

**MEZCLA EN FRÍO PARA REPARACIONES, PRODUCIDA CON CARPETA ASFÁLTICA
RECICLADA, EMULSIÓN ASFÁLTICA Y CEMENTO HIDRÁULICO**

*Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería
Maestría en Ingeniería, Universidad EAFIT*

*Medellín, Colombia
2025*

RESUMEN

En el departamento del Cesar, Colombia, existen vías a cargo del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) que se encuentran en estado regular debido a fallas estructurales y funcionales ocasionadas por las cargas del tráfico, la temperatura ambiente y la falta de mantenimiento. Dado el alto costo operativo, se hace evidente la necesidad de reducir con rapidez los deterioros presentes en la capa de rodadura asfáltica, tanto por seguridad de los usuarios como para conservar la vida útil de la estructura del pavimento.

Por ello, se elaboró una mezcla asfáltica en frío con RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) como agregado alternativo, adicionando emulsión asfáltica catiónica de rompimiento lento (CRL-57) y cemento hidráulico de uso general (UG). Se realizaron diferentes dosificaciones de materiales empleando el método Marshall de diseño de mezclas, con el objetivo de establecer una dosificación óptima, evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, y efectuar reparaciones de prueba, y seguimiento para evidenciar la durabilidad de estas, que no superaban el mes y hoy día van seis (6) meses sin presentar deterioro.

Los ensayos de laboratorios de granulometría y contenido de asfalto del RAP y método de Marshall a las probetas de ensayo se realizaron en el laboratorio de pavimentos de la universidad EAFIT

Palabras clave: pavimento asfáltico reciclado (RAP), emulsión asfáltica, cemento hidráulico, mezcla asfáltica en frío, parcheo, estabilidad, flujo, Marshall.

ABSTRACTO

In the department of Cesar, Colombia, there are roads managed by the National Road Institute (INVIAS) that are in fair condition due to structural and functional failures caused by traffic loads, ambient temperature, and lack of maintenance. Given the high operating costs, it is evident that the deterioration of the asphalt wearing course must be rapidly reduced, both for user safety and to preserve the lifespan of the pavement structure.

Therefore, a cold asphalt mix was prepared with RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) as an alternative aggregate, adding slow-setting cationic asphalt emulsion (CRL-57) and general-purpose hydraulic cement (UG). Different material dosages were used using the Marshall method of mix design, with the goal of establishing an optimal dosage, evaluating their physical and mechanical properties, and performing test and monitoring repairs to demonstrate their durability. These repairs did not exceed one month and have now gone six (6) months without showing any deterioration.

Laboratory tests of granulometry and asphalt content of the RAP and Marshall method on the test specimens were carried out in the pavement laboratory of the EAFIT University.

Keywords: recycled asphalt pavement (RAP), asphalt emulsion, hydraulic cement, cold mix asphalt, patching, stability, flow, Marshall.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia cuenta con una red vial primaria compuesta por vías concesionadas y no concesionadas. El Instituto Nacional de Vías (INVIAS) administra 11.323,93 km de vías concesionadas y 5.642,5 km de vías no concesionadas, sumando un total de 16.966,43 km. Sin embargo, muchas de estas vías presentan fallas estructurales, funcionales y geométricas debido a la carga vehicular, las altas temperaturas y la falta de mantenimiento, lo cual se agrava por los elevados costos de operación. [1], [2]. El deterioro de las vías tiende a aumentar con el tiempo debido a la ausencia de mantenimientos periódicos. Esto genera baches en los tramos viales, afectando la seguridad y la calidad del servicio. Durante actividades de mantenimiento, la capa de rodadura asfáltica retirada se convierte en un residuo que puede ser reutilizado gracias a sus características físicas y contenido de asfalto residual, finos y agregado grueso; este material resultante es conocido como RAP, que representa una alternativa viable para fabricar nuevas mezclas, por esto, gran cantidad de este material de fresado y/o RAP pasa a ser almacenado en acopios a cargo de INVIAS [3].

Se ha demostrado que cuando el RAP se mezcla con agregados naturales, el cemento asfáltico en el RAP tiene un efecto de fortalecimiento significativo con el tiempo por sus características químicas de compuestos de hidrocarburos alifáticos de alto peso molecular, pero también pequeñas concentraciones de otros materiales como azufre, nitrógeno e hidrocarburos policíclicos de muy baja reactividad química [4, p.1]. Con base a lo anterior, se identificaron las ventajas y desventajas de este tipo de aplicaciones constructivas en el ámbito económico y ambiental para la implementación del reciclaje del concreto asfáltico [5, p.1], encontrándose como ventajoso que a este material se le pueden adicionar rejuvenecedores y polímeros que resuelven las preocupaciones sobre el desempeño dinámico del RAP, como el módulo dinámico [6, p. 1], [7, p. 1]. Las mezclas asfálticas modificadas con RAP que tienen mayor adherencia y un menor porcentaje de vacíos brindan un resultado positivo, que es permitir lo menos posible la penetración del agua para así evitar fallas futuras [8, p.100]; esto es relevante en tanto, si no se tiene una mezcla con suficiente adherencia el pavimento se verá afectado, generando que se formen los baches y se dañe la capa de rodadura asfáltica, lo que hará que comience a colapsar. [9, p. 65, 66].

Entre las ventajas del RAP se tiene que se utiliza para la elaboración de mezclas asfálticas en frío, dado que es una mezcla fácil de elaborar en campo y ayuda disminuyendo los efectos de gases de invernadero, se conservan los recursos naturales, se utiliza también en techos, exterior de edificios y parqueaderos [10, p 82]. De esta forma se evidencia que no solo se pueden utilizar estas mezclas para el parcheo y mantenimiento de vías terciarias, sino, incluso, para construir capas de carpeta asfálticas con condiciones para tráfico pesado. También se encontró una alta utilización de RAM (Mezcla Asfáltica Reciclada), la cual incorpora un porcentaje no muy alto de RAP, pero que igualmente disminuye los costos, llevando a mejorar el rendimiento en el pavimento [11, p.1].

El aditivo más utilizado en este tipo de mezclas RAP es el cemento hidráulico, cuya adición incrementa la densidad y, en consecuencia, la resistencia de la capa [12]. Resultados de la investigación de Needham y Brown muestran que se produce un proceso de hidratación del cemento y que parte de este cemento actúa como ligante al mezclarse con el asfalto; esta pasta o masa que se genera da lugar a mejoras en tres propiedades mecánicas claves como son: módulo de rigidez, resistencia a deformación permanente y resistencia a la fatiga [13, p.41]. Otros estudios han demostrado que el valor de CBR de una subbase virgen aumenta cuando aumenta el porcentaje de cemento y los porcentajes de adición de RAP, es una mejora de bajo costo debido al material de desecho RAP [14, p. 1].

