidad de material contenido en el recipiente. El contenido de asfalto se determina por medio de la ecuación 2. Los agregados pétreos de la muestra analizada se emplean para la determinación de la granulometría (I.N.V. E-732, 2013).



Figura 7. Ejemplo de extracción del asfalto de una muestra de mezcla asfáltica (RAP). Obtenido en:
<https://www.facebook.com/media/set/?set=a.822202154584024.1073741829.799069206897319&type=3>

$$\text{Contenido de asfalto (\%)} = \left[\frac{(W_1 - W_2) - (W_3 + W_4)}{(W_1 - W_2)} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

W_1 : Masa de la muestra estudiada.

W_2 : Masa del agua en la muestra estudiada.

W_3 : Masa del agregado pétreo extraído.

W_4 : Masa del material mineral extraído.

En la siguiente tabla se ilustra la cantidad de asfalto adicionado en la nueva mezcla, gracias a la adición del RAP en las investigaciones recopiladas en el presente trabajo.

Tabla 1

Contenido de asfalto del RAP

Autor	Contenido de Asfalto obtenido en el RAP (%)	Contenido de asfalto óptimo para nueva mezcla (%)	Porcentaje de RAP adicionado a la nueva mezcla (%)	Asfalto adicionado en la nueva mezcla (%)	Ahorro de asfalto (%)
Contreras, S., 2018	4,3	5,2	15	4,6	12,4
Rivero, M., 2018	4,3	5,3	25	4,2	20,3
Buitrago, J. & González, A., 2016	4,1	5,1	20 40 60	4,3 3,46 2,64	16,1 32,2 48,2
Ramos, O., 2017	4,5	6,8	15 30 45	6,1 5,45 4,77	9,9 19,9 29,8
Villafuerte, D., 2014	4,2	5,8	30	4,5	21,7
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020	4,14	5,5	40	3,8	30,1
Izaks, R., et al., 2015	3,96	4,7	30 50	3,5 2,72	25,3 42,1
Arshad, et al., 2018	4	5,35	15 25 35	4,8 4,35 3,95	11,2 18,7 26,2

Nota: Autores citados en la tabla.

Se observa en los datos de la tabla anterior, que el ahorro de asfalto en la nueva mezcla asfáltica, es proporcional a la cantidad de RAP empleado, en la figura 8 se muestra gráficamente este ahorro de asfalto. Los porcentajes de ahorro oscilan entre un 10 a 48% de la cantidad de asfalto requerido en la nueva mezcla.

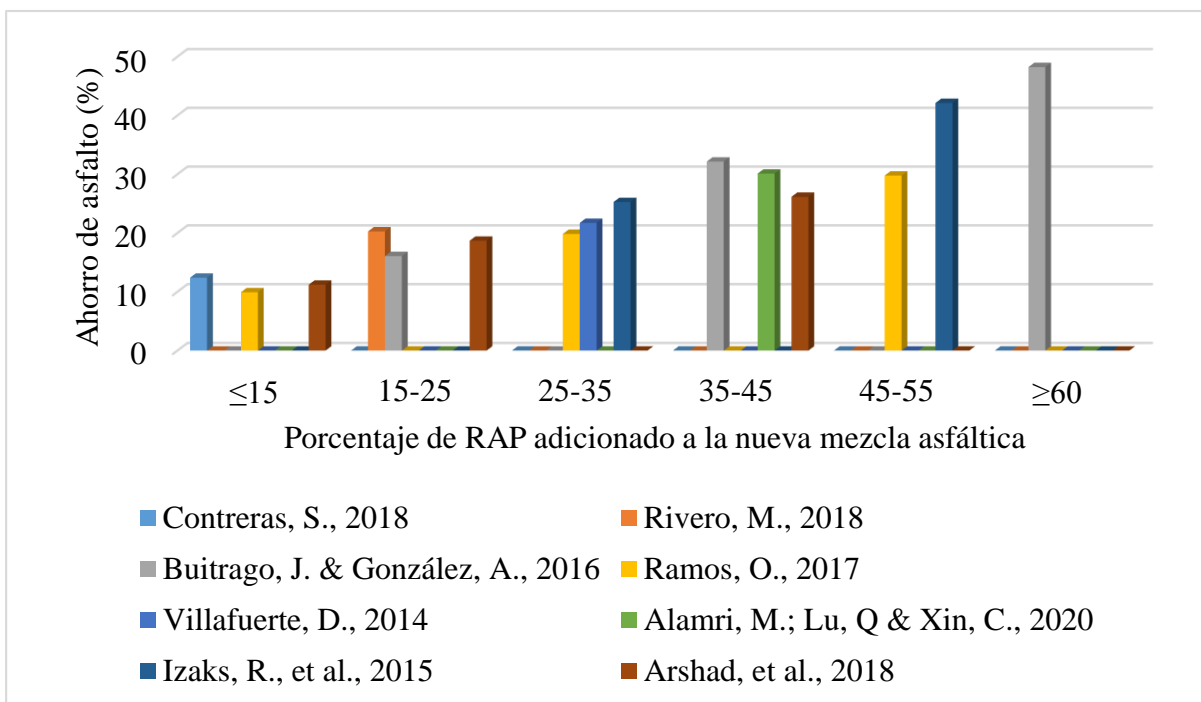


Figura 8. Gráfico del porcentaje de ahorro de asfalto en función del contenido de RAP adicionado en la mezcla. Autores citados en el gráfico.

2.2 Granulometría.

Como se mencionó en el capítulo 1, el uso del RAP se asocia principalmente al aprovechamiento de los agregados pétreos presentes en este material, por lo que al conocer su granulometría, se puede determinar la cantidad de aporte que ofrece el RAP para la nueva mezcla. Por ello, se recomienda emplear la ecuación 3, para determinar el porcentaje de agregado pétreo que se empleará del RAP (Rivero, 2018).

$$P_{\text{Aporte RAP}} = P_{\text{RAP a emplear}} \times \left(1 - \frac{P_{\text{Asfalto en RAP}}}{100}\right)$$

Ecuación 3

Donde:

- $P_{Aporte\ RAP}$: Porcentaje de agregado pétreo en el RAP.
- $P_{RAP\ a\ emplear}$: Porcentaje específico de RAP a utilizar.
- $P_{Asfalto\ en\ RAP}$: Porcentaje de asfalto presente en el RAP.

A los agregados pétreos contenidos en el RAP, después de realizada la extracción del asfalto presente (como se detalló anteriormente), es necesario calcularles su correspondiente granulometría, para lo cual se debe emplear la ASTM D5444 *Método de prueba estándar para el análisis mecánico del tamaño del agregado extraído*. En Colombia, la norma similar es la I.N.V. 782 *Análisis granulométrico de los agregados extraídos de mezclas asfálticas* (I.N.V. E-782, 2013).

2.2.1 Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en caliente.

El RAP empleado en mezclas asfálticas en caliente debe cumplir con lo establecido en el Artículo 462 del INVIAS: *Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente*, donde se establece que la granulometría debe corresponder con alguna de las gradaciones establecidas en el Artículo 450 *Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)*. Así mismo, se deberán adicionar los agregados en las proporciones que sean requeridas para corresponder con dichas gradaciones, en caso de que el material (RAP) no cumpla totalmente. En la tabla 2 se muestran el conjunto de gradaciones recopiladas sobre este tipo de mezclas.

Tabla 2

Granulometría del RAP en las mezclas asfálticas en caliente

Autor	Mezcla	% Pasa - Tamiz									
		N° 3/4" 19,05 mm	N° 1/2" 12,7 mm	N° 3/8" 9,53 mm	N° 4 4,75 mm	N° 8 2,36 mm	N° 16 1,18 mm	N° 30 0,6 mm	N° 50 0,36 mm	N° 100 0,15 mm	N° 200 0,075 mm
Contreras, S., 2018		100	92	85	66	49	36	26	18	13	9
Rivero, M., 2018		100	82	66	43	30	22	16	12	9	6,4
Ramos, O., 2017		100	98,4	78,3	49,1	36,4	20,8	13,9	10,5	7,4	4,5
Villafuerte, D., 2014	En caliente	100	95	87,1	61,5	43	33	24,5	19,7	13,4	7,9
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020		100	94,2	88,2	63,5	45,9	33,2	22,3	16,9	12,3	6,8
Izaks, R., et al., 2015		100	96,4	89,3	74,7	49,8	35,9	41,3	29,4	16,4	11,1

Nota: Autores citados en la tabla.

Comparando el conjunto de gradaciones de la tabla anterior respecto a las indicadas en el Artículo 450 del INVIAS, se observa que estas corresponden en su mayoría con la gradación MCD-19, es decir, como mezclas de gradación continua densa. En la figura 9 se observa la representación gráfico de estos datos.

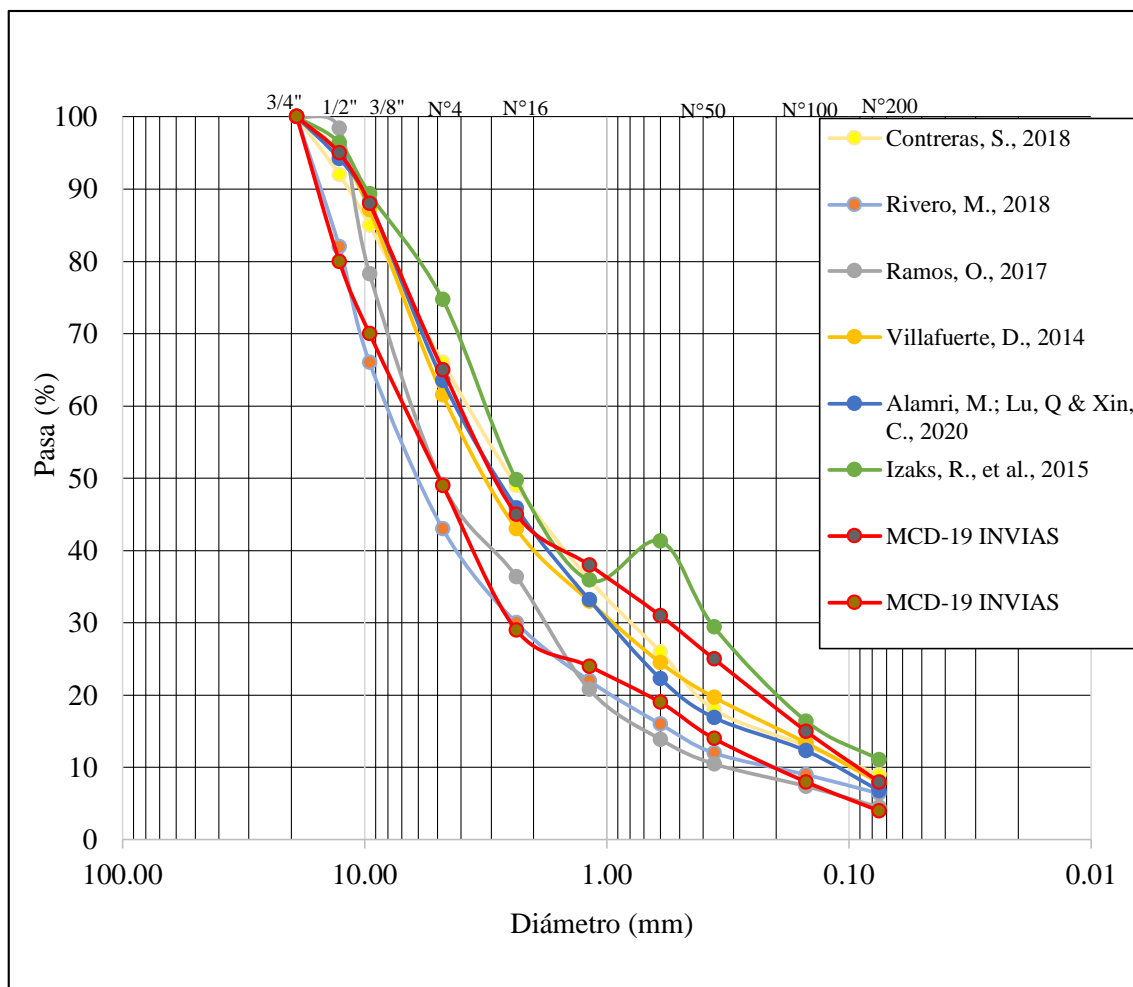


Figura 9. Gráfico de la granulometría del RAP empleado en mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

Con estos resultados, se facilita corroborar la cantidad de agregados pétreos que aporta el RAP para la nueva mezcla. En el caso de las mezclas asfálticas en caliente, lo común es emplear solo un porcentaje de RAP en la nueva mezcla, en esta investigación se recopilamos datos de mezclas asfálticas donde la adición de RAP oscila entre 15 y 60%. De acuerdo al porcentaje de RAP adicionado, corresponde la cantidad de agregado pétreo ahorrado.

