

FABRICACIÓN DE ADOQUINES CON RAP EN UNA MEZCLA EN FRÍO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA DE ROMPIMIENTO LENTO.

Ingeniería Civil

Universidad la Gran Colombia

Bogotá D.C

2025



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Bogotá D.C.
2025

CONTROL DE CAMBIOS

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

Revisión	Fecha	Sección modificada	Observaciones
A	26/05/2025	-	Versión inicial

REVISIÓN Y APROBACIÓN

Ejecutores	Preparó:  Brayan Felipe Muñoz Beltrán CC 1233912003  Brian Stiven Ramirez Millan CC 1233891491	Revisó: Ingrid Marylin Silva Rojas 20/05/2025
	Estudiantes	Docente Asesor

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniería Civil



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil

Universidad la Gran Colombia

Bogotá D.C

2025

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	5
2. PALABRAS CLAVES	5
3. ABSTRACT	6
4. KEY WORDS	6
5. INTRODUCCIÓN	7
6. OBJETIVOS	8
6.1 Objetivo general	8
6.2 Objetivos específicos	8
7. ANTECEDENTES	9
7.1 Uso de reciclado de plástico Tereftalato de Polietileno (PET) para la elaboración de adoquines de construcción	9
7.2 Diseño de adoquines de concreto con adición de PET reciclado para el desempeño en pavimentos de tránsito ligero	9
7.3 Fabricación de adoquines con residuos de plástico y construcción	9
7.4 Viabilidad técnica para la fabricación industrializada de adoquines en mezcla asfáltica en caliente con o sin adición de RA	10
7.6 Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR	10
7.7 Análisis del diseño de una mezcla asfáltica en caliente adicionada con grano de caucho reciclado y RAP	10
8. METODOLOGÍA	11
8.1 Obtención del Material RAP	11
8.2 Preparación y Homogeneización del Material: Cuarteo	11
8.3 Extracción de Asfalto	11
8.4 Análisis Granulométrico	11
8.5 Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas-DISEÑO MARSHALL	11
8.6 Determinación de Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Compactadas	11
8.7 Diseño y Fabricación de Molde para Adoquines	12
8.8 Compactación y Moldeo de Adoquines	12
8.9 Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines	12
9. RESULTADOS	13
9.1 Obtención del Material RAP	13
9.2 Preparación y Homogeneización del Material: Cuarteo	13
9.3 Extracción de Asfalto	14
9.4 Análisis Granulométrico	14
9.5 Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas - Diseño Marshall	15
9.6 Determinación de Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Compactadas	19

9.7 Diseño y Fabricación de Molde para Adoquines	20
9.8 Compactación y Moldeo de Adoquines	21
10. CONCLUSIONES	30
10.1 Contenido de asfalto residual y granulometría adecuada	30
10.2 Dosificación óptima de emulsión y comportamiento mecánico inicial aceptable	30
10.3 Buena compactación y ventajas del método utilizado	30
10.4 Desempeño hidráulico superior al de materiales convencionales	30
10.5 Absorción mayor, pero aceptable	30
10.6 Comportamiento estructural aceptable para aplicaciones específicas	30
10.7 Impacto ambiental y costo-beneficio muy favorables	31
10.8 Análisis Costo-Beneficio Estimado	32
11. ANEXOS	33
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

Lista de figuras

Figura 1. Análisis comparativo de la granulometría con la especificación técnica IDU ET 450.

Figura 2. Estabilidad Vs % emulsión

Figura 3. Modelo y diseño de molde

Figura 4. Modelo y diseño de molde

Figura 5. Adoquín confinado y correctamente instalado

Figura 6. Representación de la etapa final en la instalación del adoquín

Lista de tablas

Tabla 1. Resultado de extracción de asfalto

Tabla 2. Resultado del análisis granulométrico.

Tabla 3. Preparación de probetas. Fuente: Propia

Tabla 4. Datos Gravedad Especifica Bulk

Tabla 5. (IDU) ET-IC-01 título 1020.2.4.2.1 Dimensiones

Tabla 6. Resultados de Ensayo de permeabilidad

Tabla 7. Absorción de Agua

Tabla 8. Resultados de Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

Tabla 9. Resultados Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

Tabla 10. APU – Precio Adoquín en RAP

Lista de fotografías

Fotografía 1. Obtención del RAP

Fotografía 2. Proceso de cuarteo del RAP

Fotografía 3. Ensayo de extracción de asfalto

Fotografía 4. Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas - Diseño Marshall

Fotografía 5. Ensayo de estabilidad y flujo

Fotografía 6. Gravedad Específica Bulk

Fotografía 7. Adoquines

Fotografía 8. Ensayo de permeabilidad

Fotografía 9. Ensayo Absorción de Agua

Fotografía 10. Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

Fotografía 11. Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

Fotografía 12. Impacto ambiental

Lista de anexos

Anexo 1. Informe de laboratorio

Anexo 2. Certificado de ponencias

1. Resumen

Para la elaboración de nuestro proyecto utilizamos el RAP (Reclaimed Asphalt Pavement, es un material asfáltico reciclado obtenido de rehabilitaciones y mantenimientos de la red vial y que es considerado un residuo de construcción y demolición (RCD) dicho material está regulado por el decreto 357 de 1997 donde se establecen las directrices de manejo almacenamiento y disposición final en lugares autorizados y que generen una reducción de impacto ambiental. A pesar de esto en la mayoría de casos no es tenido en cuenta para su reutilización por la pérdida de sus características iniciales al momento de su extracción, aún así cuando el RAP cuenta con un tratamiento adecuado como lo son el correcto almacenamiento, la selección o inclusión de ciertas emulsiones puede volver a adquirir las características que pueden compararse con las de un pavimento nuevo.

Con lo anterior se puede considerar el uso del RAP en nuevas aplicaciones que en este caso será el de fabricar adoquines para zonas con tránsito peatonal o ligero.

Este proyecto cuenta con un enfoque hacia la protección ambiental y el ejercicio técnico, el cual puede tener un impacto positivo en el sector de la construcción. El uso del RAP en la fabricación de nuevos elementos para la construcción, como los adoquines, permite minorar la fabricación de nuevas piezas de concreto o arcilla evitando la explotación de minerales usados para dicho fin .

Con lo anterior se busca impulsar la protección ambiental y el máximo aprovechamiento de los recursos naturales alineándose con los principios de los objetivos de desarrollo sostenible, basados en una economía circular al incorporar los RCD en nuevos procesos productivos dándoles un uso funcional en obras de infraestructura.

La metodología implementada en este proyecto combina enfoques cualitativos y cuantitativos. Donde inicialmente, se llevó a cabo la recolección, clasificación y tratamiento del RAP, al que se le aplicó una emulsión asfáltica de rompimiento lento para mejorar sus características. Posteriormente, se fabricaron prototipos de adoquines con diferentes proporciones de RAP vs emulsión, los cuales fueron evaluados mediante ensayos físicos y mecánicos, siguiendo las especificaciones establecidas en las normas técnicas vigentes en Colombia.

2. Palabras claves

Residuos de Construcción y Demolición, RAP, Adoquín, Medio Ambiente, Reutilización, Fabricación, alternativas..

