



**Evaluación del Uso de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) como Agregado Fino en
la Fabricación de Adoquines Peatonales de Concreto sin Bisel.**

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

Anderson Miguel Farfán Umbarila

Yuber Stiven Torres Marbello

Ingeniería Civil

Universidad la Gran Colombia

Bogotá D.C

2025

Tabla de Contenido

1. RESUMEN	7
2. ABSTRACT	9
3. INTRODUCCIÓN.....	11
4. OBJETIVOS.....	14
4.1 Objetivo general	14
4.2 Objetivos específicos.....	14
5. ANTECEDENTES	16
5.1. Evaluación del Material de Fresado Asfáltico en Mezclas para Pavimentación en Colombia	18
5.2. Aplicación del Material de Fresado Asfáltico en la Estabilización de Suelos Sedimentarios	20
5.3. Incorporación de Polietileno Tereftalato Reciclado en Mezclas Asfálticas para Vías de Bajo Tránsito	25
5.4. Valorización de Residuos de Losas de Concreto del Sistema Transmilenio en la Fabricación de Adoquines	26
5.5. Incorporación de Agentes Rejuvenecedores en Mezclas Asfálticas con Alto Contenido de Material de Fresado	27
5.6. Innovaciones en Pavimentos de Concreto: Metodología de Losas Cortas.....	29

METODOLOGÍA.....	30
6.1. Fase 1. Recolección y Caracterización de Materiales	30
6.1.1. Obtención del Residuos de Fresado de Asfalto (RAP)	31
6.2. Fase 2. Diseño Experimental y Dosificaciones	32
6.2.1. Diseño de la Mezcla Patrón	32
6.2.2. Porcentajes de Sustitución	32
6.2.3. Fabricación de Probetas y Adoquines	33
6.3. Fase 3. Ensayos de Laboratorio y Control de Calidad	33
6.3.1. Control Final de la Granulometría de la Mezcla y Diseño del Molde.....	33
6.3.2. Compactación y Moldeo de Adoquines	34
6.3.3. Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines	34
7. ANALISIS DE RESULTADOS.....	36
7.1. Caracterización del Material Obtenido (RAP)	36
7.2. Resistencia a la Compresión de Adoquines (Promedio)	40
7.3. Diseño de mezclas	43
7.4. Ensayos de los cubos prueba para el diseño	44
7.5. Análisis de la Granulometría del RAP	45
7.6. Fabricación de adoquines sin bisel	48
7.7. Ensayos de laboratorio	50

7.7.1. Prueba 7 días.....	51
7.7.2. Prueba 28 días.....	58
7.8. Análisis comparativo	62
7.9. Evaluación ambiental y económica	63
8. CONCLUSIONES.....	65
8.1. Contenido de Asfalto Residual y Granulometría Adecuada.....	65
8.2. Buena Compactación y Ventajas del Método Utilizado.....	65
8.3. Desempeño Mecánico y Cumplimiento Normativo	65
8.4. Absorción y Durabilidad	66
8.5. Impacto Ambiental y Costo-Beneficio	66
8.6. Análisis Costo-Beneficio Estimado.....	67
REFERENCIAS	68

Lista de Tablas

Tabla 1. Caracterización de Materiales	32
Tabla 2. Porcentajes de Sustitución.....	33
Tabla 3. Caracterización de material	39
Tabla 4. Masas unitarias de los agregados	41
Tabla 5. Ensayos prueba de diseño.....	44
Tabla 6. Granulometría del RAP	46
Tabla 7. Absorción de Agua a los 7 Días	53
Tabla 8. Resistencia al Desgaste Superficial.....	55
Tabla 9. Resistencia a la Flexión	57
Tabla 10. Resistencia al Desgaste Superficial a los 28 Días	59
Tabla 11. Absorción por infiltración a los 28 Días	61

Lista de Figuras y Fotografías

Figura 1. Grafica granulometría del RAP.....	47
Figura 2. Resistencia a la compresión (NTC 673).....	52
Figura 3. Grafica Absorción de agua a los 7 Días	54
Figura 4. Grafica Resistencia a la compresión	55
Figura 5. Grafica Ensayo flexión.....	57
Figura 6. Grafica Ensayo compresión	59
Figura 7. Grafica Absorción por infiltración	61