2.2.2 Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en frío.

Para el caso de mezclas asfálticas en frío, el RAP, y la granulometría empleada en la nueva mezcla, debe cumplir con la gradación indicada en el Artículo 461 del INVIAS: *Reciclado de pavimento asfáltico en frío en el lugar empleando ligantes bituminosos*, cuyos requerimientos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Franja granulométrica de los agregados reciclados en frío

Tamiz (mm /U.S. Standard)	37,5 1 1/2"	25,0 1"	19,0 3/4"	9,5 3/8"	4,75 No.4	2,0 No.10	0,425 No.40	0,075 No.200
% Pasa	100	75-100	65-100	45-75	30-60	20-45	10-30	5-20

Nota: Adaptada del Artículo 461-1 del INVIAS.

En la tabla 4 se muestran las granulometrías de RAP empleadas en mezclas asfálticas en frío indicadas en los diversos estudios recopilados en este trabajo.

Tabla 4

Granulometría del RAP en mezclas asfálticas en frío

Autor	Mezcla	% Pasa - Tamiz						
		N° 3/4" 19,05 mm	N° 1/2" 12,7 mm	N° 3/8" 9,53 mm	N°4 4,75 mm	N°8 2,36 mm	N°50 0,36 mm	N°200 0,075 mm
Arias, R. & Rivera, B., 2019		100	90,4	78,2	57,4	42,1	17,8	8
Yingjun, et al, 2019		100	88,2	77,3	55,9	40,2	23,2	6,7
Tarsi, G., Tataranni, P. & Sangiorgi, C., 2020	En frío	100	87,3	76,4	53,2	38,2	21,9	7,3
Du, S., 2015		100	89,2	78,3	52,8	39,3	19,2	7,9
Unger, et al., 2020		100	96,3	74,2	60,3	42,3	26,3	8,4
Castro, A., 2018		100	89,2	76,3	52,3	40,1	16,3	6,2

Nota: Autores citados en la tabla.

Para visualizar en detalle las granulometrías presentadas en la Tabla 4, en la figura 10 se muestra la gráfica correspondiente.

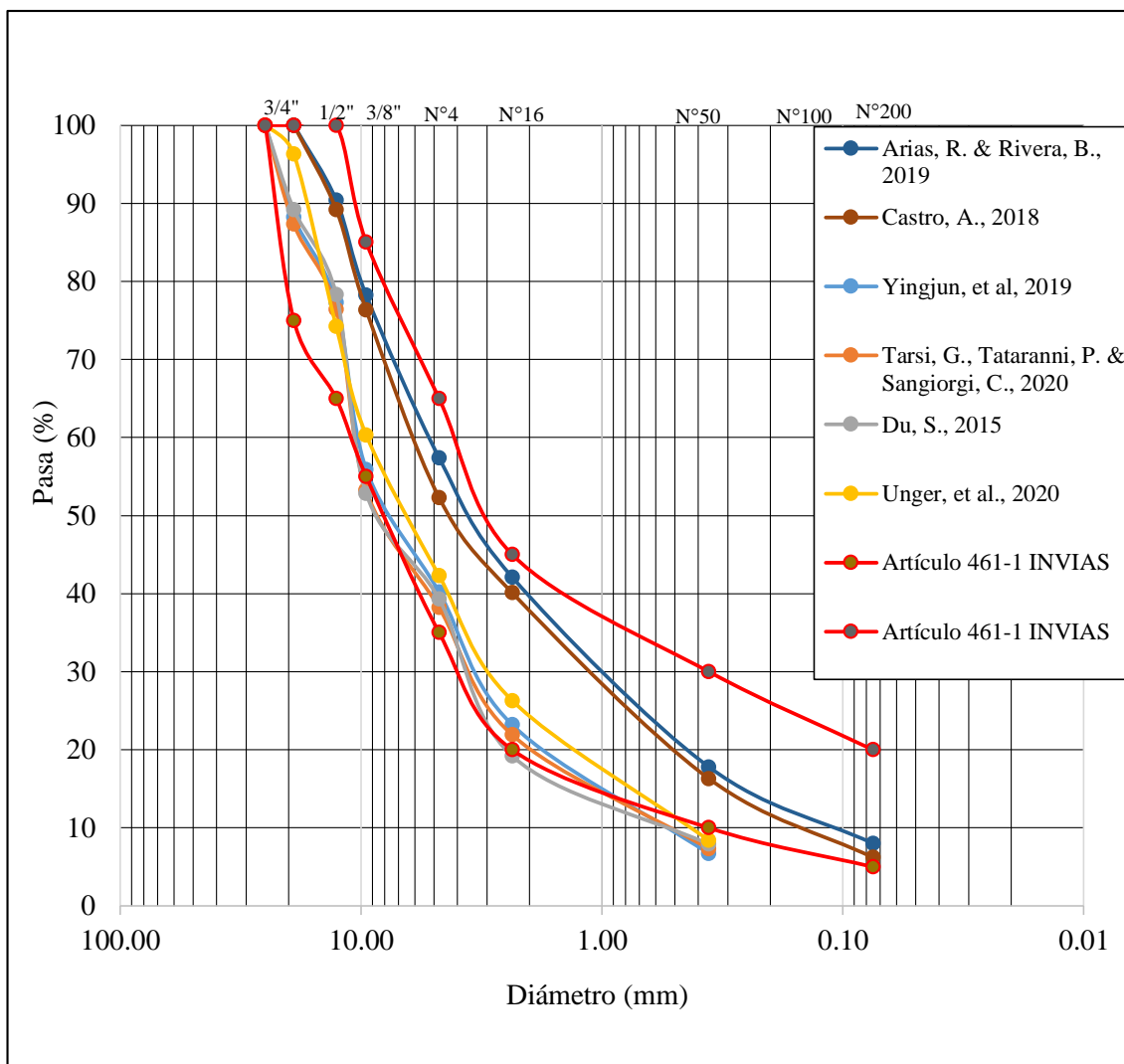


Figura 10. Gráfico de la granulometría del RAP empleado en mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

Se observa en los dos gráficos anteriores, que la granulometría del RAP original, a lo recomendado por instituciones como el INVIAS. Para las mezclas asfálticas en frío, se emplea la totalidad del RAP, y solo se adiciona o se resta la cantidad de agregado, para un tamiz específico, que sea necesario para cumplir con la granulometría de la nueva mezcla a fabricar, en muchos casos, la granulometría del RAP se mantiene igual en la nueva mezcla, simplemente se adiciona la emulsión asfáltica requerida.

2.3 Densidad

En las mezclas asfálticas, la densidad está definida como su peso unitario, o como el peso de un volumen específico de la mezcla. Esta propiedad puede ser obtenida aplicando los procedimientos de ensayo descritos en la ASTM D-2041 *Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures* (Método de ensayo estándar de densidad teórica máxima de mezclas de pavimentación bituminosa). En Colombia, la norma correspondiente es la I.N.V. E-802 *Determinación de la gravedad específica bulk y de la densidad de mezclas asfálticas compactadas mediante el método de sellado automático por vacío* (Romero, 2011; INVIAS, 2013).

El procedimiento para obtener el valor de la densidad, consiste en emplear probetas Marshall compactadas, las cuales son introducidas en bolsas plásticas, a las cuales, mediante el empleo de una cámara de vacíos, son selladas totalmente extrayendo el aire presente en la bolsa. Cuando la bolsa es finalmente asegurada, se sumerge en agua para obtener su densidad mediante la relación de volumen correspondiente. En la figura 12 se observa una probeta empleada para este ensayo (INVIAS, 2013).



Figura 11. Probeta tipo Marshall usada para calcular el valor de la densidad de la mezcla asfáltica. INVIAS, 2013.

Las expresiones para el calcular la densidad corresponden a las ecuaciones 4 y 5.

$$\text{Gravedad específica bulk} = \frac{A}{[C+(B-A)]-E-\frac{B-A}{F_T}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A: Masa de la muestra seca al aire, g;

B: Masa de la muestra seca sellada, g;

C: Masa final de la muestra luego de removerla de la bolsa, g;

E: Masa de la muestra sellada sumergida en agua, g;

F_T : Gravedad específica aparente del material plástico de la bolsa a $25\pm 1^\circ\text{C}$ ($77\pm 1,8^\circ\text{F}$), suministrada por el fabricante.

$$\text{Densidad} = (\text{Gravedad específica bulk}) * (\gamma) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde γ : Densidad del agua a 25°C (77°F) (997,0 kg/m³, 0,997 g/cm³ o 62,4 lb/pie³).

2.3.1 Densidad de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 5 se ilustran los resultados de la densidad obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 12 su representación gráfica.

Tabla 5

Densidad de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)								
		0	15	20	25	30	35	40	45	60
Contreras, S., 2018	gr/cm ³	2,33	2,33	-	-	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		2,35	-	2,32	-	-	-	-	-	-
Valdés, V. et al, 2008		2,40	-	2,38	-	-	-	-	-	-
Ramos, O., 2017		2,32	2,30	-	-	2,28	-	-	2,26	-
Villafuerte, D., 2014		2,41	-	-	-	2,38	-	-	-	-
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020		2,39	-	-	-	-	-	2,36	-	-
Arshad, et al., 2018		2,37	2,36	-	2,35	-	2,33	-	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

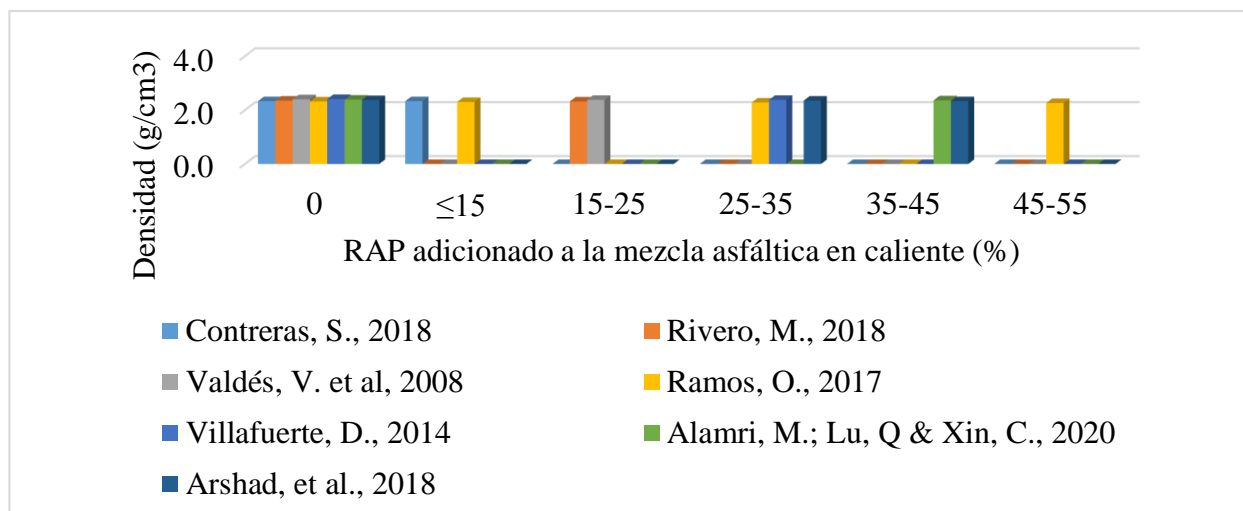


Figura 12. Gráfico de la densidad de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

Los datos anteriores, muestran que la densidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de RAP, tiende a mantenerse igual a pesar del aumento del porcentaje de RAP, presentando variaciones menores al 2% para todos los casos. Lo que indica que esta propiedad no se ve afectada negativamente por la inclusión del RAP.