3. Abstract

For the elaboration of our project we used RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), a recycled asphalt material obtained from rehabilitations and maintenance of the road network, which is considered a construction and demolition waste (CDW). This material is regulated by decree 357 of 1997, which establishes guidelines for storage and final disposal in authorized places that generate a reduction of environmental impact. Despite this, in most cases it is not considered for reuse because of the loss of its initial characteristics at the time of extraction. However, even so, when RAP is properly treated, such as by proper storage, selection or inclusion of certain emulsions, it can reacquire characteristics that can be compared to those of a new pavement.

With the above, the use of RAP in new applications can be considered, which in this case will be the manufacture of pavers for areas with pedestrian or light traffic.

This project has a focus on environmental protection and the technical exercise, which can have a positive impact on the construction sector. The use of RAP in the manufacture of new construction elements, such as paving stones, reduces the manufacture of new concrete or clay pieces, avoiding the exploitation of minerals used for this purpose.

The above seeks to promote environmental protection and the maximum use of natural resources in line with the principles of the sustainable development objectives, based on a circular economy by incorporating CDW in new production processes, giving them a functional use in infrastructure works.

The methodology implemented in this project combines qualitative and quantitative approaches. Initially, the RAP was collected, classified and treated, to which a slow breaking asphalt emulsion was applied to improve its characteristics. Subsequently, prototypes of pavers were manufactured with different proportions of RAP vs. emulsion, which were evaluated by means of physical and mechanical tests, following the specifications established in the technical standards in force in Colombia.

4. Key words

Construction and Demolition Waste, Reclaimed Asphalt Pavement, Paving Stone, Environment, Reuse, Manufacturing, alternatives.

5. Introducción

El desarrollo constante de la red vial en la ciudad ha provocado un incremento considerable en la generación de desechos provenientes de las labores de mantenimiento y rehabilitación de pavimentos. Uno de los materiales más representativos es el RAP (Pavimento Asfáltico Recuperado), que se produce al fresar capas de asfalto desgastadas por el tiempo y el uso frecuente. En Colombia, este tipo de desecho se categoriza como un Residuo de Construcción y Demolición (RCD), y su gestión está regida por el Decreto 357 de 1997, que establece directrices para su disposición adecuada en lugares autorizados. A pesar de esto, en la mayoría de los casos, no se considera su aprovechamiento o reciclaje.

El RAP posee un considerable potencial si se maneja de manera correcta. Para conseguir esto, es fundamental seguir un procedimiento que contemple un almacenamiento regulado, una cuidadosa elección del material y la utilización de emulsión asfáltica. Con este tipo de tratamiento, el RAP puede recuperar características semejantes a las del asfalto nuevo, lo que lo hace una opción viable para crear elementos de construcción como los adoquines. Estos adoquines son apropiados para caminos con poco tránsito o áreas peatonales, brindando una alternativa que no solo es factible desde el punto de vista técnico, sino que también es más respetuosa con el medio ambiente. Su aplicación contribuye a disminuir la extracción de materiales pétreos que se utilizan para producir adoquines tradicionales de concreto o arcilla, además de ayudar a reducir el impacto ambiental asociado con estos procesos.

Este trabajo se origina dentro del Semillero de Investigación en Materiales de Construcción y Sostenibilidad (SEIMAS), con la meta de convertir el RAP en una opción efectiva y sostenible para la fabricación de pavimentos destinados a vías de poco tráfico. La iniciativa pretende contribuir al cuidado del medio ambiente a través de la reutilización de residuos de obra, impulsando prácticas coherentes con los fundamentos de la economía circular y apoyando soluciones más sostenibles en la industria de la construcción.

Es importante señalar que todas las fases del proyecto fueron creadas desde el principio por el equipo investigador. Se inició con la recolección directa del RAP, seguido por el diseño y la creación de un molde específico para la producción de los adoquines. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de compactación controlada y se realizaron pruebas experimentales, donde se ajustaron las proporciones de emulsión asfáltica para determinar la mezcla ideal que resultara en la mayor densidad del adoquín. Al final, se analizaron las características físicas y mecánicas de los adoquines producidos, de acuerdo con las pautas establecidas en las regulaciones técnicas colombianas (INVIAS), con el objetivo de confirmar su rendimiento y validar su aplicación como una opción eficiente, funcional y sostenible para la construcción de rutas de tránsito ligero.

6. Objetivos

6.1 Objetivo general

Diseñar y fabricar un adoquín a partir de RAP y emulsión asfáltica de rompimiento lento, utilizando mezcla en frío, con el propósito de caracterizar sus beneficios mecánicos y funcionales en aplicaciones para vías de tráfico liviano o uso peatonal.

6.2 Objetivos específicos

- Caracterización y evaluación del material RAP
- Diseñar y construir de adoquines sostenibles a base de RAP y emulsión asfáltica
- Evaluar las características Físicas y propiedades mecánicas de los adoquines
- Analizar económicamente el costo de la producción del adoquín terminado

7. Antecedentes

7.1 Uso de reciclado de plástico Tereftalato de Polietileno (PET) para la elaboración de adoquines de construcción

Lugar: Universidad Peruana Unión, Perú

Tipo de mezcla: Extrusión en caliente

Año: 2021

Resumen: Se diseñaron adoquines utilizando diferentes proporciones de PET reciclado y arena fina. La mezcla con 30% de PET y 70% de arena fina alcanzó la mayor resistencia a la compresión (220.6 kg/cm²), superando los estándares establecidos para adoquines de concreto.

7.2 Diseño de adoquines de concreto con adición de PET reciclado para el desempeño en pavimentos de tránsito ligero

Lugar: Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú

Tipo de mezcla: Concreto con fibras de PET

Año: 2024

Resumen: Se evaluaron adoquines de concreto con diferentes porcentajes de fibras de PET reciclado. La adición del 0.50% de PET mejoró la resistencia a compresión y flexión, y redujo la absorción de agua, indicando un mejor desempeño para pavimentos de tránsito ligero.

7.3 Fabricación de adoquines con residuos de plástico y construcción

Lugar: Universidad Autónoma de Manizales, Colombia

Tipo de mezcla: Mezcla de polietileno de baja densidad y residuos de construcción

Año: 2023

Resumen: Se desarrollaron adoquines ecológicos utilizando una mezcla de 50% de residuos de construcción y 50% de polietileno reciclado. Los adoquines resultantes superaron las propiedades mecánicas de los adoquines comerciales disponibles en Colombia.

7.4 Viabilidad técnica para la fabricación industrializada de adoquines en mezcla asfáltica en caliente con o sin adición de RA

Lugar: Universidad de Medellín, Colombia

Tipo de mezcla: Mezcla asfáltica en caliente

Año: Proyecto en desarrollo

Resumen: El proyecto busca desarrollar adoquines utilizando mezcla asfáltica en caliente, incorporando hasta un 40% de RAP, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ y ofrecer una alternativa sostenible para pavimentos articulados en vías peatonales o de bajo tránsito.

7.5 Rejuvenecedor de RAP para la aplicación en mezclas asfálticas en caliente implementada con asfaltita en Pesca, Boyacá

Lugar: Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

Tipo de mezcla: Mezcla asfáltica en caliente con rejuvenecedor

Año: 2024

Resumen: Se elaboraron mezclas asfálticas MDC-19 utilizando un 30% de RAP y un rejuvenecedor a base de asfaltita. Las mezclas modificadas mostraron mejor desempeño en pruebas de fatiga y ahuellamiento, cumpliendo con las normativas para tránsitos de tipo NT2.