Fotografías 1. Recolección de RAP.....	37
Fotografías 2. Caracterización de material obtenido.....	38
Fotografías 3. Fabricación de cubos de prueba para llegar al diseño de mezcla.....	43
Fotografías 4. Ensayos de los cubos prueba para el diseño.....	45
Fotografías 5. Fabricación de molde para adoquines con medidas según normativa.....	49
Fotografías 6. separación de materiales con los porcentajes adecuados	49
Fotografías 7. Elaboración de adoquines.....	50
Fotografías 8. Medición, clasificación y puesta en curado de los adoquines.....	50
Fotografías 9. Resistencia a la compresión	52
Fotografías 10. Absorción de agua	54
Fotografías 11. Resistencia al desgaste superficial	56
Fotografías 12. Resistencia a la Flexión.....	58
Fotografías 13. Resistencia a la Compresión	60
Fotografías 14. Absorción por infiltración a los 28 Días	62

1. RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó la viabilidad técnica, ambiental y económica de utilizar Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) en su fracción fina (pasante del tamiz N.º4) como sustituto parcial del agregado fino natural en la fabricación de adoquines peatonales de concreto sin bisel. La metodología experimental incluyó la caracterización del RAP, el diseño de mezclas con porcentajes de sustitución del 0% al 20%, y la posterior evaluación del desempeño a 7 y 28 días mediante ensayos de resistencia a la compresión, flexión, absorción de agua y desgaste superficial.

Los resultados a 28 días demostraron que la Resistencia a la Compresión de todas las mezclas (máx. 12.87 MPa para el 20% RAP) no cumplió con el requisito mínimo de 20 MPa de la NTC para adoquines peatonales, señalando un defecto en la dosificación base del concreto (relación agua/cemento 0.6). Sin embargo, la mezcla con 20% de RAP exhibió el mejor comportamiento mecánico, registrando las resistencias máximas a compresión y flexión (2.6 MPa), e incluso superando al adoquín patrón. Este hallazgo confirmó que un alto contenido de RAP favorece el empaquetamiento y las propiedades de resistencia a la tracción en la matriz de concreto.

En términos de durabilidad, el curado a 28 días permitió que todas las mezclas cumplieran satisfactoriamente con el requisito de 8% de Absorción de Agua máximo, con la muestra de 20% RAP alcanzando un 7.5%. Esta es una conclusión clave, ya que valida la durabilidad frente a la humedad a pesar del aumento de porosidad generado por el RAP. Por otro lado, la Resistencia al Desgaste superficial disminuyó con el aumento del RAP (pérdida máx. de 1.8 para el 20% RAP), lo cual indicó que la matriz superficial se hizo más

vulnerable a la abrasión.

El proyecto confirmó el alto impacto ambiental y la viabilidad económica del uso del RAP. La sustitución parcial fomenta la Economía Circular al desviar el material de los rellenos sanitarios y reducir la demanda de agregados vírgenes. Económicamente, el uso de RAP (con costo de adquisición casi nulo) ofrece un ahorro significativo en el costo de la materia prima. La mezcla de 20% de RAP se estableció como la más eficiente para el reemplazo, aunque se requiere una optimización de la dosificación de cemento para alcanzar la resistencia normativa, siendo este el único factor que afectaría el costo-beneficio final.

Palabras Clave: Residuos de Fresado de Asfalto (RAP), Adoquines de Concreto, Agregados Reciclados, Economía Circular.

2. ABSTRACT

This research evaluated the technical, environmental, and economic feasibility of using Asphalt Milling Waste (AMW) in its fine fraction (passing through a No. 4 sieve) as a partial substitute for natural fine aggregate in the production of concrete curb less sidewalk pavers. The experimental methodology included the characterization of the RAP, the design of mixtures with replacement percentages of 0% to 20%, and the subsequent evaluation of performance at 7 and 28 days through compression, bending, water absorption, and surface wear resistance tests.