2.3.2 Densidad de mezclas asfálticas en frío.

En la Tabla 6 se ilustran los resultados de la densidad obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en frío, y en la figura 13 su representación gráfica.

Tabla 6

Densidad de mezclas asfálticas en frío

Autor	Unidad	Emulsión asfáltica adicionada al RAP (%)						
		0	2	3	4	5	7	9
Arias, R. & Rivera, B., 2019	gr/cm ³	2,18	-	2,16	-	2,12	2,08	2,03
Castro, A., 2018		2,09	2,08	2,07	2,06	2,09	-	-
Du, S., 2015		2,14	-	2,15	-	2,13	2,12	2,09
Yingjun, et al, 2019		2,11	-	2,1	-	2,09	2,08	2,07
Tarsi, G., Tataranni, P. & Sangiorgi, C., 2020		2,13	-	2,11	-	2,1	2,08	2,06

Nota: Autores citados en la tabla.

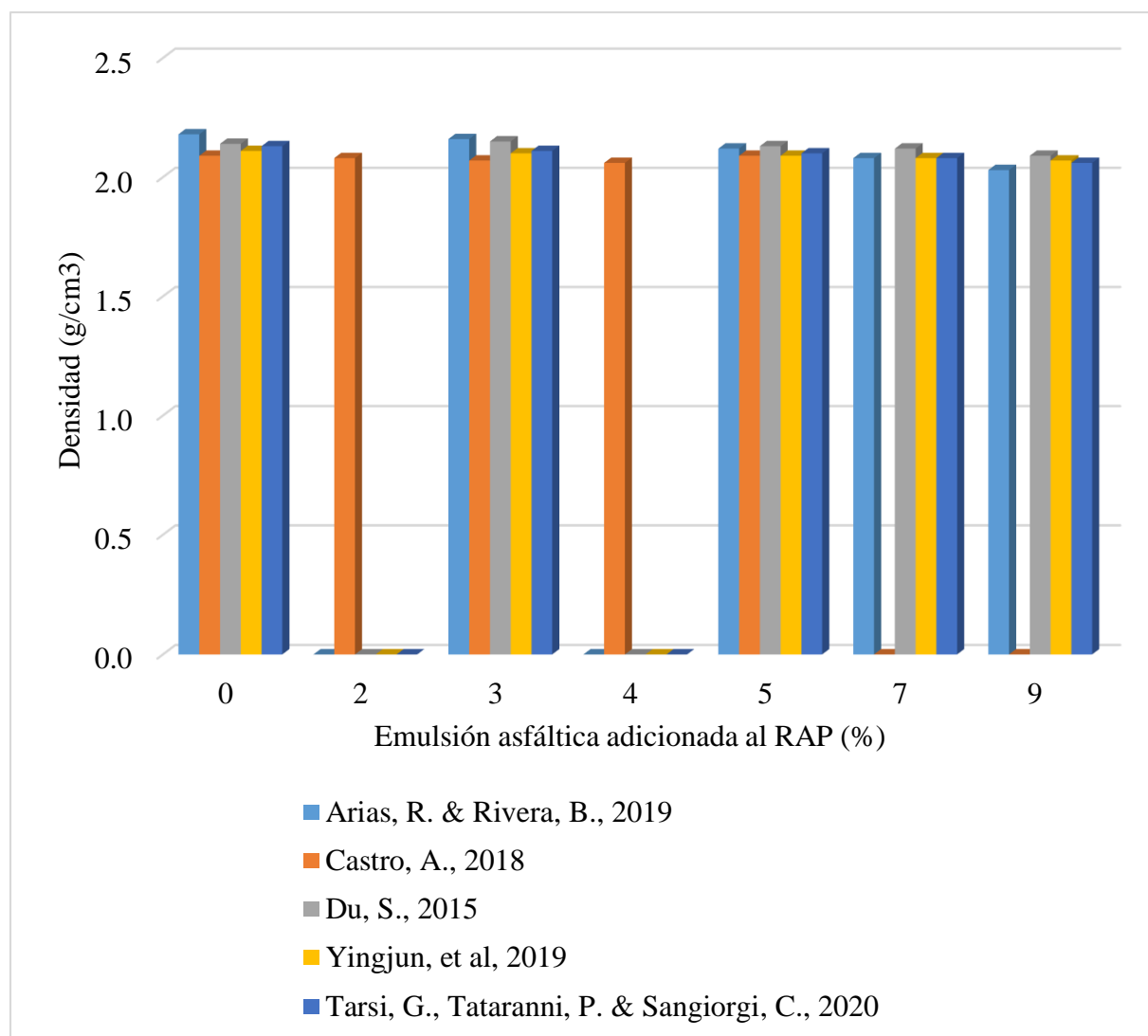


Figura 13. Gráfico de la densidad de las mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

Al igual que las mezclas en caliente, las mezclas asfálticas en frío, tienden a conservar el mismo valor en cuanto a la densidad a pesar del aumento de la emulsión asfáltica adicionada en el RAP, sin embargo, se presenta una variación comprendida entre 2 a 4%.

2.4 Gravedad específica

Esta propiedad hace referencia a la relación entre la masa de un volumen dado de material, en este caso, una mezcla asfáltica, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. Para calcular este valor se puede emplear, en Colombia, los procedimientos indicados en la I.N.V. E-735 *Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos*, o con la I.N.V. E-803 *Determinación de la gravedad específica máxima y de la densidad máxima de las mezclas asfálticas para pavimentación mediante el método de sellado automático por vacío*. (INVIAS, 2013).

El procedimiento para obtener el valor de la gravedad específica consiste en emplear una muestra de la mezcla asfáltica (RAP) suelta, seca al horno y previamente pesada, está es introducida en un recipiente en el cual se adiciona agua destilada. Al agua se le retiran los vacíos existentes mediante equipos especiales para ello. Finalmente se adiciona el agua destilada necesaria para ensazar el nivel marcado en el recipiente y se toman los pesos respectivos para calcular la gravedad específica. En la figura 15 se observan los equipos necesarios para realizar este ensayo. Se calcula la gravedad específica mediante la ecuación 6 (INVIAS, 2013).

$$\text{Gravedad específica} = \frac{B}{A+B-C-\frac{A}{V_C}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

B: Masa en el aire de la muestra seca, g;

A: Masa combinada de las bolsas plásticas, g;

C: Masa de la mezcla y de las bolsas sumergidas, g;

V_c : Gravedad específica aparente combinada de las dos bolsas plásticas a 25°C (77°F), suministrada por el fabricante.



Figura 14. Equipo empleado para calcular el valor de la gravedad específica. INVIAS, 2013.

2.4.1 Gravedad específica de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 7 se ilustran los resultados de la gravedad específica obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 15 su representación gráfica.

Tabla 7

Gravedad específica de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	Porcentaje de RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)								
		0	15	20	25	30	35	40	45	60
Contreras, S., 2018		2,65	2,63	-	-	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		2,49	2,48	-	-	-	-	-	-	-
Buitrago, J. & González, A., 2016	Ad.	-	-	2,42	-	-	-	2,41	-	2,43
Ramos, O., 2017		2,70	2,69	-	-	2,69	-	-	2,67	-
Villafuerte, D., 2014		2,83	-	-	-	2,80	-	-	-	-
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020		2,72	-	-	-	-	-	2,69	-	-
Arshad, et al., 2018		2,39	2,39	-	2,40	-	2,40	-	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

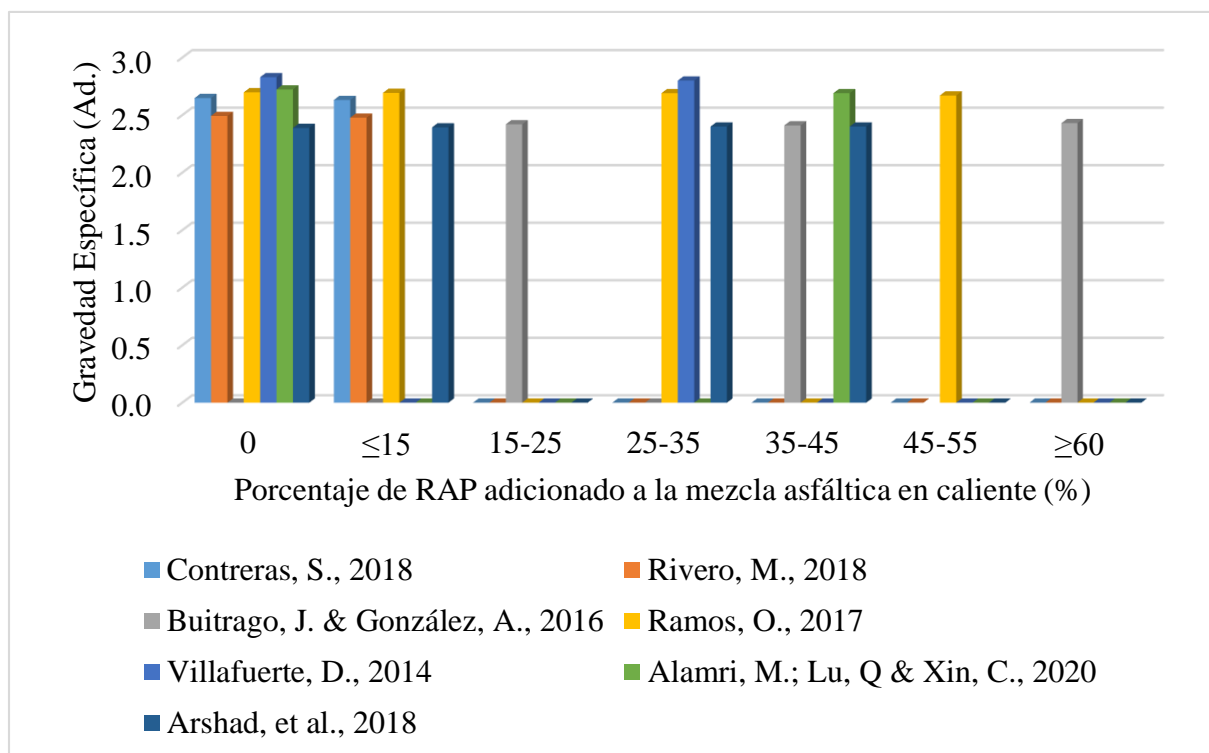


Figura 15. Gráfico de la gravedad específica de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

La gravedad específica en las mezclas asfálticas en caliente, no presenta variaciones representativas con la adición de RAP, incluso con adiciones de 60% de RAP, se mantienen los mismos valores en esta propiedad que en las mezclas sin inclusión de RAP.

2.4.2 Gravedad específica de mezclas asfálticas en frío.

En la Tabla 8 se ilustran los resultados de la gravedad específica obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en frío, y en la figura 16 su representación gráfica.

Tabla 8

Gravedad específica de mezclas asfálticas en frío

Autor	Unidad	Porcentaje de emulsión asfáltica adicionada al RAP (%)						
		0	2	3	4	5	7	9
Arias, R. & Rivera, B., 2019		2,56	-	2,55	-	2,54	2,52	2,5
Castro, A., 2018		2,41	2,41	2,37	2,35	2,42	-	-
Du, S., 2015		2,52	-	2,5	-	2,49	2,48	2,51
Yingjun, et al, 2019	Ad.	2,51	-	2,5	-	2,49	2,48	2,47
Tarsi, G., Tataranni, P. & Sangiorgi, C., 2020		2,53	-	2,52	-	2,5	2,49	2,47

Nota: Autores citados en la tabla.