7.6 Desempeño del pavimento con mezcla reciclada-RAP y grano de caucho reciclado-GCR

Lugar: Universidad de la Salle, Colombia

Tipo de mezcla: Mezcla asfáltica en caliente con RAP y GCR

Año: 2020

Resumen: Se evaluó el desempeño de mezclas asfálticas que incorporan RAP y grano de caucho reciclado, enfocándose en propiedades como ahuellamiento y fatiga. Los resultados indicaron mejoras en la durabilidad y resistencia, siendo una opción viable para la red vial secundaria y terciaria.

7.7 Análisis del diseño de una mezcla asfáltica en caliente adicionada con grano de caucho reciclado y RAP

Lugar: Universidad La Gran Colombia, Colombia

Tipo de mezcla: Mezcla asfáltica en caliente modificada

Año: Fecha no especificada

Resumen: Se desarrolló una mezcla asfáltica en caliente incorporando grano de caucho reciclado y RAP. Las pruebas de laboratorio mostraron que la mezcla modificada cumple con los criterios establecidos en varios aspectos clave, indicando un producto de alta calidad con mejoras significativas en resistencia y durabilidad.

8. Metodología

Esta investigación se sitúa dentro de un enfoque cuantitativo, aplicado y experimental, dado que su principal finalidad es determinar que se cumplan las normas técnicas definidas por el INVIAS en cuanto a la caracterización del material y sus características físicas y comportamiento mecánico. Además, se pretende comprobar que los adoquines producidos satisfacen los estándares geométricos establecidos por el IDU. Con ese fin, se ejecutaron las pruebas de laboratorio tanto en mezclas de materiales como en adoquines fabricados, siguiendo los lineamientos estandarizados de la normativa colombiana vigente.

El enfoque experimental escogido implica llevar a cabo pruebas con muestras reales, lo que facilita la comparación directa de sus propiedades con los valores de referencia descritos en manuales y especificaciones técnicas nacionales. Esta metodología no solo certifica el rendimiento del material, sino que también proporciona información crucial sobre su factibilidad como opción en la construcción de infraestructuras viales.

8.1 Obtención del Material RAP

El material RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) utilizado en esta investigación fue obtenido a partir de trabajos de mantenimiento vial en pavimentos asfálticos deteriorados. Este proceso de fresado permitió recolectar el material residual necesario para el desarrollo del diseño de mezcla en frío.

8.2 Preparación y Homogeneización del Material: Cuarteo

Para asegurar la representatividad y uniformidad del RAP obtenido, se realizó un proceso de cuarteo siguiendo la normativa establecida por INVIAS. Este procedimiento consistió en dividir la muestra total en porciones iguales, eliminando fracciones diagonales de manera sucesiva hasta obtener un volumen adecuado y representativo para su análisis y pruebas posteriores.

8.3 Extracción de Asfalto

Con el objetivo de conocer el contenido de ligante asfáltico residual en el RAP, se efectuó la extracción de asfalto conforme a la norma INVIAS vigente. Esta etapa permitió determinar el porcentaje de asfalto adherido a los agregados, información fundamental para el diseño de la mezcla asfáltica en frío y la dosificación de emulsión asfáltica.

8.4 Análisis Granulométrico

Se realizó la granulometría del RAP siguiendo los procedimientos establecidos por IDU 450 - 11, con el fin de determinar la distribución del tamaño de partículas dentro del material. Esta caracterización es esencial para garantizar que la mezcla cumpla con las especificaciones técnicas y para optimizar la dosificación de emulsión asfáltica.

8.5 Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas-DISEÑO MARSHALL

Para determinar la dosificación óptima de emulsión asfáltica y la densidad máxima de la mezcla, se prepararon probetas cilíndricas compactadas siguiendo el procedimiento descrito por INVIAS para mezclas asfálticas en frío. Se llevaron a cabo ensayos de estabilidad y flujo conforme a los estándares técnicos para evaluar el desempeño mecánico de las mezclas formuladas.

8.6 Determinación de Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Compactadas

Se aplicó el método descrito en la norma INV E – 733 – 13 para determinar la gravedad específica bulk y la densidad de las mezclas asfálticas compactadas, utilizando especímenes saturados y superficialmente secos. Estos parámetros permiten evaluar la calidad y compactación de la mezcla asfáltica preparada.

8.7 Diseño y Fabricación de Molde para Adoquines

Con base en las especificaciones dimensionales establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), se diseñó y fabricó un molde con dimensiones 20 cm x 10 cm x 6 cm, acorde para la producción de adoquines compactados con la mezcla RAP y emulsión asfáltica.

8.8 Compactación y Moldeo de Adoquines

Utilizando el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica previamente determinado y el volumen correspondiente al molde, se procedió a la compactación de la mezcla mediante amasado y prensado en una prensa hidráulica. Este proceso permitió la fabricación de adoquines con las características físicas necesarias para su evaluación.

8.9 Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines

Los adoquines fabricados fueron sometidos a una serie de ensayos para evaluar su calidad y resistencia, incluyendo:

- **Ensayo de permeabilidad:** para determinar la capacidad del adoquín de permitir el paso de agua, siguiendo las normativas INVIAS.

- **Ensayo de absorción:** para medir la cantidad de agua que el adoquín puede absorber, evaluando su durabilidad y resistencia al desgaste.
- **Ensayos de resistencia mecánica:** mediante pruebas de falla por compresión y flexión, con el objetivo de validar la capacidad estructural del adoquín para soportar cargas en pavimentos de tráfico liviano.

9. Resultados

9.1 Obtención del Material RAP

El material RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) utilizado en esta investigación fue recolectado a partir de trabajos de mantenimiento vial en pavimentos asfálticos deteriorados. A través del proceso de fresado se logró recuperar el material necesario para el diseño de la mezcla asfáltica en frío. Esta etapa fue fundamental para garantizar la reutilización de materiales existentes bajo criterios sostenibles.



Fotografía 1. Obtención del RAP
Fuente: Elaboración propia.

9.2 Preparación y Homogeneización del Material: Cuarteo

Para asegurar que el RAP fuera representativo y homogéneo, se realizó un proceso de cuarteo siguiendo los lineamientos establecidos por la normativa del INVIAS. Este procedimiento

consistió en dividir la muestra total en fracciones iguales, descartando porciones diagonales sucesivamente hasta obtener una muestra controlada y confiable para los ensayos posteriores.



Fotografía 2. Proceso de cuarteo del RAP
Fuente: Elaboración propia.

9.3 Extracción de Asfalto

Con el objetivo de determinar el contenido de ligante residual adherido a los agregados del RAP, se realizó la extracción de asfalto conforme a la norma INVIAS vigente. Este paso fue crucial para estimar el porcentaje de emulsión asfáltica a emplear en la mezcla, garantizando una dosificación adecuada y coherente con las condiciones del material reciclado.