The 28-day results showed that the Compressive Strength of all the mixtures (max. 12.87 MPa for the 20% RAP) did not meet the minimum requirement of 20 MPa of the NTC for pedestrian pavers, indicating a defect in the base concrete dosage (water/cement ratio 0.6). However, the mixture with 20% RAP exhibited the best mechanical performance, recording the maximum compressive and flexural strengths (2.6 MPa), and even outperforming the standard paver block. This finding confirmed that a high RAP content promotes the packing and tensile strength properties in the concrete matrix.

In terms of durability, curing at 28 days allowed all the mixes to satisfactorily meet the requirement of a maximum 8% water absorption, with the 20% RAP sample reaching 7.5%. This is a key conclusion, as it validates the durability against moisture despite the increase in porosity generated by RAP. On the other hand, the surface wear resistance decreased with the increase in RAP (maximum loss of 1.8 for 20% RAP), which indicated that the surface matrix became more vulnerable to abrasion.

The project confirmed the significant environmental impact and economic viability of using RAP. Partial substitution promotes the Circular Economy by diverting material from landfills and reducing the demand for virgin aggregates. Economically, the use of RAP (with almost zero acquisition cost) offers significant savings in raw material costs. The mixture of 20% RAP was established as the most efficient for replacement, although cement dosage optimization is required to achieve the standard strength, which is the only factor that would affect the final cost-benefit.

Keywords: Asphalt Milling Waste (RAP), Concrete Pavers, Recycled Aggregates, Circular Economy.

3. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de crecimiento urbano y de las crecientes demandas de infraestructura en Colombia, la ingeniería civil enfrenta el reto de diseñar y aplicar soluciones constructivas que respondan simultáneamente a las necesidades de funcionalidad y a los principios de sostenibilidad ambiental. En particular, las actividades de conservación y rehabilitación vial constituyen una fuente significativa de generación de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP, por sus siglas en inglés), los cuales, pese a su alto potencial de reutilización, en muchos casos son dispuestos en rellenos sanitarios. Este manejo inadecuado no solo incrementa la saturación de dichos espacios, sino que además contribuye a la degradación ambiental.

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2020), los residuos provenientes de obras civiles y mantenimiento vial representan más del 20% en volumen de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) registrados anualmente en el país, lo cual refleja la magnitud del problema.

En paralelo, el aumento de la densidad poblacional en las ciudades colombianas ha impulsado la construcción de espacios peatonales como estrategia de movilidad urbana sostenible. Sin embargo, la producción de elementos prefabricados en concreto, tales como los adoquines, depende en gran medida de la explotación de agregados pétreos naturales, una actividad que genera un fuerte impacto sobre los ecosistemas, produce pasivos ambientales de carácter irreversible y compromete la disponibilidad futura de estos recursos. Esta situación configura una problemática doble: por un lado, la disposición inadecuada del RAP y, por otro, la sobreexplotación de los recursos naturales necesarios

para la fabricación de nuevos materiales de construcción.

Frente a este panorama, resulta imperativo avanzar en estrategias que promuevan la economía circular en el sector de la construcción, priorizando el aprovechamiento de materiales reciclados en sustitución de recursos vírgenes, sin comprometer la calidad, la seguridad ni la durabilidad de las soluciones implementadas. Bajo esta perspectiva, el presente proyecto de grado se orienta al análisis del RAP como material sustituto del agregado fino en la fabricación de adoquines de concreto sin bisel, específicamente destinados a zonas de tránsito peatonal.

Cabe resaltar que este trabajo se apoya en la experiencia directa adquirida por los estudiantes investigadores durante su participación en un frente de obra de parcheo del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en la localidad de Bosa, Bogotá. Dicho frente, actualmente en ejecución, permitió a los estudiantes observar de primera mano el proceso constructivo de rehabilitación vial y, en particular, la generación del RAP bajo condiciones reales de obra. Esta vivencia en campo no solo enriqueció el proceso investigativo con insumos empíricos representativos, sino que también proporcionó un mayor grado de pertinencia y aplicabilidad al proyecto, garantizando que el material estudiado refleje con fidelidad la realidad de los residuos generados en las intervenciones de infraestructura vial en la ciudad.