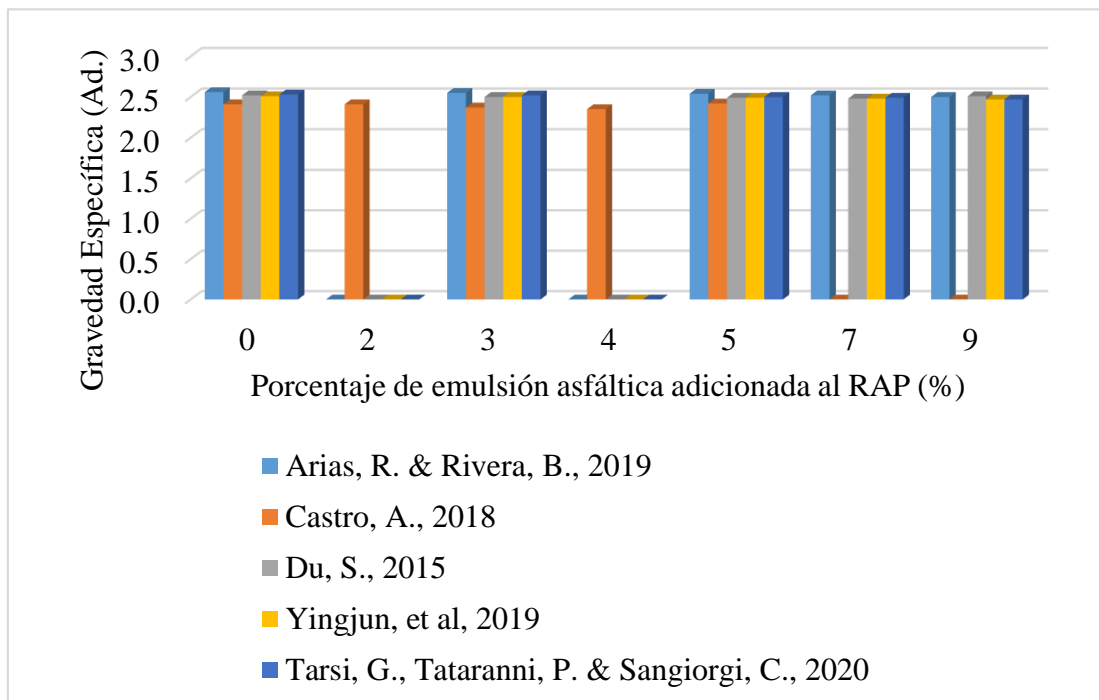


Figura 16. Gráfico de la gravedad específica de las mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

En las mezclas asfálticas en frío, el aumento del porcentaje de emulsión asfáltica adicionado al RAP no genera una variación del valor de la gravedad específica, manteniéndose constante el mismo rango de resultados.

2.5 Contenido de vacíos con aire

Los vacíos con aire, o simplemente vacíos, hacen referencia a las bolsas o espacios de aire que se encuentran presentes entre los agregados revestidos de asfalto en una mezcla asfáltica en su estado compactado. Estos vacíos permiten conformar los espacios necesarios para que el asfalto o ligante pueda fluir adecuadamente cuando se inicie la compactación adicional debida al

tráfico vehicular. Para calcular esta propiedad se deben aplicar los procedimientos indicados en la ASTM D-3203 *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas bituminosas densas y abiertas*. En Colombia la norma correspondiente es la I.N.V. E-736 *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas* (INVIAS, 2013; Aauto, 2019).

Para obtener el valor del contenido de vacíos con aire de la mezcla asfáltica, previamente se debe calcular la gravedad específica bulk de la mezcla compactada, además de la gravedad específica máxima, para reemplazar estos dos valores en la ecuación 7.

$$V_A = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

V_A : Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla asfáltica.

G_{mm} : Gravedad específica máxima.

G_{mb} : Gravedad específica bulk de la mezcla compactada.

2.5.1 Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 9 se ilustran los resultados del contenido de vacíos con aire obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 17 su representación gráfica.

Tabla 9

Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)							
		0	15	20	25	30	40	45	60
Contreras, S., 2018		4,30	4,10	-	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		4,69	-	-	4,00	-	-	-	-
Valdés, V. et al, 2008		4,50	-	-	-	-	-	-	-
Buitrago, J. & González, A., 2016	%	-	-	6,39	-	-	6,59	-	5,50
Ramos, O., 2017		6,60	7,30	-	-	7,20	-	6,60	-
Villafuerte, D., 2014		6,90	-	-	-	7,10	-	-	-
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020		5,80	-	-	-	-	6,00	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

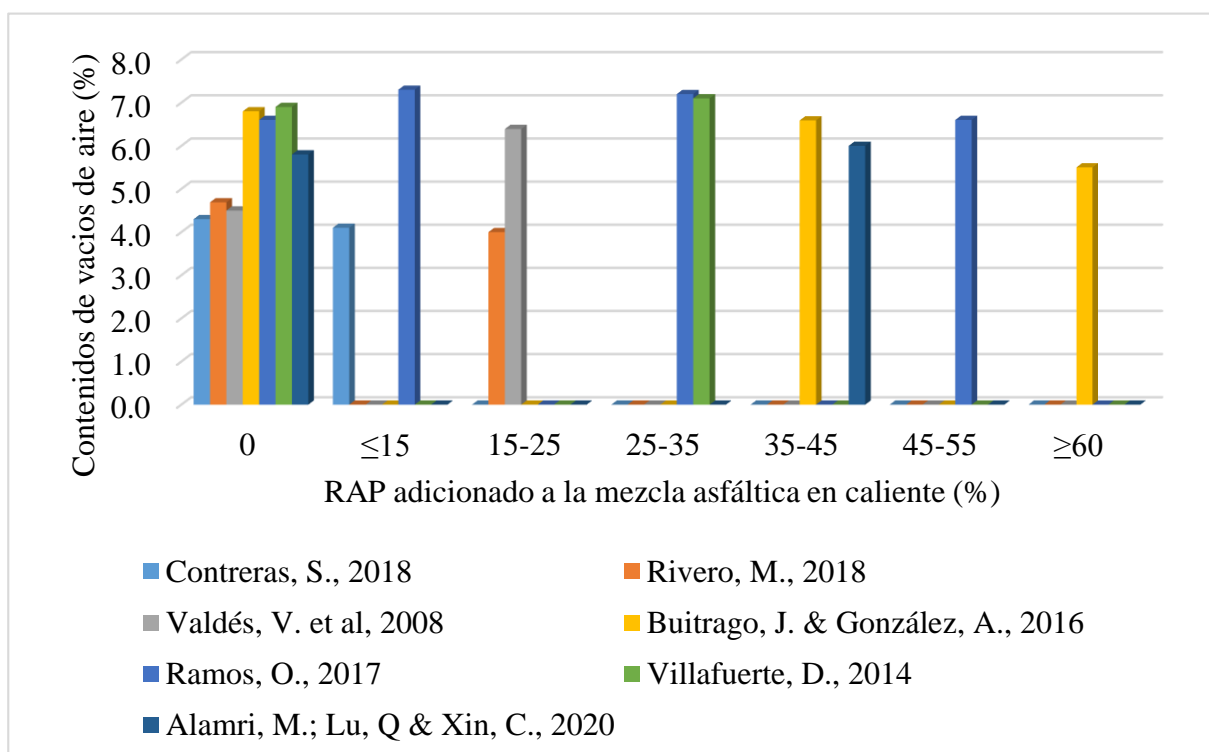


Figura 17. Gráfico del contenido de vacíos con aire de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica en caliente se ve reducida por la adición del RAP, estando esta variación comprendida entre un 4 a 14% de acuerdo al contenido de RAP, la relación indica que entre mayor es el contenido de RAP, menor es el valor del contenido de aire presente en la mezcla.

2.5.2 Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en frío.

En la Tabla 10 se ilustran los resultados del contenido de vacíos con aire obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en frío, y en la figura 18 su representación gráfica.

Tabla 10

Contenido de vacíos con aire de mezclas asfálticas en frío

Autor	Unidad	Emulsión asfáltica adicionada al RAP (%)						
		0	2	3	4	5	7	9
Arias, R. & Rivera, B., 2019		-	-	13,80	-	13,20	13,00	12,80
Castro, A., 2018	%	13,80	14,00	13,90	13,30	12,90	-	-
Du, S., 2015		12,80	-	12,40	-	11,80	11,00	10,70
Murugaiyah, P., 2011		11,90	-	11,40	-	10,90	10,20	9,70
Jan, S.; Jan, V. & Zak, J., 2016		13,20	-	12,90	-	12,60	11,90	10,40

Nota: Autores citados en la tabla.

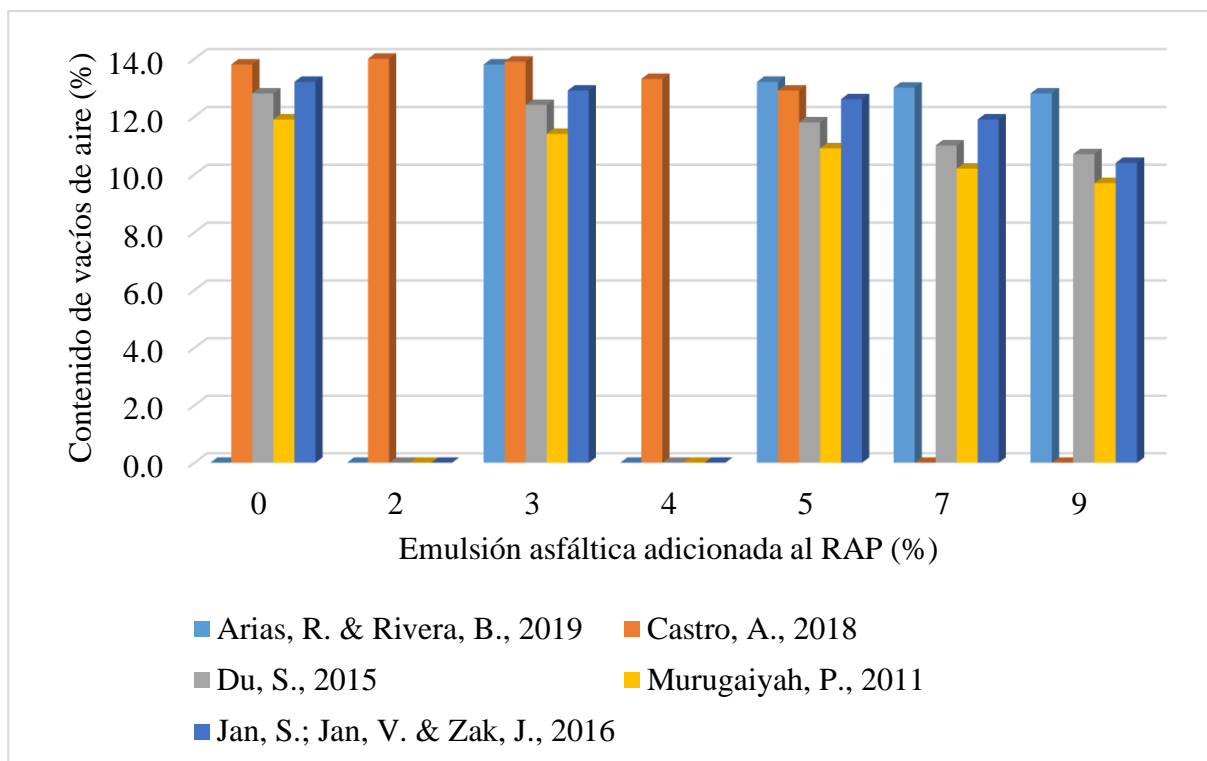


Figura 18. Gráfico del contenido de vacíos con aire de las mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

En las mezclas asfálticas en frío se reduce entre un 5 a 15% el contenido de aire de acuerdo al porcentaje de emulsión asfáltica adicionada al RAP, entre más cantidad de emulsión se adicione, menor es el valor del contenido de vacíos.

Capítulo 3. Propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas en caliente y en frío con adición de RAP

Continuando con las propiedades de las mezclas asfálticas tanto en caliente y en frío con adición de RAP, en este capítulo se abordan específicamente las propiedades de tipo mecánico, para lo cual se expondrán los resultados obtenidos y descritos en diferentes investigaciones.