Por otro lado, en esta revisión, se encontró que en Japón donde se ha hecho un gran aporte con la colaboración del Center for Advanced Infrastructure Technology de la Universidad de Mississippi, realizando una investigación acerca de la utilización de material reciclado en toda la estructura asfáltica (capa de rodadura y base asfáltica) con el fin de llevarlo a la práctica en la construcción de pistas aéreas, representando importantes ventajas económicas para este país [15], [16, p.3], también en América como en Europa, se han presentado grandes avances tecnológicos, ya que la maquinaria y los equipos utilizados cada día son más eficientes y especializados, así como más amigables con el medioambiente, al disminuir el consumo de nuevos materiales naturales para la fabricación de mezclas asfálticas en la rehabilitación de carreteras [17, p 31].

En el caso colombiano, el RAP se encuentra especificado en el artículo 461 de las normas y especificaciones del Instituto Nacional de Vías [18] en donde se establecen parámetros de aceptación para este material fresado, donde se presenta que este puede ser utilizado como aditivo para mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica en frío [19]. La normativa solo permite la reutilización del 30% en mezclas asfálticas; no obstante, se ha planteado evaluar el uso de mezclas asfálticas compuesta por 100% de materiales reciclados, lo que impactaría de manera positiva promoviendo la sostenibilidad porque conlleva la reducción de la explotación de los recursos naturales.

Por lo anterior, esta investigación tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas en frío con 100% RAP como una alternativa costo-eficiente y sostenible, que reduzca el uso de recursos naturales y mejore la red primaria vial; por lo que se plantea, la necesidad de lograr una mezcla que sea resistente y soporte las cargas del tráfico en condiciones de temperatura tan particulares como las del Departamento del Cesar, Colombia. Por esto, se considera aquí como alternativa para darle un segundo uso como material para la construcción de carreteras, [20, p.4].

Se utilizó el método de Marshall, dado que se desarrolla en mezclas asfálticas para pavimento flexible en frío, en caliente y tibio, como para pavimento hidráulico, inspeccionando la dosificación que se requiere para garantizar la resistencia del concreto. [11, p. 82]. El RAP del estudio se sometió a ensayos de granulometría, porcentaje de asfalto, para adicionarle la proporción exacta de emulsión asfáltica y cemento hidráulico que se necesitaba, para obtener un buen desempeño de la mezcla. [21], teniendo presente todas las especificaciones y normas que rigen el uso de este material.

En las primeras mezclas se utilizó la cal hidratada, pero se descartó esta adición, dado que los resultados en cuanto a estabilidad y flujo fueron muy bajos. Sin embargo, la cal es un buen estabilizador de la subrasante [22]. Luego, se encontró otra mezcla asfáltica reciclable adicionando cemento hidráulico. El nuevo material se extiende y se compacta, definiendo una sólida capa asfáltica [23, p. 30]. Ahora, la mezcla que se elaboró para esta investigación solo fue para realizar parcheo en vías, se encontró que no sufren exceso por las cargas máximas de los vehículos que en ellas circulan [24, p 29], por eso no se hicieron ensayos de módulo dinámico, ya que la alta amortiguación del RAP puede mejorar el bienestar y aumentar la sostenibilidad de las vías, entendiendo que la amortiguación tiene relación con la rigidez [25, p.12].

Al evaluar el comportamiento del material usado para mezclas en frío estabilizadas con emulsión asfáltica utilizando 100% de pavimento asfáltico reciclado y cemento hidráulico como filler [26, p. 5], se determinaron los materiales y equipos empleados para la construcción de la capa asfáltica. Para este procedimiento, al momento de instalar la mezcla para parcheo, juegan un papel muy importante las temperaturas de mezclado y compactación, pues tienen un importante impacto en la calidad y desempeño de la mezcla asfáltica [27, p. 36]. Es muy importante, además, considerar una evaluación de costos en cada mezcla, en tanto variará según la cantidad de RAP que se adicione a la mezcla para garantizar que la rehabilitación y el mantenimiento de los pavimentos, así como la construcción de pavimentos sean respetuosos con el medioambiente, a la vez que rentables [28, p.1].

2. METODOLOGÍA

Se plantea, desde esta investigación, la necesidad de desarrollar una mezcla asfáltica que fuera resistente y capaz de soportar las condiciones específicas del clima del Cesar, con temperaturas ambiente hasta 38 °C, durante al menos seis meses. Como alternativa, se propuso el uso de pavimento asfáltico reciclado (RAP), el cual presenta buenas propiedades físico-mecánicas y puede ser reutilizado para evitar su desperdicio. Aunque la normativa colombiana permite solo utilizar hasta un 30% de RAP en mezclas asfálticas, esta investigación evaluó la viabilidad de emplear 100% de materiales reciclados solo en reparaciones pequeñas, con un enfoque ambiental que reduce la explotación de recursos naturales.

En el proceso de investigación se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- a. Estimación de la temperatura de la capa de rodadura asfáltica
- b. Materiales utilizados
- c. Preparación de las mezclas
- d. Resultados
- e. Tamo de prueba

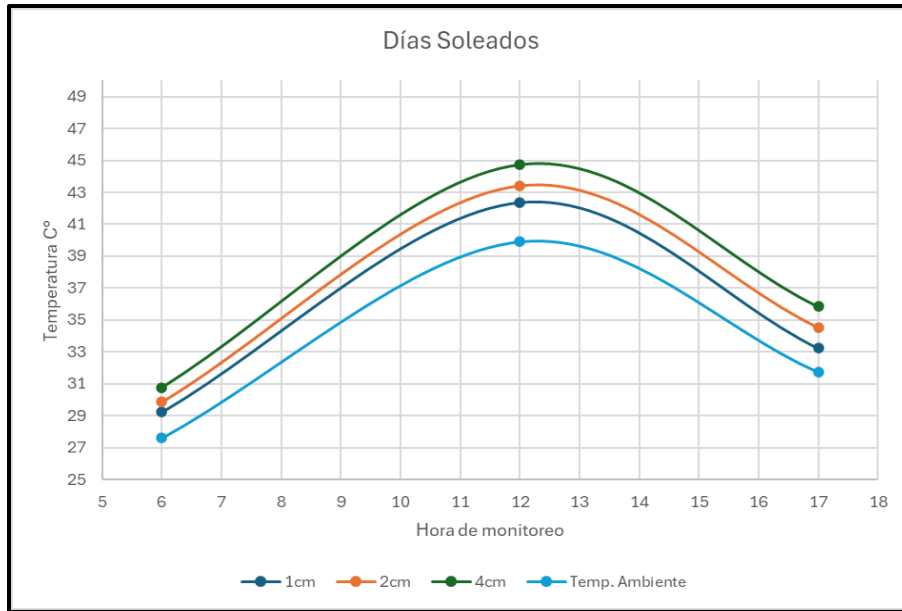
2.1 ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LA CAPA ASFÁLTICA