	<p style="text-align: center;">Tabla 1. Resultado de extracción de asfalto</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="background-color: #4F81BD; color: white;">Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos INV E-732-13 (ASTM D2172)</th> </tr> <tr> <th style="background-color: #4F81BD; color: white;">Pi (g)</th> <td style="text-align: center;">1,200</td> <th style="background-color: #4F81BD; color: white;">% Asfalto</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th style="background-color: #4F81BD; color: white;">Pfs (g)</th> <td style="text-align: center;">1,150</td> <td rowspan="3" style="text-align: center; vertical-align: middle;">4.115</td> </tr> <tr> <th style="background-color: #4F81BD; color: white;">Pi-Filtro (g)</th> <td style="text-align: center;">2.4</td> </tr> <tr> <th style="background-color: #4F81BD; color: white;">Pf-Filtro (g)</th> <td style="text-align: center;">3.4</td> </tr> </tbody> </table>	Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos INV E-732-13 (ASTM D2172)			Pi (g)	1,200	% Asfalto	Pfs (g)	1,150	4.115	Pi-Filtro (g)	2.4	Pf-Filtro (g)	3.4
Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos INV E-732-13 (ASTM D2172)														
Pi (g)	1,200	% Asfalto												
Pfs (g)	1,150	4.115												
Pi-Filtro (g)	2.4													
Pf-Filtro (g)	3.4													
<p>Fotografía 3. Ensayo de extracción de asfalto Fuente: Elaboración propia.</p>	<p style="text-align: center;">Fuente: Elaboración propia.</p>													

9.4 Análisis Granulométrico

Se llevó a cabo un análisis granulométrico del RAP según los procedimientos definidos por IDU. Esta caracterización permitió conocer la distribución del tamaño de partículas del material reciclado, asegurando su compatibilidad con las especificaciones técnicas requeridas para mezclas en frío siguiendo las directrices de la especificación técnica “RECICLAJE DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN EL SITIO CON EMULSIÓN ASFÁLTICA” 450 -11 tabla 450.1 donde nos indican los rangos que debe cumplir la gradación de un material reciclado con emulsión asfáltica por el cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2. Resultado del análisis granulométrico.

IDU ET 450-11 TABLA 450.1			
Tamices	% Pasa	RANGO INFERIOR IDU	RANGO SUPERIOR IDU
1"	100	75	100
3/4"	92	65	100
3/8"	53	45	75
Nº 4	33	30	60
Nº 10	26	20	45
Nº 40	11	10	30
Nº 200	6	5	20

Fuente: Elaboración propia.

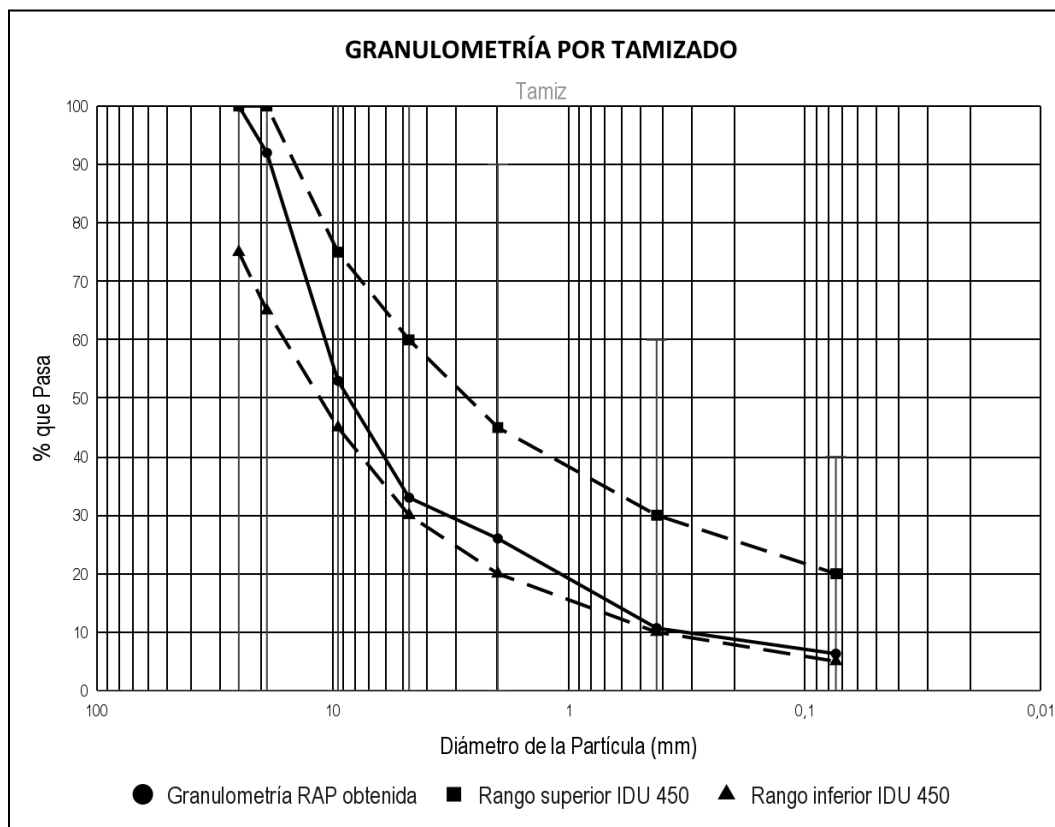


Figura 1. Análisis comparativo de la granulometría con la especificación técnica IDU ET 450.

Fuente: Elaboración propia.

9.5 Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas - Diseño Marshall

Para determinar el contenido óptimo de emulsión asfáltica y la densidad máxima de la mezcla, se prepararon probetas cilíndricas compactadas de acuerdo con la metodología Marshall adaptada para mezclas en frío. Los ensayos de estabilidad y flujo fueron ejecutados conforme a las especificaciones técnicas de INVIAS norma INV E 748, permitiendo evaluar el comportamiento mecánico inicial de la mezcla.

- Mezclamos el asfalto RAP con emulsión asfáltica al 3 - 6 - 9 - 12 - 15 % y procedemos a realizar la compactación de las briquetas como nos es indicado en la norma, luego se dejan reposar durante una noche:







- Se ejecuta el ensayo de gravedad específica bulk en base a la norma INVIAS INV E - 733.

- Por último se ejecuta el ensayo de estabilidad y flujo 24 horas después de la compactación de las probetas:

Fotografía 4. Preparación de Probetas Cilíndricas Compactadas - Diseño Marshall
Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 5. Ensayo de estabilidad y flujo
Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de el ensayo de estabilidad y flujo fueron los siguientes:

Tabla 3. Preparación de probetas. Fuente: Propia

PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE PROBETAS CILÍNDRICAS COMPACTADAS DE MEZCLA ASFÁLTICA INV E-748 - 13	
% Emulsión	Estabilidad (kN)
3	0.9
6	1.09
9	1.22
12	1.16
15	1.02

Fuente: Elaboración propia.