El estudio se desarrolló a partir de la fabricación de adoquines empleando una mezcla diseñada con una relación 1:2.75, sobre la cual se incorporaron reemplazos parciales del agregado fino con RAP en proporciones de 0%, 5%, 10% y 20%. El objetivo central fue evaluar la viabilidad técnica del RAP como insumo en la producción de

adoquines, determinando su comportamiento frente a los parámetros de resistencia mecánica, durabilidad, desempeño estético y funcionalidad establecidos en la normativa nacional vigente (ICONTEC, 2001; ICONTEC, 2006). De esta manera, la investigación busca generar evidencia que respalde el desarrollo de soluciones constructivas sostenibles, demostrando que la reutilización del RAP reduce la presión sobre los recursos naturales y constituye una alternativa viable para la elaboración de elementos ecoeficientes, contribuyendo al fortalecimiento de la agenda de sostenibilidad en el sector de la construcción en Colombia.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento mecánico y la viabilidad técnica del uso de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) como sustituto parcial del agregado fino natural, específicamente del material que pasa por el tamiz N.º4, en la fabricación de adoquines de concreto sin bisel para tránsito peatonal.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el material de RAP obtenido del frente de obra en la troncal NQS Sur, localidad de Bosa, enfocándose en las propiedades físicas y granulométricas del material que pasa por el tamiz N.º4, con el fin de determinar su aptitud como sustituto parcial del agregado fino en la fabricación de adoquines de concreto sin bisel.
- Diseñar y elaborar mezclas de concreto para adoquines empleando la relación 1:2.75, incorporando el RAP que pasa por el tamiz N.º4 en porcentajes de 0%, 5%, 10% y 20% como reemplazo parcial del agregado fino natural.
- Evaluar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los adoquines fabricados con RAP —incluyendo resistencia a la compresión, absorción de agua y abrasión— y comparar los resultados con los requisitos establecidos en las normas ICONTEC (2001 y 2006) para adoquines de concreto.
- Analizar las implicaciones ambientales y económicas derivadas de la sustitución parcial del agregado fino natural por RAP que pasa por el tamiz N.º4 en la producción de adoquines, considerando su disponibilidad local en la localidad de

Bosa y su contribución a prácticas sostenibles y a la economía circular.

5. ANTECEDENTES

La creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental en la construcción ha impulsado la búsqueda de alternativas para mitigar el impacto de la extracción de recursos naturales y la gestión de residuos. En este contexto, la reutilización del Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) ha emergido como una estrategia clave dentro de la economía circular, ofreciendo una solución para los volúmenes significativos de material que se generan en las actividades de rehabilitación vial, especialmente en grandes centros urbanos como Bogotá.

A nivel global, la investigación sobre el RAP se ha centrado históricamente en su incorporación en mezclas asfálticas, demostrando su viabilidad técnica y económica para reducir el consumo de agregados vírgenes y ligantes bituminosos. Sin embargo, en años recientes, el interés se ha expandido hacia la aplicación del RAP en elementos prefabricados de concreto no estructurales, como adoquines. Estos estudios han comenzado a revelar las ventajas técnicas y económicas de integrar el RAP, resaltando que su recubrimiento parcial de ligante asfáltico le confiere propiedades físicas interesantes para su uso en mezclas de concreto.

En Colombia, el aprovechamiento del RAP está respaldado por políticas públicas y por estudios técnicos nacionales. Entidades como el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022) han emitido lineamientos para su uso, y la Universidad Nacional de Colombia (2019), junto con el Ministerio de Transporte (2020), han realizado investigaciones que confirman el potencial del RAP para ofrecer desempeños comparables a los agregados convencionales bajo dosificaciones controladas, estos estudios han servido de base para establecer rangos de reemplazo del agregado fino por RAP, como el 15%, 30% y 50%, que

permiten evaluar la evolución del desempeño del concreto sin comprometer su integridad estructural.