Se realizó una inspección en los ciento cuarenta (140) kilómetros de la vía San Roque – La Paz, en el Departamento del Cesar. Se identificaron varios tramos con deterioro avanzado en la capa de rodadura

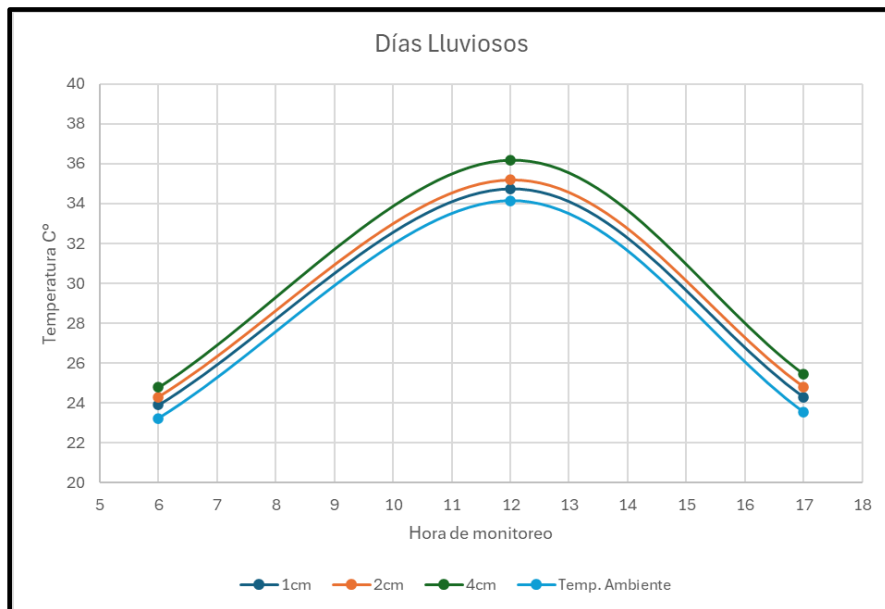
asfáltica. A lo largo de este recorrido, se seleccionaron quince (15) puntos para la toma de temperatura durante dos semanas (se muestran en imagen 1), en horarios de 5 am a 6 am se obtuvo una temperatura promedio de 25,9 °C, de 12 pm a 1 pm (se muestran los resultados en gráfica 1 y 2) se obtuvo una temperatura promedio de 37,7 °C y de 5 pm a 6 pm se obtuvo una temperatura promedio de 26,9 °C, la temperatura máxima se presenta a 4 cm de profundidad de la capa de rodadura asfáltica.



Figura 1: Toma de temperatura en campo.



Gráfica 1: Registro de temperatura a diferentes profundidades en la capa de rodadura asfáltica (días soleados).



Gráfica 2: Registro de temperatura a diferentes profundidades en la capa de rodadura asfáltica (días lluviosos).

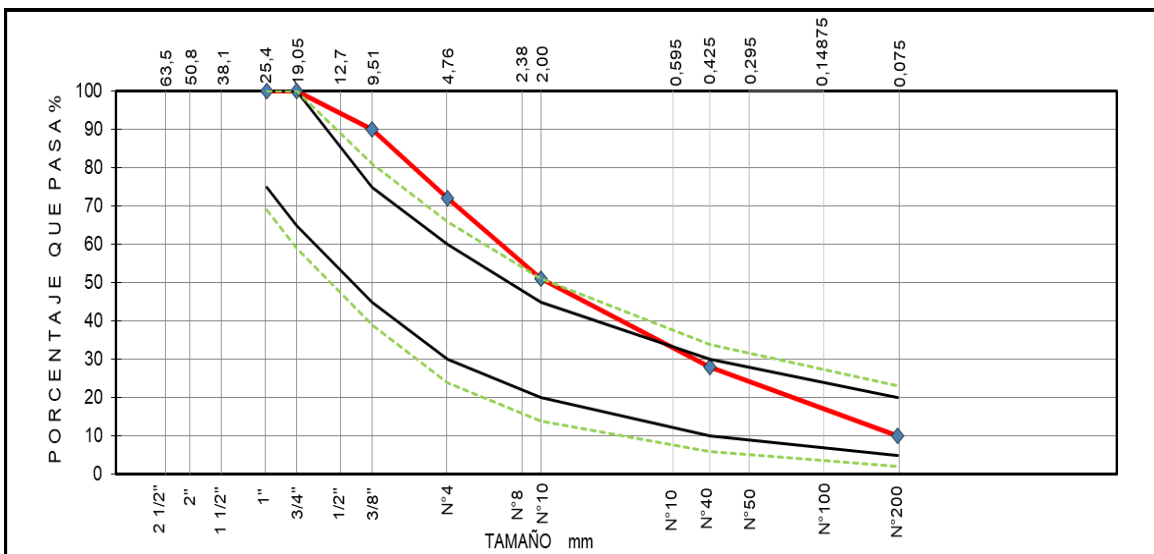
2.2 MATERIALES

2.2.1. CONSECUCCIÓN DEL RAP

El RAP se tomó del acopio del INVIAS ubicado en la vía 8004A, Valledupar - San Juan, en el departamento del César, Colombia. Este se tamizó para lograr un tamaño máximo del agregado de 19 mm. (3/4") debido a que no se pudo utilizar el agregado de tamaño máximo 38 mm (1½") como lo indica la especificación de INVIAS -2022, Art 461, [25], porque las capas de parcheo que se instalarían están entre 5 y 7 cm de espesor, además ese era el tamaño promedio del agregado con que se encontró disponible en el acopio del RAP.

2.2.1.1 GRANULOMETRÍA

Se determinó el tamaño máximo del agregado, que fue de 19 mm (3/4 in), además el Cu y Cc, los cuales dieron 39,5 y 1,1 respectivamente, indicando que el material es bien gradado. La curva granulométrica del RAP se muestran los resultados en la gráfica 3. Evidentemente la gradación se sale de lo especificado para mezclas asfálticas con RAP, pero cabe aclarar que este es el material disponible en la zona, con un mínimo reproceso y el uso de la mezcla asfáltica es para reparaciones temporales del orden de 6 meses.



Gráfica 3: Curva granulométrica del RAP tamaño máximo del agregado 19 mm (3/4")

2.2.1.3 CONTENIDO DE ASFALTO DEL RAP

El resultado del porcentaje de asfalto efectivo residual del RAP se determinó mediante la norma INV E-732-13 “Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos” [29]. El resultado promedio obtenido fue del 5,73%.