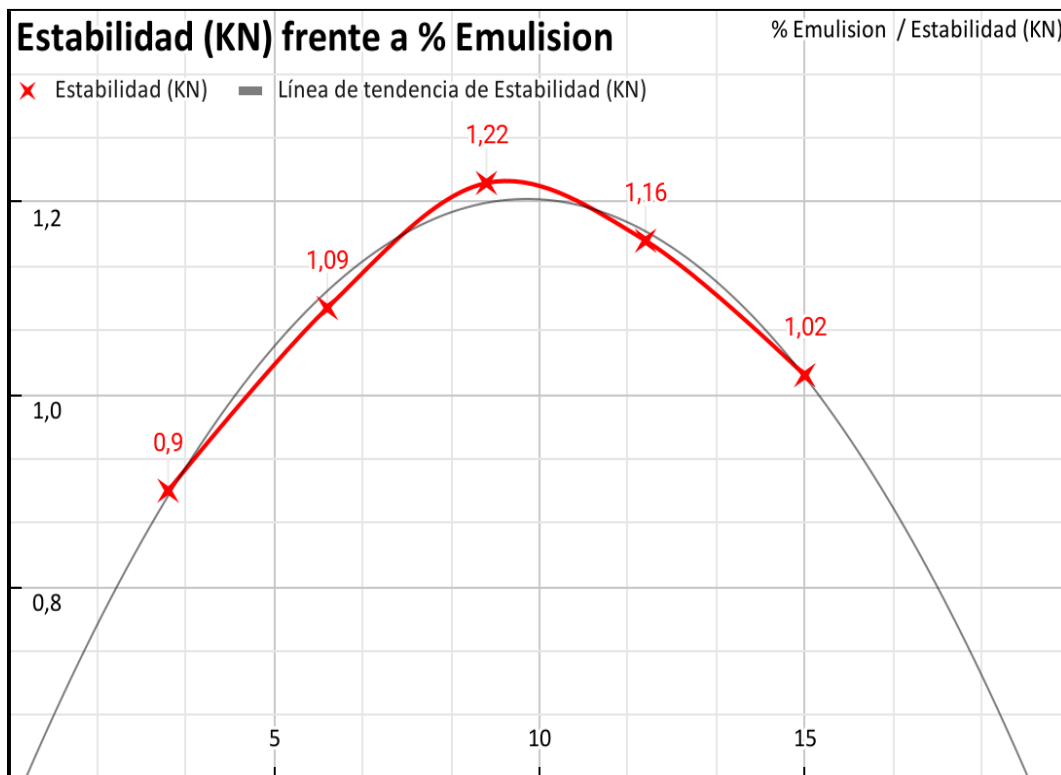


Figura 2. Estabilidad Vs % emulsión

Fuente: Elaboración propia.

9.6 Determinación de Gravedad Específica Bulk y Densidad de Mezclas Compactadas

La determinación de la gravedad específica bulk y la densidad de las mezclas asfálticas compactadas se realizó aplicando el procedimiento descrito en la norma **INV E – 733 – 13**. Se emplearon especímenes saturados y superficialmente secos para obtener resultados precisos que permitieran evaluar el nivel de compactación y calidad de la mezcla elaborada.



Fotografía 6. Gravedad Específica Bulk
Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de la densidad bulk fueron los siguientes:

Tabla 4. Datos Gravedad Especifica Bulk

GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPÉCIMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS INV E – 733 – 13					
Parámetro	Briqueta 1	Briqueta 2	Briqueta 3	Briqueta 4	Briqueta 5
Diámetro de briqueta (1) (mm):	100.5	101.0	100.7	101.2	100.6
Diámetro de briqueta (2) (mm):	100.9	101.4	101.1	101.6	101.0
Diámetro de briqueta (3) (mm):	101.3	101.8	101.5	102.0	101.4
Diámetro de briqueta (4) (mm):	100.9	101.4	101.1	101.6	101.0
Diámetro de briqueta (Promedio) (mm):	100.90	101.40	101.10	101.60	101.00
Altura de briqueta (1) (mm):	58.4	57.6	58.1	57.5	58.0
Altura de briqueta (2) (mm):	58.9	58.0	58.5	57.9	58.4
Altura de briqueta (3) (mm):	59.2	58.4	58.9	58.3	58.8
Altura de briqueta (4) (mm):	58.8	58.0	58.5	57.9	58.4
Altura de briqueta (Promedio) (mm):	58.83	58.00	58.50	57.90	58.40
Volumen de la briqueta (mm ³)	470164	468375	469621	469413	467891
A - Masa en el aire del espécimen seco (g):	845	871	891	906	875
B - Masa del espécimen en estado SSS (g):	860	886	908	924	895
C - Masa del espécimen en agua (g):	510	526	542	556	529
Gravedad específica bulk a 25°C:	1.86	1.91	1.95	1.98	1.89
Densidad a 25°C (kg/m ³):	1860	1912	1953	1984	1896
Absorción de agua (%):	1.79	1.76	1.97	2.01	1.82
Temperatura del horno (°C):	110	110	110	110	110
% Emulsión	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
Estabilidad (KN)	0.90	1.09	1.22	1.16	1.02
Densidad (kN/m ³)	18.60	19.10	19.50	19.80	18.90

Fuente: Elaboración propia.

9.7 Diseño y Fabricación de Molde para Adoquines

Siguiendo las especificaciones dimensionales del **Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) ET-IC-01 titulo 1020.2.4.2.1 Dimensiones**, se diseñó y construyó un molde para fabricar adoquines con dimensiones de 20 cm x 10 cm x 6 cm. Este molde permitió la producción estandarizada de adoquines compactados con la mezcla obtenida a partir de RAP y emulsión asfáltica de rompimiento lento. Este molde se fabricó con un sistema de retiro de sus paredes y tapas para

facilitar la extracción de la muestra además de una base que pueda resistir las fuertes presiones que debe soportar durante la compactación del adoquín.

El molde fabricado se muestra a continuación:

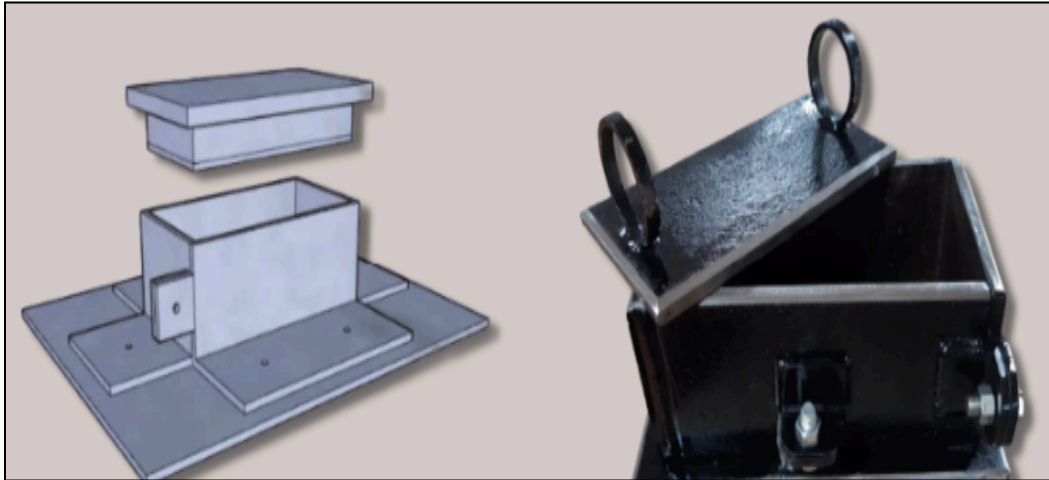


Figura 3. Modelo y diseño de molde
Fuente: Elaboración propia.