3.1 Estabilidad y flujo

La capacidad que posee la mezcla asfáltica de resistir desplazamientos y deformaciones debidas a las condiciones de carga del tránsito se denomina como estabilidad, mientras que el flujo indica la máxima deformación que se presenta al aplicar una carga máxima. Ambas propiedades pueden ser calculadas mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM D-1559 *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus* (*Método de ensayo para la resistencia de flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando un aparato Marshall*). En Colombia la norma correspondiente es la I.N.V. E-748 *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall*. Ambas propiedades solo fueron calculadas para las mezclas asfálticas en caliente recopiladas en este trabajo (INVIAS, 2013).

Tanto la estabilidad como el flujo, se calculan simultáneamente, empleando probetas tipo Marshall, las cuales son sometidas a un curado en un baño de agua o en un horno, y

posteriormente son sometidas a cargas en la prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, como se observa en la figura 19.



Figura 19. Equipo Marshall para determinar la estabilidad y flujo. Cuevadelcivil.com, 2021. Obtenido en: <https://www.cuevadelcivil.com/2015/04/ensayo-marshall.html>

El ensayo se realiza dentro de las 24 horas posteriores a la compactación de las probetas Marshall. Las probetas se colocan en un baño de agua durante 30 a 40 minutos, o en el horno durante un término de 120 a 130 minutos, manteniendo el baño o el horno a $60 \pm 1^\circ\text{C}$.

Paralelamente a este proceso, se deben limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo antes de montar las probetas. Se lubrican las barras guías de manera que la mordaza superior se deslice libremente sobre ellas. La temperatura de las mordazas se deberá mantener entre 20 y 40°C (70 a 100°C). Si se usa un baño de agua para ello,

el agua se deberá remover totalmente del interior de las mordazas en el momento de extraérlas del baño para realizar el ensayo ($140\pm 2^{\circ}\text{F}$) (INVIAS, 2013).

Cuando se retira la probeta del baño de agua (se debe secar cualquier exceso de agua con una toalla) u horno, y se coloca centrada en la mordaza inferior; se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Se coloca el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior mientras se aplica la carga de ensayo (INVIAS, 2013).

Finalmente se aplica la carga sobre la probeta con la prensa a una rata de deformación constante de 50 ± 5 mm/min ($2,00\pm 0,15''$ /min) hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza a decrecer. El procedimiento completo, desde la remoción de la probeta del baño de agua u horno hasta su falla, no deberá demorar más de 30 segundos (INVIAS, 2013).

3.1.1 Estabilidad de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 11 se ilustran los resultados de la estabilidad obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 20 su representación gráfica.

Tabla 11

Estabilidad de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)								
		0	15	20	25	30	35	40	50	60
Contreras, S., 2018		14,10	15,20	-	-	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		13,85	-	-	14,67	-	-	-	-	-
Valdés, V. et al, 2008		13,68	-	14,82	-	-	-	-	-	-
Buitrago, J. & González, A., 2016		14,20	-	14,42	-	-	-	15,45	-	16,04
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020	kN	12,67	-	-	-	-	-	16,49	-	-
Izaks, R., et al., 2015		12,70	-	-	-	13,60	-	-	14,20	-
Arshad, et al., 2018		17,80	18,60	-	18,20	-	18,40	-	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

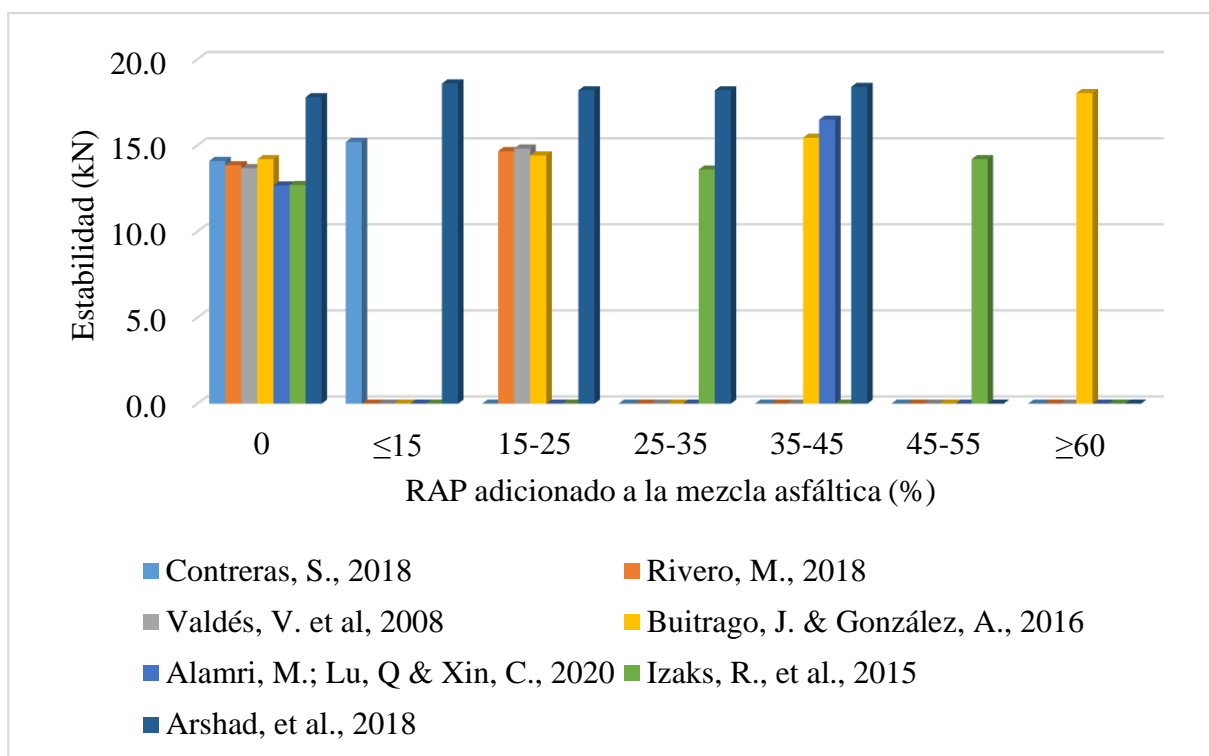


Figura 20. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

Como se evidencia en los datos anteriores, la adición de RAP aumenta el valor de la estabilidad en la mezcla asfáltica en caliente. Este aumento resulta proporcional al porcentaje de RAP incluido en la mezcla. Se registran aumentos comprendidos entre un 4 a 30%, lo que significa que el RAP actúa positivamente en la mezcla al mejorar una propiedad fundamental dentro de este tipo de mezclas asfálticas.

3.1.2 Flujo de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 12 se ilustran los resultados del flujo obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 21 su representación gráfica.

Tabla 12

Flujo de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)								
		0	15	20	25	30	35	40	50	60
Contreras, S., 2018		3,05	2,88	-	-	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		2,96	-	-	2,74	-	-	-	-	-
Valdés, V. et al, 2008		3,16	-	3,02	-	-	-	-	-	-
Buitrago, J. & González, A., 2016		2,72	-	2,67	-	-	-	2,61	-	2,54
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020	mm	3,45	-	-	-	-	-	2,93	-	-
Izaks, R., et al., 2015		2,80	-	-	-	2,79	-	-	2,76	-
Arshad, et al., 2018		3,00	2,95	-	2,92	-	2,95	-	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

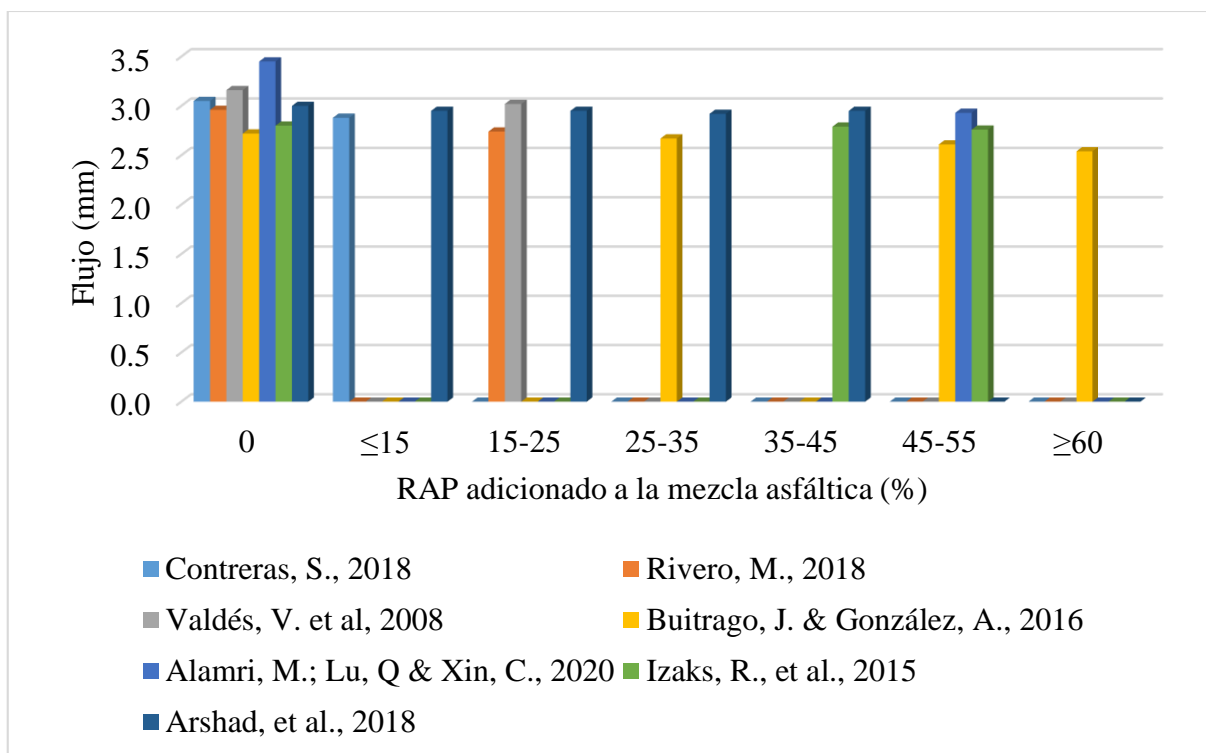


Figura 21. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

El flujo en la mezcla asfáltica en caliente también resulta positivamente afectado por la inclusión del RAP, aunque en un porcentaje menor al 7%. La reducción del flujo en la mezcla trae consigo una menor vulnerabilidad al efecto producido por las condiciones de tipo climático, especialmente las asociadas a la temperatura.

3.2 Módulo de rigidez

El módulo de rigidez es una propiedad que corresponde a una pendiente de la curva esfuerzo-deformación que se obtiene para un determinado tiempo de carga. Para calcular este valor se debe la norma ASTM D-7369 *Standard test method for determining the resilient*

modulus of bituminous mixtures by indirect tension test (Método de prueba estándar para determinar el módulo de rigidez de mezclas bituminosas mediante prueba de tensión indirecta).

El procedimiento consiste básicamente en someter un conjunto de muestras o probetas elaboradas con la mezcla asfáltica a estudiar y someterla a deformaciones en su rango línea, para lo cual se deben aplicar cargas repetidas o pulsantes a una velocidad controlada de deformación. Durante el ensayo se miden las amplitudes de esfuerzo y deformación. En la figura 22 se observa el equipo empleado para realizar este ensayo (Arias & Rivera, 2019).



Figura 22. Realización de ensayo para obtener módulo de rigidez. Fceia.unr, 2021. Obtenido en: <https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/ensayos-mezclas.php>

3.2.1 Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 13 se ilustran los resultados del módulo de rigidez obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 23 su representación gráfica.