2.2.2 EMULSION ASFÁLTICA

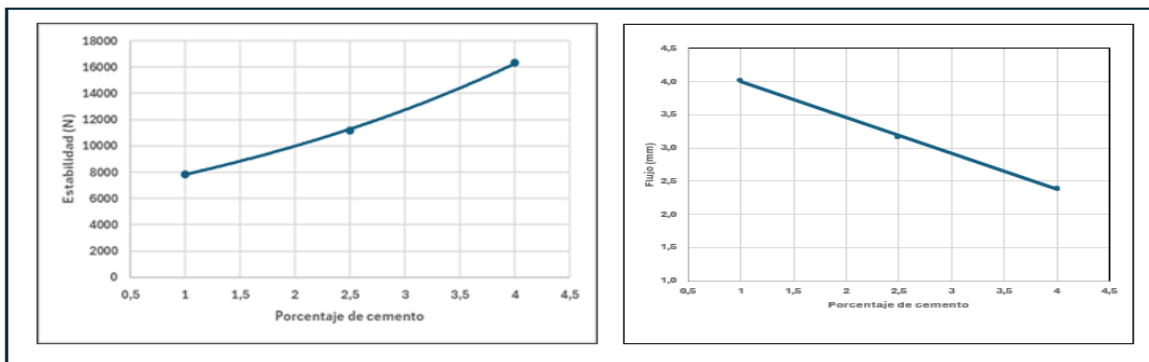
La emulsión asfáltica catiónica utilizada fue CRL-57 que es la más indicada para lograr buena afinidad con el RAP. Esta emulsión cumple la especificación del INVIAS del 2022 en el artículo 461 y permite un mejor recubrimiento y adherencia del ligante sobre los agregados, prolongando el tiempo de trabajabilidad y facilitando la compactación antes del rompimiento. Esto resulta especialmente ventajoso al trabajar con pavimento asfáltico reciclado (RAP), ya que la CRL-57 penetra eficazmente en el asfalto envejecido, favoreciendo su reactivación y mejorando la cohesión de la mezcla. Además, al permitir una distribución uniforme y controlar la segregación, contribuye a obtener mezclas con mayor estabilidad, menor deformación, mejor resistencia al agua y mayor durabilidad.

2.2.3 CEMENTO HIDRÁULICO

Se utilizó cemento gris de uso general de Argos como complemento llenante, tal como lo manifiesta el artículo 461 en su numeral 2.3 (Puzolanas) de las especificaciones del INVIAS del 2022 para mejorar la reactividad de la mezcla asfáltica.

Se utilizaron porcentajes de cemento de 1%, 2,5% y 4% para determinar el porcentaje a utilizar. En la gráfica 4 se observa el comportamiento de la Estabilidad y flujo en función del porcentaje utilizado, ensayados a 38°C que es la temperatura media de trabajo en la zona

El crecimiento de la estabilidad del uso de 2,5% frente al 1%, fue del orden de 42% y de 2,5% a 4% del 46% y la relación de crecimiento es exponencial, por lo que se optó por economía y funcionalidad tomar el porcentaje de 4%.



Gráfica 4: Comportamiento de la Estabilidad y flujo en función del porcentaje de Cemento gris de uso general

2.2.4 AGUA PREENVUELTA

El agua utilizada para el humedecimiento previo de los agregados pétreos es agua de la región, es potable, limpia y libre de materia orgánica y un pH 7,3. El porcentaje que se utilizó fue del 1 %.

3. PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS

Ya con los materiales seleccionados y pesados en el laboratorio y con una temperatura de 38 °C en el horno, se inicia la elaboración de un número determinado de probetas de ensayos (3 unidades) para diferentes dosificaciones de agregado-asfalto, con el fin, de que los materiales cumplan con las condiciones fijadas por las especificaciones en cuanto a granulometría, para obtener un análisis de vacío y una densidad específica de la mezcla, mediante el método Marshall para encontrar el contenido óptimo de asfalto, para lograr la fórmula de trabajo a implementar en campo.

a) Mezcla 1: RAP, emulsión CRR-60 y CRL-57.

Para esta mezcla se utilizaron diferentes porcentajes de emulsión asfáltica (CRR y CRL) del 4%, 6%, 8%, 10% y el 12%, se evidenció, con los resultados del método de Marshall, que esta mezcla no mejoraba en capacidad, sino, que, por el contrario, aumentaba su flujo considerablemente.

b) Mezcla 2: RAP, emulsión CRL-57, cal hidratada.

Para esta mezcla, se trabajó con emulsión CRL-57 en donde se incorporó, un porcentaje de cal de acuerdo con los porcentajes de asfalto mencionados anteriormente. Sin embargo, en los resultados obtenidos en Estabilidad y flujo, se evidenció, que su capacidad no mejoraba y aun el flujo estaba muy por encima de 5, verificando con lo estipulado en las especificaciones de INVIAS 2022, artículo 442 [25], (mezclas en frío criterio de diseño Marshall).

c) Mezcla 3: RAP, emulsión CRL-57, cemento hidráulico.

A esta mezcla, se incorporó cemento hidráulico de uso general, dando una estabilidad máxima de 7087 N y un flujo de 2,69 mm, encontrando que el porcentaje de cemento hidráulico que mostró mejores resultados fue de 4%, y el porcentaje de asfalto óptimo fue del 6,7%; sin embargo, la mezcla no estaba dentro de los límites permitidos en el artículo 442 de las especificaciones INVIAS 2022, [25].

d) Mezcla 4: RAP, emulsión CRL-57, cemento hidráulico y agua preenvuelta.

Para esta mezcla adicionamos agua preenvuelta en un porcentaje del 1%, como ya teníamos el valor del porcentaje de cemento hidráulico y porcentaje de asfalto óptimo definido, con la temperatura del horno de 38 °C, realizamos 21 probetas de ensayos, 3 por cada edad de curado y se encontró que la estabilidad y el flujo, en las probetas de ensayo de 14 días de curado, estaban dentro de lo requerido en las especificaciones de INVIAS 2022, artículo 442,[25].