La relevancia de esta investigación radica en su enfoque específico en la fabricación de adoquines sin bisel para entornos urbanos con alta densidad de tráfico peatonal, como andenes y ciclorrutas. La simplicidad del moldeo de estos adoquines y la reducción de costos de producción potencian la viabilidad de incorporar material reciclado. Un aspecto distintivo de este estudio es que el RAP será obtenido directamente de un frente de obra en la localidad de Bosa, más específicamente de la troncal NQS Sur, donde se ha evidenciado la presencia de asfalto modificado. Esta procedencia del material, facilitada por la colaboración con el Consorcio Construvial Bog (quienes ejecutan intervenciones urbanas con el IDU), asegura que la investigación se base en un material con características reales y relevantes para el contexto actual de la ingeniería urbana colombiana.

5.1. Evaluación del Material de Fresado Asfáltico en Mezclas para Pavimentación en Colombia

El presente apartado se fundamenta en la investigación desarrollada por Yung-Vargas y colaboradores durante el año 2022, cuyo propósito central consistió en caracterizar el comportamiento del material proveniente de fresado asfáltico recolectado en cuatro ciudades colombianas. Los investigadores, vinculados a instituciones académicas ubicadas en San José de Cúcuta, Bogotá y Medellín, orientaron su trabajo hacia la comprensión de las propiedades físicas y químicas de estos residuos con miras a su potencial reutilización en nuevas mezclas para pavimentación.

Objeto de estudio y metodología

La investigación se concentró en el análisis de los Residuos de Fresado de Asfalto, comúnmente conocidos por sus siglas en inglés RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). El equipo investigador recolectó muestras representativas de cuatro ciudades colombianas, sometiendo este material a ensayos específicos para determinar dos parámetros fundamentales: la distribución del tamaño de las partículas (granulometría) y la proporción de ligante asfáltico presente en el material recuperado.

Para establecer un marco de referencia técnico, los resultados granulométricos se contrastaron con las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) para mezclas asfálticas tipo MDC-19, normativa que regula las características técnicas de los materiales utilizados en la construcción de pavimentos en el territorio nacional.

Principales hallazgos

Los resultados obtenidos a través del análisis estadístico de varianza (ANOVA) revelaron aspectos significativos respecto a la naturaleza del material estudiado:

Variabilidad composicional del material

El análisis estadístico evidenció diferencias considerables tanto en el tamaño promedio de las partículas minerales como en la cantidad de ligante asfáltico presente en las muestras procedentes de las cuatro ciudades evaluadas. Esta variabilidad pone de manifiesto la naturaleza heterogénea del material de fresado, característica que debe considerarse cuidadosamente en cualquier proceso de diseño que contemple su incorporación.

Proporción de ligante asfáltico

Las determinaciones realizadas establecieron que el contenido promedio de cemento asfáltico en las muestras analizadas alcanzó un valor del 4.6%, registrándose fluctuaciones entre el 4.0% y el 5.0%. Esta variación en el porcentaje de ligante contribuye a la heterogeneidad general observada en el material y representa un factor determinante para el diseño de nuevas formulaciones.

Caracterización granulométrica

El análisis del tamaño de las partículas reveló comportamientos diferenciados según la fracción evaluada. Para las partículas de mayor tamaño, específicamente aquellas retenidas entre los tamices de 3/4" hasta el número 10, la distribución promedio del material procedente de las cuatro ciudades se ubicó dentro de los límites establecidos por la normativa INVÍAS para mezclas MDC-19.

No obstante, se identificó un comportamiento particular en las fracciones más finas del

material. Aquellas partículas que atraviesan desde el tamiz número 10 hasta el tamiz número 200 presentaron una tendencia a exceder el límite superior especificado en la banda granulométrica de referencia. Este fenómeno se atribuye al proceso mecánico de fresado, durante el cual las fuerzas de disgregación generan una mayor cantidad de partículas de dimensiones reducidas por fragmentación del material original.

Implicaciones para el diseño de mezclas

La investigación subraya que tanto la variabilidad en la composición granulométrica como las fluctuaciones en el contenido de ligante asfáltico constituyen parámetros de importancia fundamental al momento de formular mezclas asfálticas que incorporen este material reciclado. La caracterización detallada realizada por los investigadores proporciona una base técnica sólida para el desarrollo de metodologías de diseño que contemplen estas variables inherentes al material de fresado, permitiendo así optimizar su aprovechamiento en proyectos de pavimentación vial.