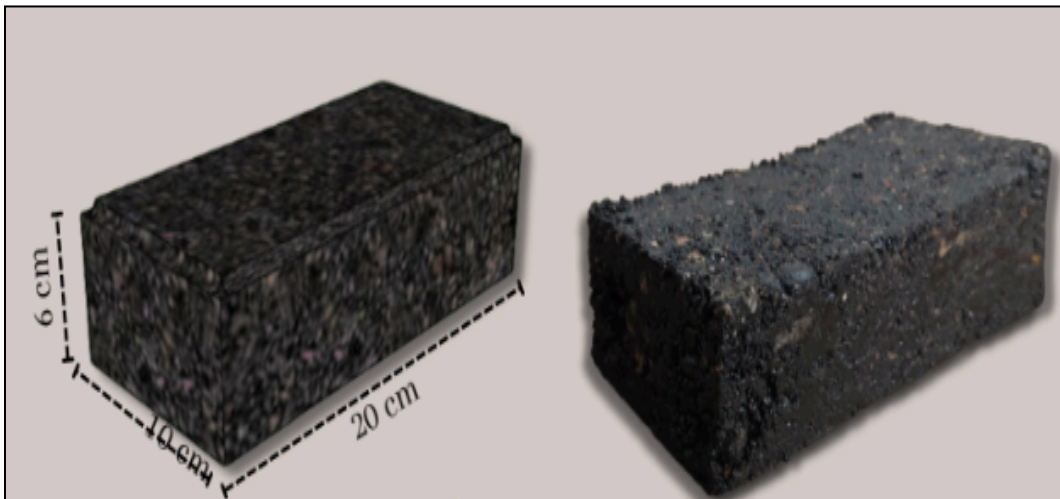
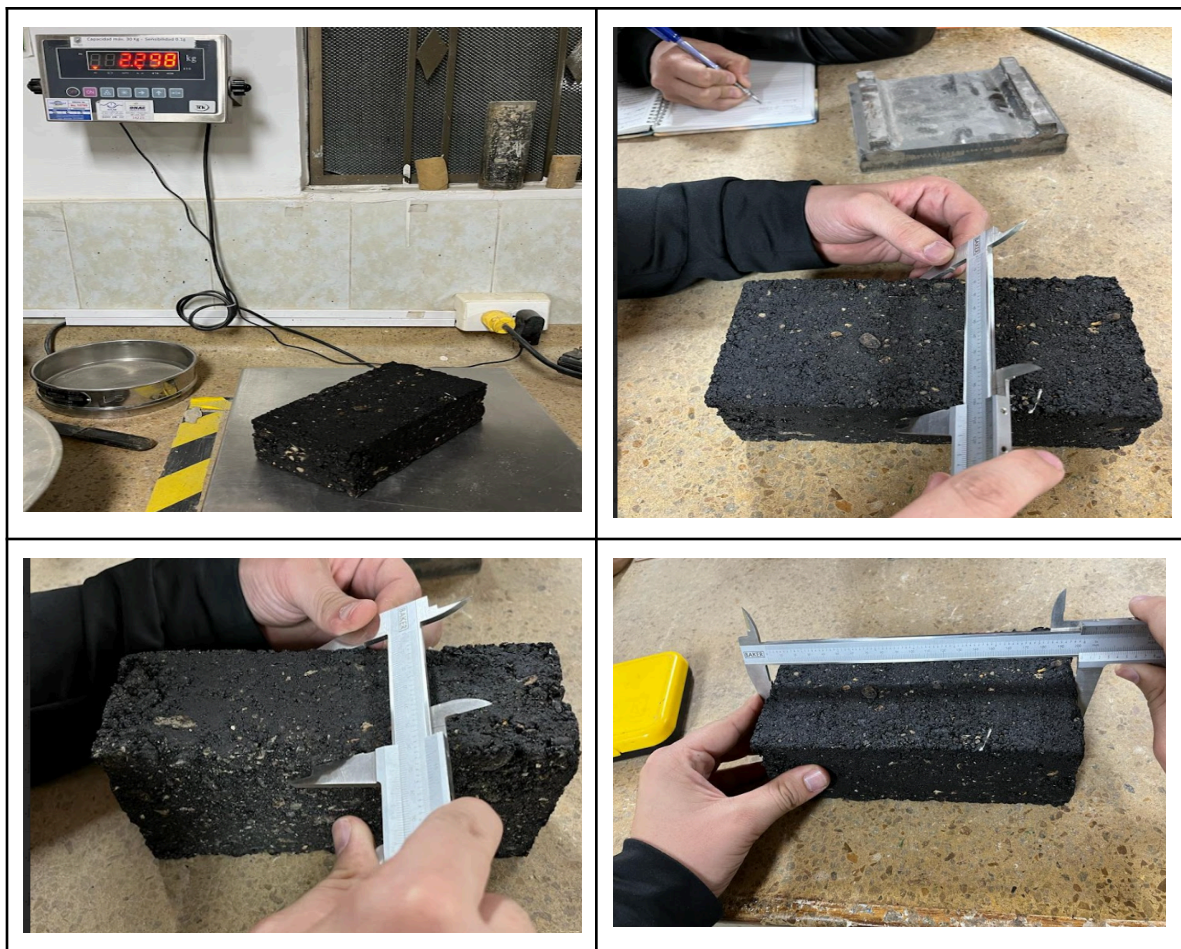


Figura 4. Modelo y diseño de molde
Fuente: Elaboración propia.

9.8 Compactación y Moldeo de Adoquines

Utilizando el porcentaje óptimo de emulsión previamente determinado y el volumen correspondiente al molde diseñado, se llevó a cabo la compactación de la mezcla mediante amasado y aplicación de carga en una prensa hidráulica. Este procedimiento permitió la conformación adecuada de los adoquines, garantizando condiciones homogéneas para su posterior evaluación.



Fotografía 7. Adoquines
Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos de las muestras fabricadas fueron los siguientes:

Tabla 5. (IDU) ET-IC-01 título 1020.2.4.2.1 Dimensiones

(IDU) ET-IC-01 título 1020.2.4.2.1 Dimensiones					
Parámetro	Adoquín 1	Adoquín 2	Adoquín 3	Adoquín 4	Adoquín 5
Largo (cm)	20,1	20,2	19,8	20,1	19,9
Ancho (cm)	10,0	10,1	9,9	10,2	9,8
Alto (cm)	6,0	6,1	5,9	6,2	5,8
Peso (g)	2250	2280	2225	2300	2200
Densidad (g/cm³)	1,87	1,83	1,92	1,81	1,94
Resistencia a la Compresión (MPa)	9,8	11,9	11,5	10,5	10,7
PROMEDIO (MPa)	10,88				
Parámetro	Adoquín 6	Adoquín 7	Adoquín 8	Adoquín 9	Adoquín 10
Largo (cm)	20,1	19,9	20,3	20,0	19,8
Ancho (cm)	9,9	10,2	10,0	9,8	10,1
Alto (cm)	6,2	5,8	6,1	6,0	5,9
Peso (g)	2290	2215	2265	2240	2230
Densidad (g/cm³)	1,86	1,88	1,83	1,90	1,89
Resistencia a la Flexión (MPa)	0,97	1,05	1,19	1,09	1,12
PROMEDIO (MPa)	1,084				

Fuente: Elaboración propia.

Además se pesaron las muestras con el fin de hallar su densidad y así poder tener control de la cantidad de material y emulsión usada en el adoquín obteniendo un rango aceptable de variación.