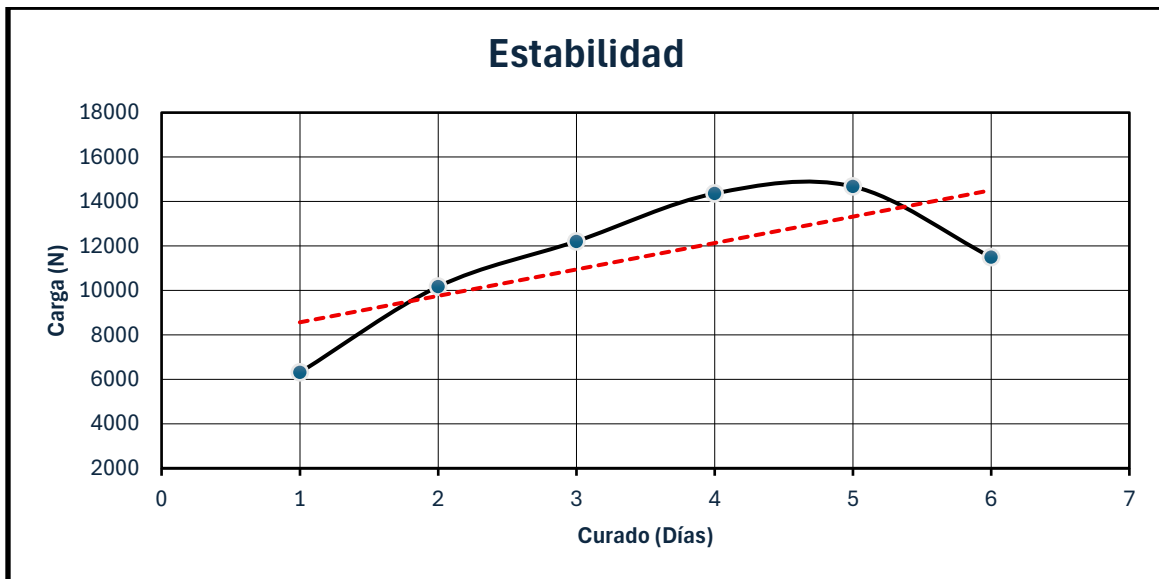
4. RESULTADOS

- e) Los resultados que se consignan a continuación se obtuvieron ensayando la mezcla 4: RAP, emulsión CRL-57, cemento hidráulico y agua preenvuelta.

4.1 ESTABILIDAD

Los resultados obtenidos para la estabilidad mostraron que la resistencia máxima se alcanzó en la probeta curada durante 14 días a 38 °C, con un valor de 14.676 N. Esta condición evidenció que el proceso de curado intermedio optimiza la reacción del cemento con los finos del RAP, generando una matriz más cohesionada y resistente.

El comportamiento de las demás edades de curado mostró una tendencia ascendente hasta los 14 días, y luego una leve estabilización. Esto sugiere que no es necesario prolongar excesivamente el tiempo de curado para lograr una resistencia adecuada, lo cual representa una ventaja operativa en el campo. se muestran los resultados en la gráfica 5.

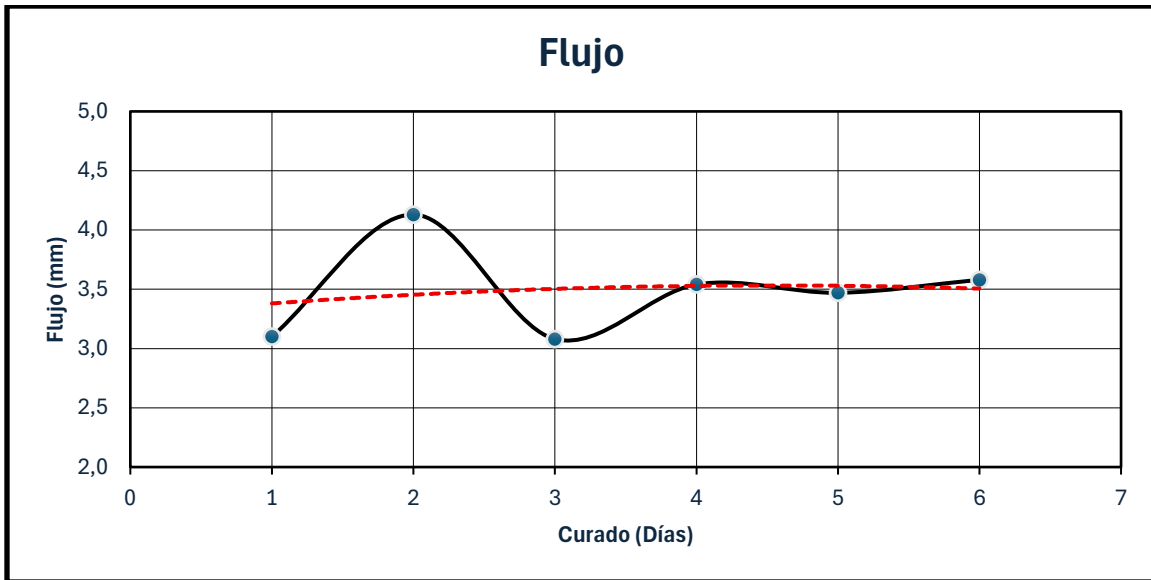


Gráfica 5. Estabilidad.

4.2 FLUJO

Respecto al flujo, que representa la deformación plástica de la mezcla bajo carga, se observó que la probeta con 14 días de curado presentó una deformación a temperatura de 38 °C a 4 cm de la capa de rodadura asfáltica de 3,47 mm. Este resultado guarda relación directa con la estabilidad: una mayor resistencia implica una menor deformación.

Las mezclas con tiempos de curado inferiores (6 y 24 horas) mostraron mayor flujo 4,13 mm, evidenciando una estructura aún no ha terminado su proceso de curado. En cambio, los tiempos mayores (7 y 14 días) mejoraron significativamente el comportamiento, indicando que 14 días es el punto óptimo entre resistencia y trabajabilidad. se muestran los resultados en la gráfica 6.