La comprensión de estas características representa un avance significativo hacia la implementación de prácticas sostenibles en la infraestructura vial colombiana, al tiempo que contribuye a la economía circular en el sector de la construcción mediante la valorización de materiales que tradicionalmente eran considerados como desechos.

5.2. Aplicación del Material de Fresado Asfáltico en la Estabilización de Suelos

Sedimentarios

La presente sección se fundamenta en la investigación desarrollada por Lima, Arrieta-Baldovino e Izzo durante el año 2023, trabajo que explora las posibilidades técnicas de

incorporación del material de fresado asfáltico como agente estabilizador de suelos de baja capacidad portante. El estudio representa una contribución significativa al conocimiento sobre alternativas sostenibles para el mejoramiento de suelos en proyectos de infraestructura vial.

Contexto geotécnico y diseño experimental

Los investigadores seleccionaron como material de estudio un suelo sedimentario perteneciente a la Formación Guabiro tuba, unidad geológica característica de la región sur de Brasil. La metodología experimental contempló la preparación de mezclas con proporciones variables de material de fresado asfáltico, estableciendo un rango de dosificación desde 0% hasta 80% en peso respecto a la masa total de la mezcla.

El programa experimental se diseñó para evaluar el comportamiento de las mezclas bajo dos escenarios técnicos diferenciados: el primero consideró únicamente la combinación suelo-RAP, mientras que el segundo incorporó cemento Portland de tipo puzolánico como agente cementante adicional. Esta doble aproximación permitió distinguir el aporte individual del material de fresado frente al efecto sinérgico que puede desarrollarse con la adición de conglomerante hidráulico.

Parámetros evaluados y protocolo de ensayo

El programa de caracterización geotécnica se estructuró en torno a tres ejes fundamentales: las propiedades de compactación del material, el desarrollo de resistencia mecánica bajo distintas sollicitaciones, y el comportamiento volumétrico asociado a fenómenos expansivos. Los ensayos de resistencia contemplaron tanto la determinación de la resistencia a la compresión no confinada (q_u) como la resistencia a la tracción indirecta

mediante el ensayo brasileño o de hendimiento (qt), parámetros fundamentales para la evaluación del desempeño estructural del material estabilizado.

Las muestras fueron sometidas a un período de curado de 28 días bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, siguiendo los protocolos normalizados para materiales cementados, lo que permite la comparación directa con investigaciones previas y facilita la eventual extrapolación de resultados a condiciones de campo, resultados del programa experimental

Incremento de la capacidad portante

Los resultados obtenidos evidenciaron un incremento significativo en ambos parámetros de resistencia evaluados. Las mezclas que incorporaron material de fresado asfáltico exhibieron mejoras sustanciales tanto en la resistencia a la compresión simple como en la capacidad de absorción de esfuerzos de tracción, confirmando el potencial del material como agente estabilizador.

Dosificación óptima y umbrales de desempeño

El análisis de los resultados experimentales permitió identificar una dosificación óptima en torno al 60% de material de fresado respecto al peso total de la mezcla. En este punto de dosificación, se registró un incremento de 260 kPa en la resistencia a la compresión no confinada, mientras que la resistencia a la tracción por hendimiento experimentó un aumento de 340 kPa respecto a las mezclas de referencia sin adición de RAP.

Estos valores representan mejoras porcentuales significativas respecto al suelo natural sin estabilizar, alcanzando magnitudes que permiten clasificar el material tratado dentro de categorías superiores de capacidad portante según las normativas geotécnicas aplicables a

capas de pavimento.

Sinergia con agentes cementantes

Las mezclas ternarias, conformadas por suelo natural, material de fresado asfáltico y cemento Portland puzolánico, evidenciaron un comportamiento particularmente favorable tras el período de curado establecido. Los resultados de resistencia y los valores de expansión registrados se ubicaron dentro de los rangos admisibles para materiales de capa base estabilizada, validando técnicamente esta combinación para aplicaciones en infraestructura vial.