Tabla 13

Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)				
		0	15	25	35	40
Contreras, S., 2018		6282	8263	-	-	-
Rivero, M., 2018		6283	-	8792	-	-
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020	Mpa	6102	-	-	-	7682
Arshad, et al., 2018		4000	4250	-	4500	-

Nota: Autores citados en la tabla

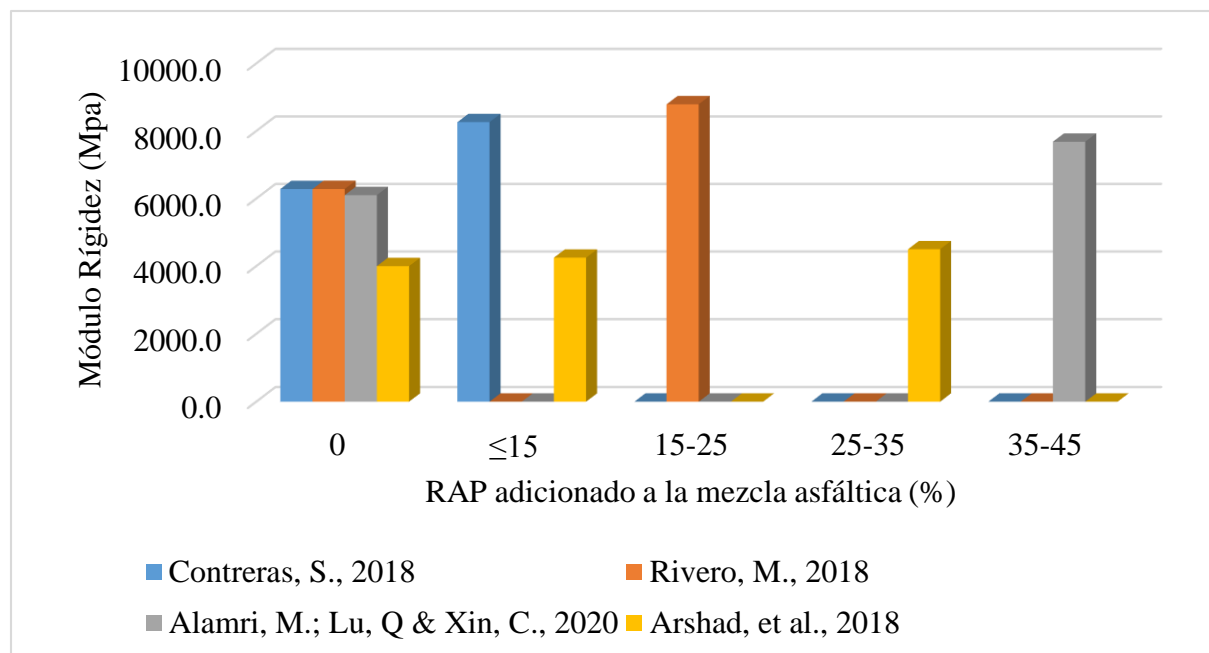


Figura 23. Gráfico del módulo de rigidez de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

La adición del RAP en la mezcla asfáltica en caliente, trae consigo un aumento del módulo de rigidez de la mezcla, entre mayor sea el porcentaje de RAP adicionado, mayor será el valor de este módulo. Este aumento en la rigidez, trae consigo una mayor aparición de fisuras, sin embargo, el mayor aumento no sobrepasa el 30% respecto a la mezcla sin RAP, por lo que este aumento se vería reflejado en lo concerniente a la capacidad de la mezcla de resistir las cargas impuestas por el tráfico vehicular, sin afectar considerablemente su susceptibilidad a la aparición de fisuras.

3.2.2 Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en frío.

En la Tabla 14 se ilustran los resultados del módulo de rigidez obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en frío, y en la figura 24 su representación gráfica.

Tabla 14

Módulo de rigidez de mezclas asfálticas en frío

Autor	Unidad	Emulsión asfáltica adicionada al RAP (%)					
		0	3	4	5	7	9
Arias, R. & Rivera, B., 2019		-	7967	-	6675	5541	4771
Du, S., 2015		7523	6983	6621	6520	5762	4921
Murugaiyah, P., 2011	Mpa	7826	7023	-	6662	5421	5001
Jan, S.; Jan, V. & Zak, J., 2016		7429	6789	-	6342	5782	4862

Nota: Autores citados en la tabla.

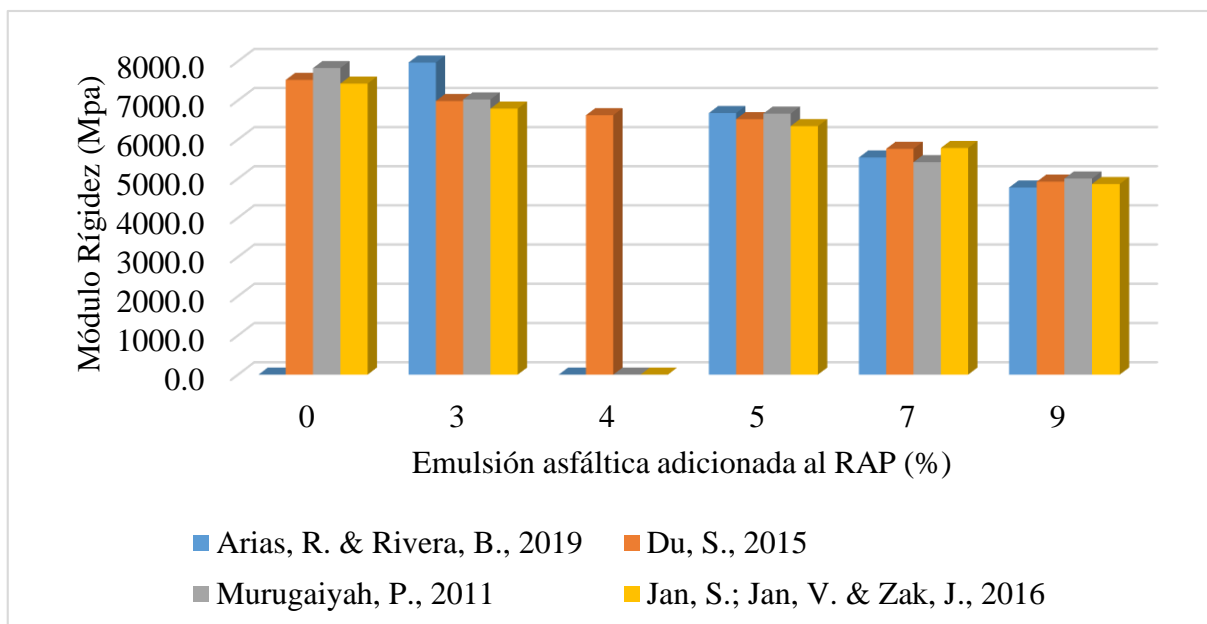


Figura 24. Gráfico del módulo de rigidez de las mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

A medida que aumenta el contenido de emulsión asfáltica en el RAP, o en la mezcla asfáltica en frío, se reduce el módulo de rigidez de la mezcla. Esta reducción trae consigo una reducción de la capacidad del pavimento construido con este tipo de mezclas de resistir cargas o esfuerzos, por lo que porcentaje superiores al 5% de emulsión asfáltica reducen el valor de este módulo en más del 30%. Los valores más similares a la mezcla base o simplemente con RAP, corresponden a la mezcla con inclusión de un 3% de RAP.

3.3 Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta, TSR, por sus siglas en inglés (Tensile Strength Ratio), puede ser calculada aplicando la norma ASTM D-4123 *Medida de la resistencia a tracción indirecta*, o también mediante la norma I.N.V. E-725 *Evaluación de la susceptibilidad de las*

mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta. El procedimiento consiste en aplicar una carga a una probeta de mezcla asfáltica en su eje diametral, a una velocidad de 50 ± 5 mm / min hasta la rotura de la probeta. El ensayo debe realizarse a una temperatura de entre 23 a 27°C. En la figura 25 se observa un ejemplo de aplicación de este ensayo (INVIAS, 2013; Castro, 2018).



Figura 25. Realización de ensayo de tracción indirecta. Castro, 2018. Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de residuos sólidos, p. 87.

La resistencia a la tensión debe calcularse mediante la ecuación 8.

$$R_T = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

Ecuación 8

Donde

R_T : Resistencia a la tensión, kPa;

P: Carga máxima, N;

t: Altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba, mm;

D: Diámetro del espécimen, mm.

3.3.1 Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en caliente.

En la Tabla 15 se ilustran los resultados de la resistencia a la tracción indirecta obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en caliente, y en la figura 26 su representación gráfica.

Tabla 15

Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en caliente

Autor	Unidad	RAP adicionado a la mezcla asfáltica en caliente (%)						
		0	15	20	25	30	40	45
Contreras, S., 2018		602,0	715,1	-	-	-	-	-
Rivero, M., 2018		520,0	-	-	621,1	-	-	-
Ramos, O., 2017	Kpa	521,7	613,9	-	-	649,2	-	708,0
Villafuerte, D., 2014		491,6	-	-	-	711,3	-	-
Alamri, M.; Lu, Q & Xin, C., 2020		508,0	-	-	-	-	679,2	-

Nota: Autores citados en la tabla.

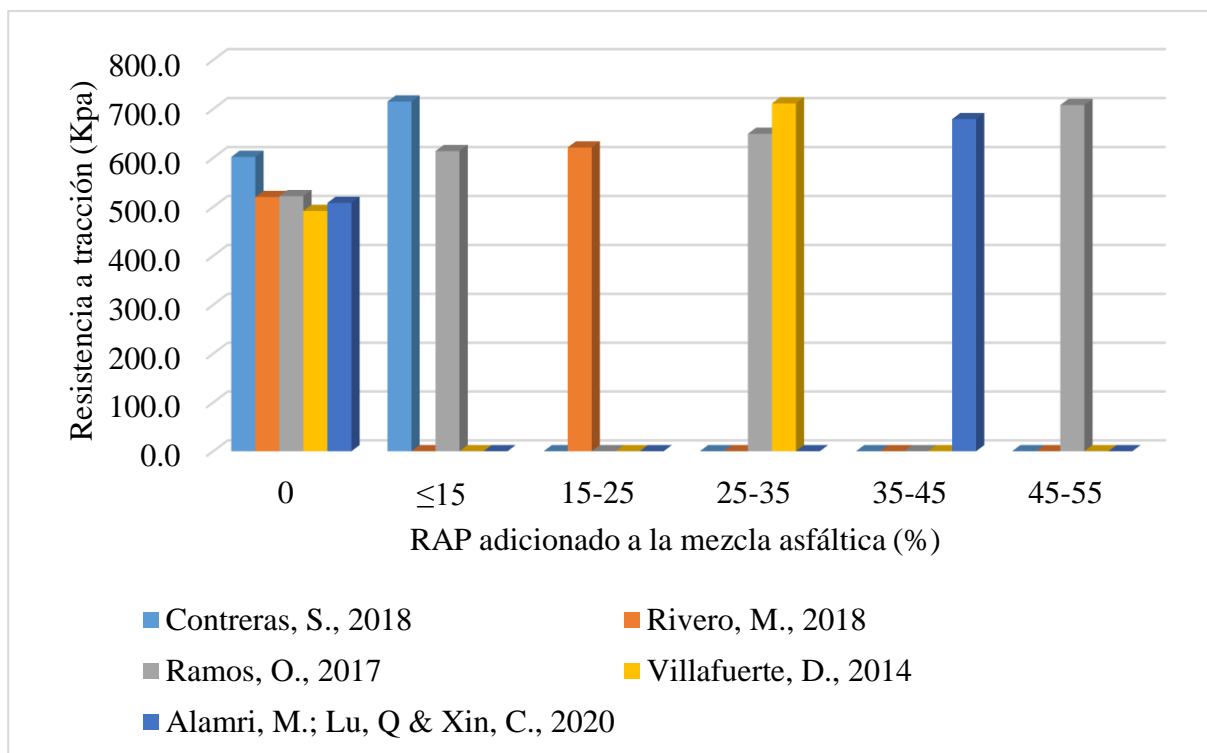


Figura 26. Gráfico de la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas en caliente. Autores citados en el gráfico.