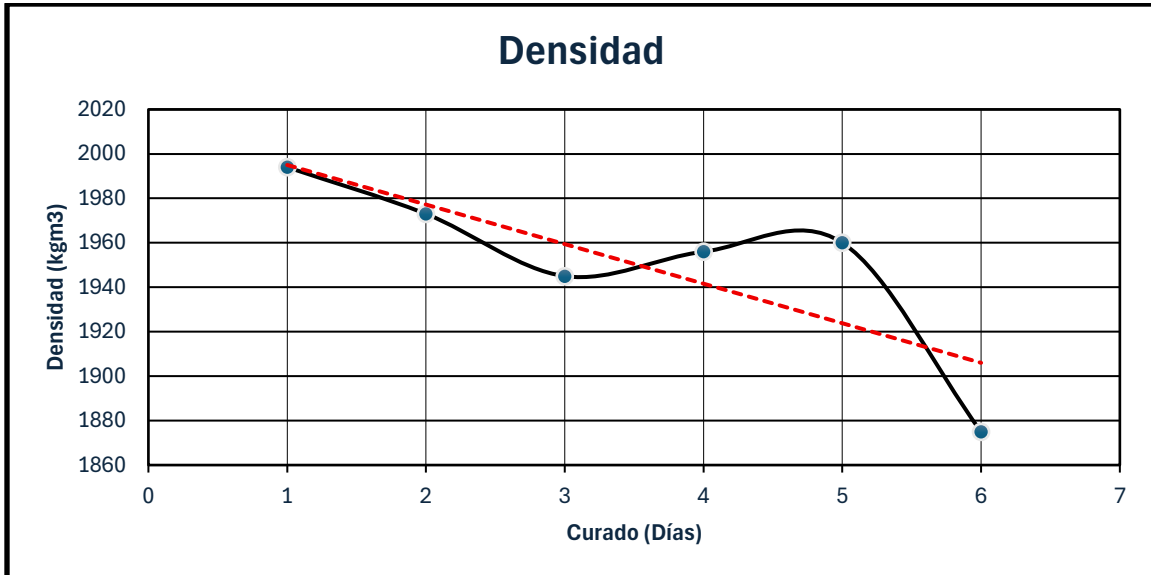


Gráfica 6. Flujo.

4.3 DENSIDAD

La densidad medida en las probetas curadas por 3 días fue de 1960 kg/m^3 , lo cual indica una adecuada compactación de la mezcla quedando de peso normal. Este valor está dentro del rango ideal para mezclas en frío con agregados reciclados, asegurando una estructura resistente a la acción del agua y al tránsito.

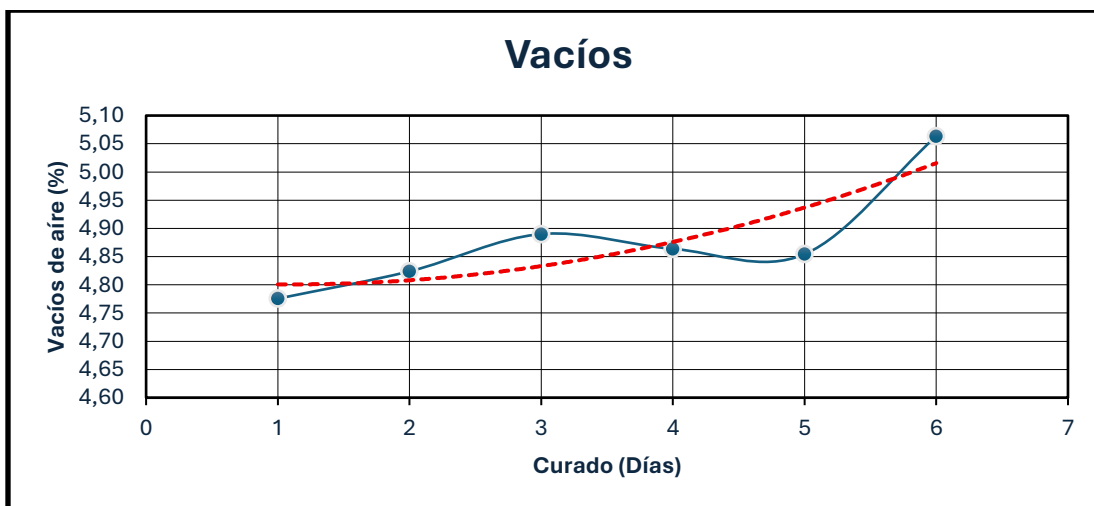
La variabilidad en densidad entre las diferentes edades de curado fue mínima, lo que permite afirmar que el comportamiento volumétrico de la mezcla es estable y confiable, incluso con una proporción de asfalto reciclado del 100%. se muestran los resultados en la gráfica 7.



Gráfica 7. Densidad.

3.4 VACÍOS

La variabilidad de los vacíos con aire entre las diferentes edades de curado fue mínima, lo que permite afirmar que el comportamiento volumétrico de la mezcla es estable y confiable. se muestran los resultados en la gráfica 6.



Gráfica 8. vacíos con aire (Va).

5. TRAMOS DE PRUEBA

Se identificaron las zonas de reparación, procediendo a realizar el corte del área seleccionada, se limpia el material suelto y saturado dentro, y en los bordes para asegurar que no halla una presencia ajena a la mezcla que pueda afectar el proceso. Después de lo anterior se aplicó una capa de imprimación o liga y/o la emulsion asfáltica lenta (CRL-57) y alternamente se trabaja en el mezclado de los materiales de la mezcla en frío como son el RAP, emulsion, cemento y agua, cada uno en los porcentajes de acuerdo con el área de la caja, se inicia la instalación de la mezcla en frío con palas para evitar disgregación de los materiales, la mezcla se deben colocar primero contra los bordes y extendida hacia el centro, al construir las juntas, nunca se debe empujar el material desde el centro de los baches a los bordes; si se requiere más material en el borde debe depositarse ahí, y el exceso del bache debe ser suficiente para evitar que después de la compactación, la superficie del bache quede más bajo que el pavimento existente, y se compacta con un compactador de plato total 6,5 HP, el compactador no debe pasarse más de 15 cm de ancho del borde, la operación debe repetirse en el lado opuesto; así se logra la compactación de las juntas del borde. Es importante decir que entre el tiempo de instalación y compactación no puede pasar más de media hora, al finalizar el parche debe quedar a ras con el pavimento existente.

5.1. Tramo 1: Ubicado en el kilómetro 100 +150 del tramo del kilómetro del 98+000 al 140+000, ruta 4901 vía San Roque – La paz.

Se realizó monitoreo en el periodo comprendido entre 15 de enero de 2025 hasta el 15 de junio de 2025, se evidencia que no presentó ningún tipo de falla en el parcheo.



Imagen 2. Parcheo en campo tramo 1.

5.2. Tramo 2: Ubicado en el kilómetro 79+000, del tramo entre el kilómetro 50+000 al 98+000, ruta 4901 vía San Roque – La paz.

Se realizó monitoreo en el periodo comprendido entre 15 de enero de 2025 hasta el 15 de junio de 2025, se evidencia que no presentó ningún tipo de falla en el parcheo.



Imagen 3. Parcheo en campo tramo 2.

5.3. Tramo 3: Ubicado en el kilómetro 21+000, del tramo entre el kilómetro 0+000 al 50+000, ruta 4901 vía San Roque – La paz.

Se realizó monitoreo en el periodo comprendido entre 15 de enero de 2025 hasta el 15 de junio de 2025, se evidencia que no presentó ningún tipo de falla en el parcheo.



Imagen 4. Parcheo en campo tramo 3.