9.9 Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines

Los adoquines fabricados fueron sometidos a diversos ensayos para evaluar su comportamiento físico y mecánico, incluyendo:

- **Ensayo de permeabilidad**, ejecutado para verificar la capacidad del adoquín de permitir el paso del agua, siguiendo las especificaciones técnicas del INVIAS se realiza tomando el tiempo que tarda en transmitir un volumen determinado de agua por el adoquín .



Fotografía 8. Ensayo de permeabilidad
Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultados de Ensayo de permeabilidad

Ejecución ensayo permeabilidad		
Tiempo (min)	Tiempo (s)	Volumen infiltrado (cm ³)
1	60	49
2	120	98
4	240	197
6	360	295
8	480	393
9.063	544	445
CAUDAL DE INFILTRACIÓN (cm³/seg)		0,818
Largo (cm)		20,1
Ancho (cm)		9,9
Alto (cm)		6,2
PERMEABILIDAD RELATIVA (cm³/seg)		0,403

Fuente: Elaboración propia.

- **Absorción de Agua a temperatura ambiente máxima**, con el fin de cuantificar la cantidad de agua que puede absorber el adoquín, evaluando así su resistencia frente al desgaste y su durabilidad, al realizar los cálculos pertinentes obtuvimos los siguientes datos:





Fotografía 9. Ensayo Absorción de Agua
Fuente: Elaboración propia.

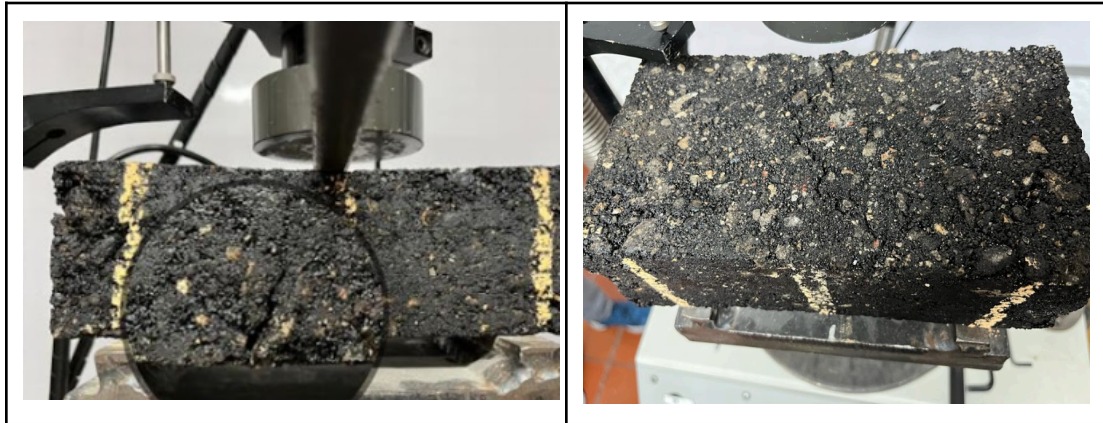
Tabla 7. Absorción de Agua

NTC 2017: Adoquines de concreto – Método de ensayo para absorción de agua y densidad.	
PESO INICIAL (g)	1980
PESO FINAL (g)	2160
ABSORCIÓN (%)	9,09%

Fuente: Elaboración propia.

- **Ensayos de resistencia mecánica**, los cuales incluyeron pruebas de **Resistencia a la compresión** y **Módulo de rotura mínimo**, para comprobar la capacidad estructural del adoquín frente a cargas aplicadas en condiciones de tráfico liviano.





Fotografía 10. Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Resultados de Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

NTC 4321: Determinación de la resistencia a la flexión del concreto por carga en el tercio del claro					
Parámetro	Adoquín 6	Adoquín 7	Adoquín 8	Adoquín 9	Adoquín 10
Largo (cm)	20.1	19.9	20.3	20.0	19.8
Ancho (cm)	9.9	10.2	10.0	9.8	10.1
Alto (cm)	6.2	5.8	6.1	6.0	5.9
Peso (g)	2290	2215	2265	2240	2230
Resistencia a la Flexión (MPa)	0.97	1.05	1.19	1.09	1.12
PROMEDIO (MPa)	1.084				

Fuente: Elaboración propia.





Fotografía 11. Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados Resistencia a la compresión y Módulo de rotura mínimo

NTC 673: Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión del concreto (cilindros y cubos)					
Parámetro	Adoquín 1	Adoquín 2	Adoquín 3	Adoquín 4	Adoquín 5
Largo (cm)	20.1	20.2	19.8	20.1	19.9
Ancho (cm)	10.0	10.1	9.9	10.2	9.8
Alto (cm)	6.0	6.1	5.9	6.2	5.8
Peso (g)	2250	2280	2225	2300	2200
Densidad (g/cm³)	1,86	1,88	1,83	1,90	1,89
Resistencia a la Compresión (MPa)	9.8	11.9	11.5	10.5	10.7
PROMEDIO (MPa)	10.88				

Fuente: Elaboración propia.

10. Conclusiones

10.1 Contenido de asfalto residual y granulometría adecuada

El análisis del material RAP utilizado arrojó un contenido de asfalto del 4.11%, valor que indica una presencia significativa de ligante que puede ser aprovechada en mezclas en frío. La granulometría del RAP se encontró dentro de los parámetros de heterogeneidad establecidos por la ET-450 del IDU, lo cual garantiza una adecuada distribución de tamaños de partículas y contribuye a la estabilidad de la mezcla.

10.2 Dosificación óptima de emulsión y comportamiento mecánico inicial aceptable

Mediante la elaboración de briquetas, se determinó que el porcentaje óptimo de emulsión asfáltica es del 9%, obteniéndose una estabilidad media de 1.22 kN. Aunque este valor es inferior a los obtenidos en mezclas convencionales en caliente, resulta aceptable para aplicaciones no estructurales o de tráfico liviano, sobre todo teniendo en cuenta que se trata de una mezcla reciclada en frío.

10.3 Buena compactación y ventajas del método utilizado

El valor promedio de gravedad específica bulk fue de 19.18 kN/m³, lo cual indica una densidad adecuada para garantizar una buena compactación. Esta compactación se logró mediante el método de amasado con prensa hidráulica, técnica que, además de ser práctica, permite una mejor distribución del ligante y mayor adherencia entre partículas, favoreciendo el desempeño mecánico del adoquín.

10.4 Desempeño hidráulico superior al de materiales convencionales

En cuanto a la permeabilidad, el adoquín mostró un valor de $0.403 \text{ cm}^3/\text{seg}$, lo que representa una excelente capacidad de drenaje si se compara con adoquines tradicionales de concreto o arcilla, que tienden a ser prácticamente impermeables. Este resultado lo convierte en una alternativa ideal para zonas con requerimientos de manejo de aguas lluvias o pavimentos permeables.

10.5 Absorción mayor, pero aceptable

La absorción medida fue de 9.09%, superior a la de los adoquines de concreto (usualmente <6%) y arcilla (entre 6-10%). Si bien este valor es alto, se encuentra dentro del límite superior aceptado para adoquines de arcilla, lo cual sugiere que el adoquín de RAP puede tener una vida útil adecuada si se le da un buen tratamiento superficial o se protege en zonas no expuestas a ciclos de humedad extremos.