La resistencia a la tracción indirecta en las mezclas asfálticas en caliente aumenta con la inclusión del RAP, llegando a alcanzar valores hasta un 30% mayores que en las mezclas sin RAP. Este aumento en el valor de esta propiedad representa una mayor capacidad de la mezcla de resistir deformaciones, y por tanto, de comportarse mejor ante la acción de las cargas.

3.3.2 Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en frío.

En la Tabla 16 se ilustran los resultados de la resistencia a la tracción indirecta obtenidos en los diferentes estudios recopilados referidos específicamente a las mezclas asfálticas en frío, y en la figura 27 su representación gráfica.

Tabla 16

Resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas en frío

Autor	Unidad	Emulsión asfáltica adicionada al RAP (%)						
		0	2	3	4	5	7	9
Arias, R. & Rivera, B., 2019		467,00	-	462,00	-	457,00	455,00	450,00
Castro, A., 2018	Kpa	359,00	345,00	340,00	339,00	335,00	380,00	378,00
Du, S., 2015		397,00	-	392,00	-	383,00	420,00	413,00
Murugaiyah, P., 2011		434	-	430	-	426	-	-

Nota: Autores citados en la tabla.

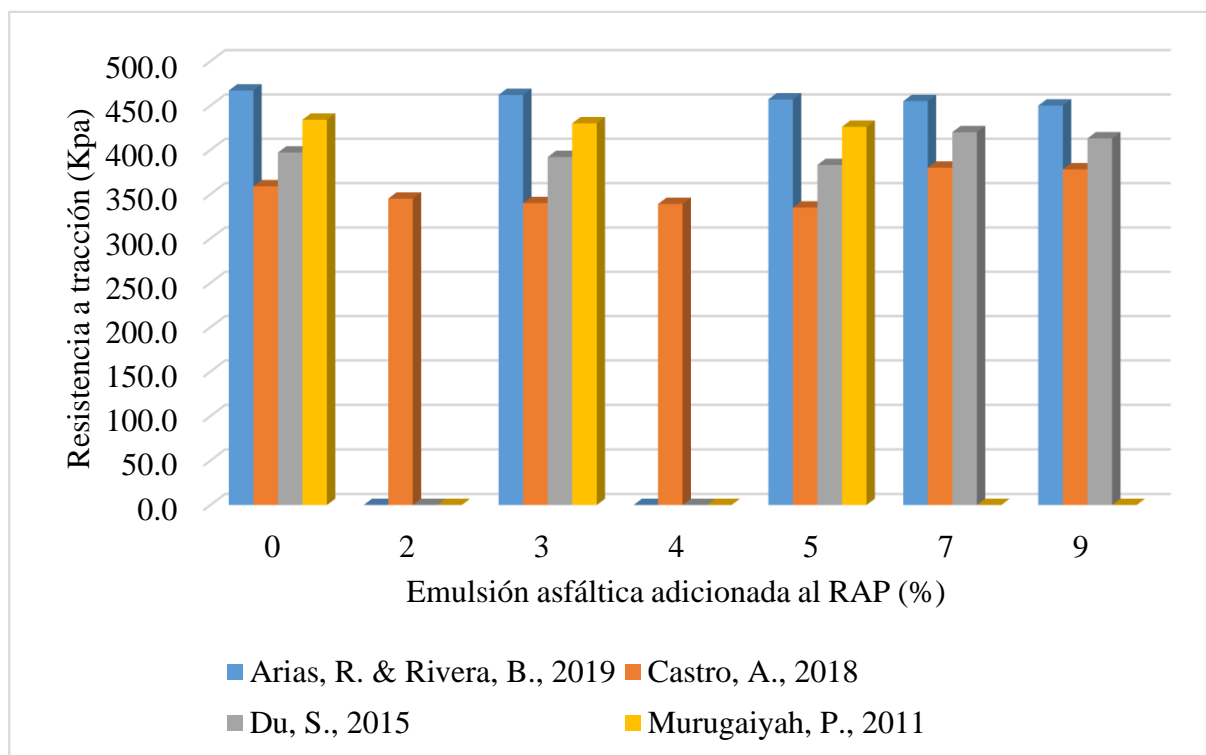


Figura 27. Gráfico de la resistencia a la tracción indirecta de las mezclas asfálticas en frío. Autores citados en el gráfico.

La resistencia a la tracción en las mezclas asfálticas en frío disminuyen con el aumento de la cantidad de emulsión asfáltica, sin embargo, esta disminución es menor al 5%, aun para la mezcla con mayor contenido de emulsión (9%). Las mezclas tienden a presentar valores similares en esta propiedad cuando el contenido de emulsión oscila entre 0 a 5%.

3.4 Resumen de propiedades físicas y mecánicas

En la tabla 17 se muestra el resumen del efecto producido por la adición de rap en las mezclas asfálticas en caliente y en frío.

Tabla 17

Resumen del efecto de la adición del RAP en las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas

Característica o Propiedad	Mezcla Asfáltica	
	En Caliente	En Frío
Generales		
Ahorro de asfalto en la nueva mezcla	15-40%	15-40%
Ahorro de Agregados pétreos en la nueva mezcla	15-60%	90-100%
Físicas		
Densidad, disminuye	<2%	2-4%
Gravedad específica	No Varía	No Varía
Contenido de vacíos con aire, disminución	4-14%	5-15%
Mecánicas		
Estabilidad, aumenta	4-30%	-
Flujo, reduce	<7%	-
Módulo de rigidez	10-30%	10-30%
Resistencia a la tracción indirecta, aumenta	0-30%	0-5%

Nota: Autores, 2021.

Los estudios recopilados indican que tanto para las mezclas asfálticas en caliente como en frío, se logra un ahorro de asfalto de entre 10 a 40% en la nueva mezcla, lo que representa una significativa disminución de precios. A esto se suma el ahorro generado por el aprovechamiento de los agregados pétreos; en las mezclas asfálticas en caliente el RAP representa entre un 15 a 60% de los agregados de la nueva mezcla, mientras que en la mezcla asfáltica en frío representa entre el 90 a 100%.

En lo concerniente a las propiedades físicas, la densidad disminuye hasta un 2% con la adición del RAP en la mezcla asfáltica en caliente, mientras que en la mezcla asfáltica en frío la disminución oscila entre un 2 a 4%. La gravedad específica no presenta variaciones significativas en ninguna de los dos tipos de mezclas, y en cuanto al contenido de aire, este aumenta entre un 4 a 14% en las mezclas en caliente, y entre 5 a 15% en las mezclas en frío, siendo la propiedad física que mayor modificación presenta con la inclusión del RAP.

En cuanto a las propiedades mecánicas, para la mezclas asfálticas en caliente, la estabilidad aumenta entre un 4 a 30% con la adición del RAP, así como disminuye el flujo hasta un 7%. El módulo de rigidez reduce entre un 10 a 30% tanto para mezclas en caliente como en frío, mientras que la resistencia a la tracción aumenta para ambos tipos de mezclas, sin embargo, este aumento es de hasta 30% para las mezclas en caliente, y hasta de 5% para las mezclas en frío.

Capítulo 4. Análisis ambiental y económico derivado del uso de pavimento asfáltico reciclado RAP

La utilización de RAP en mezclas asfálticas está orientada principalmente hacia la conservación del medio ambiente, al preservar los recursos no renovables, reduciendo la extracción de agregados pétreos así como del asfalto, y a la disminución de los costos asociados a la construcción de pavimentos asfálticos. En zeste capítulo se abordan ambas perspectivas.

4.1 Ventajas ambientales derivadas del uso del RAP en mezclas asfálticas

La fabricación de mezclas asfálticas conlleva a una alta generación de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), producidas durante la extracción de materias primas, transporte, y preparación de las mezclas. En la figura 28 se observan los gases que son emitidos durante el proceso de calentamiento de la mezcla asfáltica (Alamri, Lu, & Xin, 2020).



Figura 28. Fabricación de mezcla asfáltica en caliente. Obtenido en:
<https://empaquestemperatura.blogspot.com/2014/10/mezcla-asfaltica-en-frio-para-bacheo.html>

Estas emisiones se asocian con el alto consumo energético requerido para el funcionamiento de maquinarias y plantas de producción asfáltica, especialmente por incentivar la extracción, el transporte, y el refinado de petróleo crudo. Así mismo, las mezclas asfálticas requieren de grandes extracciones de materias primas (agregados pétreos), para lo cual se efectúan extracciones, voladuras, acarreos, trituraciones y cribado de rocas. En cada uno de estos procesos, se produce alto consumo de energía (Arshad, et al., 2018).

Un estudio realizado en China, estimo que del total de gases de efecto invernadero que se producen durante la construcción de un pavimento asfáltico, un 54% se liberan durante la producción de la mezcla asfáltica, un 43,18% están asociadas a la extracción de materias primas, y el porcentaje restante durante la colocación y compactación de la mezcla. Solo con la reutilización de los agregados que contiene el RAP, se estima una reducción de más del 40% de los gases de efecto invernadero asociados a la fabricación de mezclas asfálticas (Tarsi, Tataranni, & Sangiorgi, 2000).

Zaumanis, et al, 2018, citado por Unger, et al, 2020, indicó en un estudio sobre el uso de RAP, que la incorporación de este material permitía una reducción de más de 18 kg de dióxido de carbono (CO₂) por cada tonelada de mezcla asfáltica fabricada, además de un ahorro del 20% de la energía requerida para este proceso. De forma general expresa que el uso del RAP disminuye el impacto asociado al cambio climático en un 13%, y en cuanto se reduce de esta forma la demanda de recursos no renovables, como el petróleo, en un 14% (Unger, et al., 2020).

La problemática ambiental relacionada con el RAP, está vinculada también con el efecto que produce su deposición en rellenos, basureros o botaderos. Esto debido a que el RAP, esta compuesto de elementos altamente contaminantes, especialmente naftalenos y compuestos semi-volátiles, además del material proveniente de neumáticos de caucho y el material de escape de los vehículos, el cual paulatina, pero progresivamente, se incorpora en la composición del RAP. En la tabla 18 se presenta un resumen de los efectos ambientales.

Tabla 18

Beneficios ambientales derivados del uso del RAP en mezclas asfálticas

Beneficio ambiental	Efecto directo
Reducción del consumo de recursos naturales	Recuperación de los agregados pétreos y del asfalto del RAP minimiza la extracción de recursos naturales.
Reducción del consumo de energía	Disminución del número de viajes (transporte) al requerir un menor suministro de agregados vírgenes.
Reducción de emisiones contaminantes	Los métodos convencionales de pavimentación generan 55% más de CO ₂ que los métodos de reciclado en sitio (uso del RAP).

Nota: Autores, 2021.

4.2 Aspectos económicos relacionados con el uso del RAP

En países como Colombia, donde la incorporación del RAP no ha sido ampliamente promovida, se dificulta la estimación de los ahorros económicos derivados del uso de este

material. Sin embargo, en países desarrollados, como Estados Unidos, donde se ha incentivado el aprovechamiento de este material, y donde existe un claro registro de los materiales usados tanto en obras públicas como privadas, la estimación resulta más fácil de realizarse. Según la National Pavement Association (NAPA), de Estados Unidos, gracias al uso del RAP, en este país cada año se ahorran cerca de 78 millones de toneladas de agregados pétreos y más de 4 millones de toneladas de asfalto, que se reflejan en un ahorro de más de 2.800 millones de dólares gracias al aprovechamiento del RAP (Al Rousan, et al., 2008).

De forma general, los beneficios económicos del uso del RAP se asocian a la reducción de los costos de la pavimentación, ahorro en importancia y extracción de materias primas, especialmente asfalto y agregados, disminución de los tiempos de intervención de cada proyecto, y reducción de los porcentajes de asfalto requeridos en la mezcla. Se estima que los costos constructivos al usar RAP pueden reducirse entre un 14 a 32%, cuando la incorporación del RAP oscila entre 15 a 50%. Méndez, 2015, indica que en países latinoamericanos, como Colombia, el costo de la mezcla con uso del RAP se reduce hasta en un 8%, dependiendo de las condiciones que posea el RAP, sin que esto represente un detrimento de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas. En el gráfico de la figura 29 se observa el ahorro económico de acuerdo a la cantidad de RAP adicionada (Méndez, 2015).