5.4 Monitoreo de los tramos de prueba 1, 2 y 3

En la tabla 1 se relaciona el estado de los tramos de prueba

MONITOREOS REALIZADOS CADA 15 DÍAS - TRAMO 1,2 Y 3		
SEMANAS	TEMPERATURA	TIPO DE FALLA
Semana 1 (16 al 30 de enero de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 2 (del 1 al 15 de febrero de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 3 (del 16 al 28 de febrero de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 4 (del 1 al 15 de marzo de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 5 (del 15 al 30 de marzo de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 6 (del 1 al 15 de abril de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 7 (del 15 al 30 de abril de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 8 (del 1 al 15 de mayo de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 9 (del 15 al 30 de mayo de 2025)	38 °C	Ninguna
Semana 10 (del 1 al 15 de junio de 2025)	38 °C	Ninguna

Tabla 1. Monitoreo de los tramos de prueba 1, 2 y 3.

6. CONCLUSIONES

- 6.1 En lo que se refiere a la aplicación de los métodos considerados para el desarrollo de la investigación que aquí tuvo lugar, fue posible concluir que, desde la utilización de mezclas asfálticas con asfalto reciclado (RAP), es posible producir mezclas que cumplan los requerimientos mínimos requeridos, desde la normativa colombiana, para su aplicación en parcheo de vías nacionales, en lo tocante a su estabilidad (resistencia) y flujo (deformación).
- 6.2 Si es posible, realizar una mezcla asfáltica en frío con RAP 100% como agregado alternativo que sustituyan los agregados pétreos naturales y minimizar la explotación de estos al momento de generar producción de mezclas asfálticas.
- 6.3 Las altas temperaturas el día de la instalación de la mezcla, en el cual se registraron temperaturas superiores de 48 °C en la capa de rodadura, favoreció para un menor tiempo de curado de la mezcla, minimizando los tiempos de puesta en servicio al tráfico.
- 6.4 El comportamiento de la mezcla en frío implementada en los trabajos de parcheo, según el monitoreo realizado desde el 15 de enero de 2025 hasta el 15 de junio de 2025, ha sido óptimo, ya que no se ha evidenciado ningún tipo de patología asociada a sus características físico-mecánicas, como desgaste, fisuras o ahuellamiento.

- 6.5 La mezcla óptima estuvo compuesta por 100% de RAP, 6,7% de emulsión asfáltica de rompimiento lento (CRL-0), 4% de cemento hidráulico uso general (UG) y 1% de agua preenvuelta. Esta formulación alcanzó una estabilidad de 14.675 N, un flujo de 3,47 mm y una densidad de 1960 kg/m³, parámetros que cumplen con los requisitos establecidos por el INVIAS, art. 442, [25], para mezclas asfálticas en frío. Transcurrido este tiempo de evaluación, los parcheos de prueba se mantienen en excelente estado, lo que demuestra que la mezcla no solo es adecuada para cumplir una vida útil de seis meses, sino que incluso tiene el potencial de superarla.
- 6.6 La elaboración de esta mezcla asfáltica en frío con RAP adicionando cemento, es muy fácil y rápida de elaborar en campo, ya que no se requiere mucha mano de obra no calificada, como tampoco maquinaria pesada o equipos sofisticados, solo se requiere herramientas menores y equipos como cortadora de disco y compactador de platón, adicionalmente el tiempo incluyendo el tiempo desde que se inicia hacer la mezcla al tiempo en que se abre la vía para abrir el tráfico del carril es menor de 3 horas, para un parcheo de 1,20 m de ancho por 1,20 m de largo.
- 6.7 Se evidencia que el RAP puede ser una solución efectiva para mejorar la infraestructura vial en Colombia, promoviendo la sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos.

7. RECOMENDACIONES

Este trabajo representa un punto de partida en la investigación sobre mezclas asfálticas en frío con materiales 100% reciclados, y permite evidenciar su viabilidad técnica para intervenciones de parcheo en vías de bajo y medio tránsito. No obstante, los resultados aquí presentados constituyen un abrebocas para futuras investigaciones que profundicen en el comportamiento estructural de estas mezclas bajo condiciones de carga repetitiva. En particular, se recomienda avanzar en la determinación de módulos dinámicos, así como en la ejecución de ensayos de fatiga y pruebas de deformación permanente, que permitan caracterizar la mezcla desde un enfoque mecanístico y evaluar su desempeño en escenarios de tráfico más exigente o aplicaciones estructurales a mayor escala.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Instituto Nacional de Vías INVÍAS – Colombia, “Mapas de la Red Terciaria y Férrea,” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/59-mapas-de-la-red-terciaria-y-ferrea>

[2] Instituto Nacional de Vías INVÍAS – Colombia, “Manual de inspección de pavimento flexible y manual de mantenimiento de carreteras,” 2022, v2. [En línea]. Disponible en: <https://www.invias.gov.co/>

[3] F. Leiva-Villacorta, A. Vargas-Nordbeck, “Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP) Infraestructura Vial”, UCRSJ, Costa Rica, vol. 19, núm. 33, abril, 2017, pp. 35-44, Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=478276566003>

[4] “Reclaimed Asphalt Pavement - Material Description - User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction - FHWA-RD-97-148”. Federal Highway Administration [Online]. Availab: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap131.cfm>

[5] AC Castro Padilla, “Análisis de los métodos de reciclaje en caliente y fríos aplicados a concreto asfáltico, para la utilización en carpeta de rodadura en vías terciarias entre los años 2011-2017 en Colombia”. Falc ing civ, RIUCC, Santa Marta, colom,2019 [En línea]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/items/09eabae-a96c-47d0-a960-5883498c3db6>

[6] S. Peyman, K. Amirhossein, T. Shadan, G. Hamad, “A comprehensive evaluation of damping, vibration, and dynamic modulus in reclaimed asphalt pavement: The role of rejuvenators, polymer, temperature, and aging”, Case Studies in Construction Materials, Vol.21, p.1, Dec,2024. [Online]. Availab: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.eafit.edu.co/science/article/pii/S2214509524005175?via=ihub>

[7] J. Zhang, W. Zhang, Y. Xiao, X. Hu, Z. Feng, D. Kuang, “Maximizing the Utilization of the Treated RAP by a Two-Step Enhancement Method in Recycled Asphalt Mixtures”, vol. 52, p 4, jul, 2024. [Online]. Availab: https://www-astm-org.ezproxy.eafit.edu.co/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/TESTEVAL/PAGES/JTE20230645.htm.