10.6 Comportamiento estructural aceptable para aplicaciones específicas

El adoquín presentó una resistencia a la compresión de 10.88 MPa, lo que representa un 31.09% del valor mínimo exigido por la norma para instalaciones en tráfico peatonal o liviano (mínimo 35 MPa). Sin embargo, se identificó que el modo de falla fue por aplastamiento, lo que indica que al estar confinado y correctamente instalado, puede alcanzar resistencias superiores debido al efecto de confinamiento. Por otro lado, la resistencia a la flexión de 1.084 MPa muestra un comportamiento resistente adecuado para soportar esfuerzos menores en pavimentos peatonales.

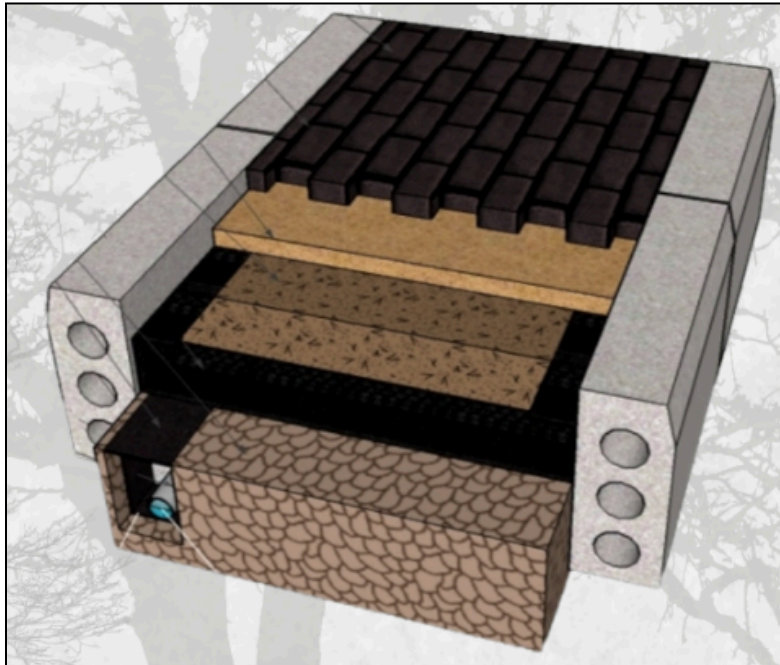
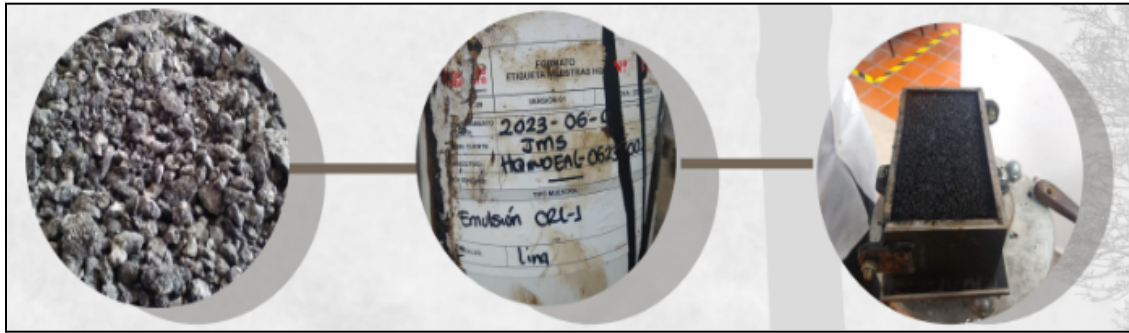


Figura 5. Adoquín confinado y correctamente instalado
Fuente: Elaboración propia.

10.7 Impacto ambiental y costo-beneficio muy favorables

El uso de RAP y emulsiones en frío contribuye significativamente a la reducción del impacto ambiental, al evitar el uso de materiales vírgenes y el consumo energético de mezclas calientes. Además, el costo de producción por unidad de adoquín reciclado es considerablemente menor que el de un adoquín convencional, lo que lo convierte en una alternativa económica y sostenible para pavimentos urbanos secundarios, parques, senderos o zonas peatonales.



Fotografía 12. Impacto ambiental
 Fuente: Elaboración propia.

10.8 Análisis Costo-Beneficio Estimado

Tabla 10. APU – Precio Adoquín en RAP

Ítem	Unidad	Cantidad	Valor Unitario (COP)	Subtotal (COP)
RAP reciclado (incluye fresado)	kg	2.4	\$150	\$360
Emulsión asfáltica CRS	kg	0.22	\$2,800	\$616
Agua y aditivos menores	kg	0.1	\$500	\$50
Mano de obra (amasado y moldeado)	unidad	1	\$800	\$800
Energía y depreciación prensa	unidad	1	\$300	\$300
Total estimado por adoquín RAP				\$2,126

Fuente: Elaboración propia.

El uso de adoquines fabricados con RAP y emulsión asfáltica en frío representa una solución técnica, económica y ambientalmente viable, especialmente para zonas de tráfico liviano. Si bien algunos parámetros como la absorción o la resistencia no alcanzan los niveles de materiales tradicionales, su desempeño hidráulico, costo reducido, y menor huella ambiental justifican su implementación en proyectos de infraestructura sostenible.



Figura 6. Representación de la etapa final en la instalación del adoquín
Fuente: Elaboración propia.

11. Anexos

Anexo 1. Informe de laboratorio

Anexo 2. Certificado de ponencias

12. Referencias bibliográficas

- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). *Norma INV E-733-13: Determinación de la gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). *Norma INV E-722-13: Método de ensayo para la estabilidad y flujo Marshall de mezclas asfálticas en caliente y en frío*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). *Norma INV E-728-13: Granulometría de agregados*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). *Norma INV E-736-13: Extracción de asfalto en mezclas asfálticas*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías – INVIAS. (2013). *Especificaciones generales de construcción de carreteras (EG-2013)*. Bogotá, Colombia.
- Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. (2020). *Manual de diseño geométrico y estructural para espacio público urbano*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2009). *NTC 2017: Materiales para pavimentos. Adoquines de concreto. Requisitos y métodos de ensayo*. Bogotá, Colombia.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2006). *NTC 4321: Concretos. Determinación de la absorción, densidad y porosidad aparente*. Bogotá, Colombia.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2017). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. Washington, D.C., USA.

- Asphalt Institute. (2007). *MS-2: Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot-Mix Types*. Lexington, KY: Asphalt Institute.
- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M. A., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement – A literature review. *Illinois Center for Transportation Research Report*.
- Pérez, M., & Gutiérrez, F. (2021). Evaluación del uso de RAP y emulsión asfáltica en mezclas en frío para pavimentos urbanos. *Revista Ingeniería e Investigación*, 41(2), 118-125.
- Fonseca, L. J., & Rojas, D. A. (2020). Diseño y evaluación de adoquines ecológicos con adición de PET reciclado. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(1), 33–42.
- Rodríguez, A. M., & Mendoza, C. A. (2018). Aplicación de mezclas en frío con emulsión asfáltica modificada para rehabilitación de vías urbanas. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 41(3), 120-129.
- Silva, R., Oliveira, J. R. M., & Jesus, C. M. G. (2014). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 123–131.