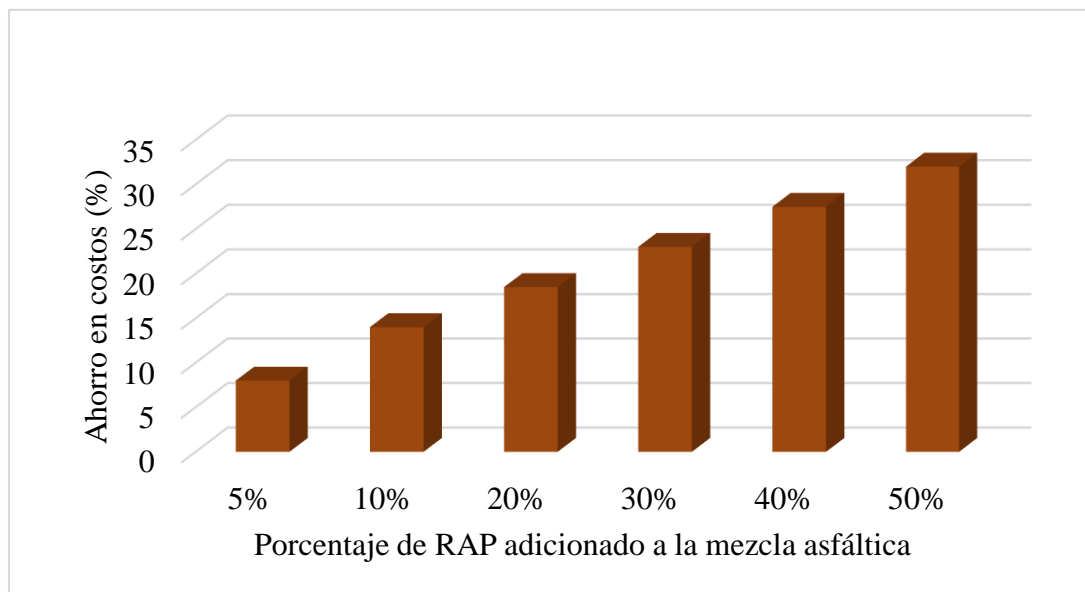


Figura 29. Ahorros derivados del aprovechamiento del RAP. Adaptado de Méndez, 2015.

Conclusiones

El RAP es un material cuya utilización se inició hace más de un siglo, sin embargo, su importancia actual está asociada a las iniciativas ambientales que buscan un mayor aprovechamiento de los materiales y que promueven la preservación de los recursos no renovables. El RAP puede ser obtenido a través de procesos mecánicos de fresado y de demolición, dependiendo de la maquinaria disponible, y de los ahorros económicos esperados. El RAP se emplea mediante reciclado in situ o en frío, y en plantas asfálticas. En este último caso se realiza el tamizado del material para separar los agregados en 2 grupos: finos y gruesos. Para la utilización del RAP en la mezcla asfáltica se recomienda un diseño mediante la metodología Marshall, y de acuerdo a la normativa a considera, IDU, o INVIAS, usar un contenido máximo de RAP de 20 o 40%, respectivamente.

La granulometría del RAP en la mayoría de los casos se ajusta a la granulometría de la nueva mezcla a fabricar, sin embargo, la tendencia general es emplear el RAP en determinado porcentaje para el caso de las mezclas asfálticas en caliente, mientras que para las mezclas asfálticas en frío se utiliza la totalidad del RAP, y solo se agrega el material pétreo en los tamaños y las cantidades que permitan ajustarse a la nueva mezcla. En ambos tipos de mezclas se requiere la adición de asfalto adicional, pero gracias al material presente en el RAP, se logran ahorros de asfalto que son proporcionales a la cantidad de material empleado, se han registrado ahorros comprendidos desde un 10% hasta un 48%.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad y la gravedad específica tienden a mantenerse constantes tanto en las mezclas asfálticas en caliente como en frío, con variaciones inferiores al 5% respecto a la mezcla convencional. Mientras que el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica en caliente disminuye a medida que aumenta el contenido de RAP, y lo mismo ocurre para la mezcla asfáltica en frío, pero en esta última es a medida que aumenta el porcentaje de emulsión asfáltica en la mezcla. En ambos casos la variación del contenido de vacíos en la mezcla puede variar hasta en un 15% respecto a la mezcla convencional (sin RAP).

Las propiedades mecánicas tienden a determinar los porcentajes de RAP a emplear en la mezcla asfáltica en caliente, y la cantidad de emulsión asfáltica en las mezclas asfálticas en frío. En las mezclas asfálticas en caliente, la estabilidad (aumenta hasta un 30%) y el flujo (se reduce un 7%) tienden a mejorar con el aumento del RAP, así mismo se observa un aumento de la resistencia a la tracción indirecta, y en los valores del módulo de rigidez (ambas propiedades aumentan hasta un 30%), sin embargo, los estudios realizados solo comprenden el empleo del RAP hasta un porcentaje máximo de 60%, por lo que este sería el máximo valor aceptable, y que ha demostrado buenos resultados en la mezcla.

Por su parte, las mezclas asfálticas en frío, tienden a presentar un claro efecto ante el aumento del contenido de emulsión asfáltica. Para contenidos superiores al 5% de emulsión asfáltica se registran afectaciones negativas en cuanto a los valores del módulo de rigidez y de la resistencia a la tracción indirecta (disminuyen entre 30%, y 5% respectivamente), por lo que este se recomienda como el porcentaje máximo a emplear en la mezcla (5% de emulsión asfáltica).

La adición del RAP en las mezclas asfálticas ha generado efectos positivos que se reflejan en la disminución de la producción de gases de efecto invernadero, y de la energía requerida para la fabricación de las nuevas mezclas. Además, se reduce el impacto ocasionado por este material en los rellenos, basureros o botaderos. Así mismo, el uso del RAP representa ventajas económicas asociadas al ahorro de la cantidad de asfalto requerido, y sobre todo, la reducción de nuevos agregados pétreos. Se recomienda continuar con las iniciativas encaminadas al aprovechamiento de este tipo de materiales (RAP) ya que generan un efecto positiva sobre el medio ambiente.

Referencias

- Abed, A., Thom, N., & Lo Presti, D. (2018). Design considerations of high RAP - content asphalt produced at reduced temperatures. *Materials and Structures*, 51 - 91.
- Adauto, R. (2019). *Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz*. Trabajo de Maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Al Rousan, et al. (2008). Performance of Asphalt Mixes Containing RAP. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2(3), 218-227.
- Alamri, M., Lu, Q., & Xin, C. (2020). Preliminary Evaluation of Hot Mix Asphalt Containing Reclaimed Epoxy Asphalt Materials. *Sustainability*, 12(3531), 1 - 12.
- Arias, R., & Rivera, B. (2019). *Evaluación del comportamiento físico mecánico de mezclas en frío para vías de bajo volumen de tránsito de Colombia utilizando 100% de pavimento asfáltico reciclado*. Tesis de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Arshad, et al. (2018). Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content. *CENVIRON*, 34, 1 - 8.
- Botella, J., & Zamora, A. (2017). *El meta-análisis: Una metodología para la investigación en educación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Buitrago, J., & González, A. (2016). *Caracterización del RAP e identificación de su influencia en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en caliente*. Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia.

- Castro, A. (2018). *Investigación sobre mezclas asfálticas en frío 100% recicladas con adición de residuos sólidos*. Tesis de pregrado, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- CEDEX. (2011). *Reciclado de pavimentos asfálticos*. Ficha técnica.
- CEDEX. (2015). *Capítulo 2. Reciclado de mezclas bituminosas en caliente*.
- Contreras, S. (2018). *Diseño de una mezcla asfáltica en caliente incorporando 15% de RAP mediante metodología superpave*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Department of Transportation. (2014). *Método de prueba para determinar gradaciones combinadas para asfalto de mezcla en caliente (HMA) usando hasta un 25% de pavimento de asfalto recuperado (RAP)*. State of California.
- Du, S. (2015). Performance characteristic of cold recycled mixture with asphalt emulsion and chemical additives. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-9.
- Federal Highway Administration. (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice*.
- INVIAS. (2012). *Capítulo 4. Pavimentos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Izaks, R., et al. (2015). Hot Mix Asphalt With High RAP Content. *Procedia Engineering*, 676-684.
- Jan, S., Jan, V., & Zak, J. (2016). Cold bituminous emulsion mixtures - laboratory mix design, trial section job site and monitoring. *Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 1-11.

- Kumar, R. (2016). *An Investigation of the Performance of Hot Mix Asphalt (HMA) Binder Course Materials with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Rejuvenators*. Tesis de maestría, Worcester Polytechnic Institute.
- Leiva, F. & Vargas, A. (2017). Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP). *Revista Infraestructura Vial*, 19(33), 35-44.
- Méndez, A. (2015). *Evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP) en vías colombianas*. Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada.
- Miranda, F., & Aguiar, J. (2019). Mezclas asfálticas con RAP: Pavimentos Asfálticos Reciclados. *PITRA - LanammedUCR*, 10(1), 1-8.
- Murugaiyah, P. (2011). *Designing cold mix asphalt (CMA) and cold in place recycling (CIR) using SUPERPAVE gyratory compactor*. University of Nevada, Nevada, USA.
- Nidia, E. (2020). Primeros estudios sobre los RAP derivados de mezclas con asfaltos modificados (RMAP), en la elaboración de nuevas mezclas en caliente. *Investigaciones de los Doctorandos en Ingeniería*, 1 - 6.
- Poulikakos, et al. (2018). *Sustainable Fully Recycled Asphalt Concrete*. Empa Materials Science and Technology.
- Ramos, O. (2017). *Diseño de una mezcla asfáltica de alto desempeño utilizando materiales de pavimento asfáltico recuperado (RAP)*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

- Reyes, O., et al. (2012). Evaluation of hot mix asphalt mixtures with replacement of aggregates by reclaimed asphalt pavement (RAP) material. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 379 - 388.
- Rivero, M. (2018). *Diseño de una mezcla asfáltica en caliente mediante la metodología superpave con la incorporación de 25% de pavimento asfáltico reciclado (RAP), más ensayos de rueda de hamburgo y módulo de rigidez*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Romero, P. (2011). *Análisis de la experiencia colombiana en reciclaje en frío de pavimentos asfálticos y formulación de una guía de intervención*. Tesis de maestría, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia.
- Tarsi, G., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2000). The challenges of using reclaimed asphalt pavement for new asphalt mixtures: A review. *Materials*, 13, 1-26.
- Texas A&M Transportation Institute. (2018). *High reclaimed asphalt pavement (RAP) asphalt mixes for low volume roads*. State of Florida.
- Thenoux, G., & García, S. (2000). Estudios de técnicas de reciclado en frío. *Revista Ingeniería de Construcción*, 15(1), 1-15.
- Unger, et al. (2020). Cold recycled asphalt mixture using 100% RAP with emulsified asphalt-recycling agent as a new pavement base course. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.

- Valdés, V., et al. (2008). Estudio de variabilidad en mezclas asfálticas en caliente fabricadas con altas tasas de material asfáltico reciclable (RAP). *Revista de la Construcción*, 7(1), 60 - 71.
- Valdéz, et al. (s.f.). *Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)*. Universidad de Cataluña, Barcelona, España.
- Valenzuela, C. (2019). *Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas con RAP*. Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Villafuerte, D. (2014). *Diseño de mezclas asfálticas elaboradas con concreto asfáltico reciclado Rap y Agentes Rejuvenecedores*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Yingjun, et al. (2019). Fatigue properties of cold-recycled emulsified asphalt mixtures fabricated by different compaction methods. *Sustainability*, 11, 2-15.
- Zúñiga, R. (2016). *Mezcla asfáltica en caliente con pavimento asfáltico recuperado RAP*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, Chile.