[8] E.J. Guerra, D. F. Pinzón, “Diseño de una mezcla Marshall para carpeta de rodadura empleando material fresado proveniente de Tecno pavimentos S.A. y comparación con mezcla asfáltica convencional”, Trabajo de Grado, FI, UPBSB, Bucaramanga, Colom, 2019. [En línea]. Disponible: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/6447>

[9] R. Hernández, J. Lopez, J. Beltran, . “Manual de mantenimiento en vías urbanas, utilizando mezcla asfáltica en caliente, tibia y en frío.” Academia.edu - Find Research Papers, Topics, Researchers. FIYA, US, Salvador,2012, [En línea]. Disponible: https://www.academia.edu/doing_58338687/Manual_de_mantenimiento_en_vias_urbanas_utilizando_mezcla_asfaltica_en_caliente_tibia_y_en_frio..pdf

[10] J. L. Ostos Ascencio, J. M. Duarte Sanmiguel, O. J. Reyes Ortiz, “Comportamiento de mezclas asfálticas del instituto de desarrollo urbano con adición de pavimento reciclado”, O.J.

Reyes Ortiz. PH.D,FI, UMNG, Bogotá, colom,2011, [En línea]. disponible en: <https://repositorio.unitec.edu/items/66f8b1ff-e2d8-40bc-90ff-bc938eed50fd>

[11] J. Zhang et al., “Maximizing the Utilization of the Treated RAP by a Two-Step Enhancement Method in Recycled Asphalt Mixtures,” National Academies, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://trid.trb.org/View/2404188>

[12] CEDEX, Reciclado de Pavimentos Asfálticos, Dic. 2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/26C518BE-1802-4803-82B1-FBE634B03B03/119932/RECICLADODEPAVIMENTOSASFALTICOS.pdf>.

[13] Peyman,. «A comprehensive evaluation of damping, vibration, and dynamic modulus in reclaimed asphalt pavement: The role of rejuvenators, polymer, temperature, and aging». Case Studies in Construction Materials, [s. l.], v. 21, n. e03366-, 2024. DOI 10.1016/j.cscm.2024.e03366. Disponible en: <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=3fe4024e-024a-330d-a7d9-0a05e8bd0809>. Acceso em: 13 set. 2024.

[14] R. Al-Fatlawy, S. Ali Tawfek, K. Fakhraldin Mohammed, A. Hussain Nibras, Y. Abd Ibtihal, “Improvement in the California bearing ratio of subbase soil by recycled asphalt pavement and cement – DOAJ”, Directory of Open Access Journals – DOAJ, Vol. 13 No. 1, p 1, oct,2023 [Online]. Availab: <https://doaj.org/article/bcaabebd1eb3466bb7a7a65f2b2af3a3>

[15] M. A. Remolina Bonilla, “Diseño por el método Marshall de mezclas asfálticas en la planta de Tecnopavimentos S. A...,” Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana, 2011. [En línea]. Disponible en: https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/docs/digital_21078.pdf

[16] O Ascencio, J Liliana, JM Duarte Sanmiguel... - 2012 “Comportamiento de mezclas asfálticas del instituto de desarrollo urbano con adición de pavimento reciclado” Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstreams/ceaa37e9-89d2-4178-9289-308699fc9cd1/download>

[17] J. G. Bastidas-Martínez, H.A Rondón-Quintana, L. Contreras-Zartha, S. Forero-Castaño, L. Rojas-Rozo, “Evaluación dRozo, Evaluación concreto asfáltico con incorporación de agregados reciclados de concreto” Revista UIS ingenierías, vol. 20, núm. 2, 2021, abril-junio, pp. 75-84 Universidad Industrial de Santander DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>

[18] Normas de ensayo de materiales para carreteras, INVIAS, 2022, Instituto Nacional de Vías, <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/1988-normas-de-ensayo-de-materiales-para-carreteras>.

[19] “Cemento Gris Ficha Técnica, Usos, Beneficios y Ventajas”. Cementos Argos Colombia. Accedido el 12 de junio de 2025. [En línea]. Disponible: <https://colombia.argos.co/cemento-gris/>

[20] A. F. Jasim, Z. K. Ali, e I. F. Al-Saadi, “A Comprehensive Review of Life Cycle Cost Assessment of Recycled Materials in Asphalt Pavements Rehabilitation,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2024, pp. 1–19, 2024, doi: 10.1155/2024/2004803. [Online]. Availab: <https://doi.org/10.1155/2024/2004803>.

[21] B. Taringa y T. V. Manyike, “Accessed from: https://www.researchgate.net/publication/264800355_What_is_sociology, 2014.”, *E-J. Humanities, Arts Social Sci.*, pp. 670–687, mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.38159/ehass.2025662>

[22] S. Pérez Castaños y S. García Santamaría, “La investigación cuantitativa,” en *¿Cómo investigar en Didáctica de las Ciencias Sociales?*, Delfín Ortega-Sánchez, Ed., Ediciones Octaedro. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/370658808_La_investigacion_cuantitativa

[23] M. M Linares, J. F. León, M. A. Ramos, “Monografía del uso de rap (pavimentos asfáltico reciclados) para la rehabilitación de vías urbanas del municipio de Girardot - Cundinamarca”, Tesis, FI, CUMD, Girardot, Colom,2020. [En línea]. Disponible: https://repository.uniminuto.edu/bitstream/10656/12063/1/T.IC_MonroyMarily-LeonJhon-RamosMiller_2020.pdf

[24] H. Patiño Vera, “Mezcla asfáltica con adición de pavimento reciclado”, Tesis, FI, UDES, Colom, 2023 En línea]. Disponible: <https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/b5433c83-6d08-4044-be1f-1b6db9a681e4/content>

[25] Peyman, “A comprehensive evaluation of damping, vibration, and dynamic modulus in reclaimed asphalt pavement: The role of rejuvenators, polymer, temperature, and aging,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, e03366, 2024, doi: 10.1016/j.cscm. 2024.e03366. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03366>

[26] J. a: Mora, “Aprovechamiento de reciclado RAP: Para mejoramiento de vías terciarias en Colombia”, Tesis, FI, UCC, Bogotá, Colom, 2020: [En línea]. Disponible: <https://repositorio.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/abe5a3bb-3a23-4a22-8368-b04ee29245c2/content>

[27] V. G. R. Mendoza Camey, “MÉTODO RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) COMO UNA ALTERNATIVA DE REHABILITACIÓN DE CARRETERAS EN GUATEMALA, PROCESO DE CONSTRUCCIÓN Y NORMAS DE REGULARIZACIÓN”, Tesis, FI, GTM, 2015 [En línea]. Disponible: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/5130>

[28] A. Abdalrhman , T. Aizat Mohd, A. Abobaker. G. F, S. Mohmed, Y. Nur Izzi Md , “A REVIEW OF THE USE OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT FOR ROAD PAVING APPLICATIONS | Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)”. UTM Press Journal Management powered by OJS. Vol. No. P 1, april,2020 [Online]. Availab: <https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/14320>