El efecto sinérgico observado sugiere que la presencia del ligante asfáltico residual en el material de fresado no interfiere negativamente con los procesos de hidratación del cemento, e incluso podría contribuir a la reducción de la permeabilidad de la matriz estabilizada, aspecto favorable para la durabilidad a largo plazo de la estructura.

Implicaciones para la práctica de la ingeniería geotécnica

La investigación desarrollada por Lima y colaboradores aporta evidencia experimental consistente respecto a la viabilidad técnica de emplear material de fresado asfáltico como agente estabilizador de suelos de fundación o materiales de capa subrasante. Los resultados obtenidos demuestran que, mediante dosificaciones adecuadas, es posible transformar suelos de baja capacidad portante en materiales aptos para conformar capas estructurales de pavimentos, cumpliendo simultáneamente con objetivos de sostenibilidad mediante la valorización de residuos de la industria vial.

Este enfoque de estabilización representa una alternativa de particular interés para proyectos ubicados en regiones donde la disponibilidad de materiales granulares de calidad

es limitada, o donde los costos de transporte de materiales de aporte resultan económicamente prohibitivos. La posibilidad de emplear materiales locales mejorados con residuos de fresado disponibles in situ o en las proximidades del proyecto constituye una estrategia de optimización de recursos que merece consideración en la fase de diseño de proyectos viales.

Perspectivas en el contexto brasileño de reciclaje de pavimentos

De acuerdo con una revisión sistemática de literatura publicada en la revista Soil & Rocks durante el año 2025, la incorporación de material de fresado asfáltico en estructuras de pavimentos flexibles ha experimentado un desarrollo progresivo en el contexto brasileño. Las investigaciones compiladas en dicha revisión documentan aplicaciones exitosas del material tanto en capas de base como en capas de subbase, observándose en general un incremento en el módulo resiliente de las mezclas respecto a materiales granulares convencionales sin tratar.

Los estudios referenciados en la revisión sistemática coinciden en señalar que las mezclas que incorporan material de fresado exhiben una respuesta estructural favorable bajo solicitaciones cíclicas, evidenciando rigidez adecuada para la distribución de cargas de tráfico hacia las capas inferiores del pavimento. No obstante, los autores de la revisión identifican áreas que requieren investigación adicional, particularmente en lo concerniente a la evaluación del desempeño a largo plazo, la cuantificación del impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida, y la elaboración de estudios de viabilidad económica que permitan establecer comparaciones objetivas frente a soluciones convencionales.

Estas líneas de investigación pendientes resultan de particular relevancia para la

consolidación de prácticas de reciclaje en pavimentos, en la medida en que la información sobre durabilidad y costos del ciclo de vida constituye un insumo fundamental para la toma de decisiones por parte de los organismos responsables de la planificación y gestión de infraestructura

5.3. Incorporación de Polietileno Tereftalato Reciclado en Mezclas Asfálticas para Vías de Bajo Tránsito

La investigación desarrollada por Díaz Bardalez durante el año 2022 en la ciudad de Iquitos, Perú, abordó la evaluación técnica de mezclas asfálticas en caliente modificadas mediante la incorporación de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado como sustituto parcial del agregado mineral convencional. El estudio adoptó un enfoque cuasi experimental orientado específicamente al diseño de mezclas para aplicación en vías de bajo volumen de tránsito.

Metodología y programa experimental

El diseño experimental contempló la preparación de mezclas asfálticas con dosificaciones variables de PET reciclado, estableciendo porcentajes de sustitución de 4%, 5%, 6%, 7% y 7.5% respecto al peso total del agregado. Las muestras fueron sometidas a ensayos de caracterización mediante la metodología Marshall, protocolo normalizado para la evaluación de mezclas asfálticas en caliente.

Observaciones relevantes

Los resultados del programa experimental evidenciaron que la dosificación de PET influye significativamente en las características físicas de la mezcla. Las probetas elaboradas con

7.5% de PET presentaron fenómenos de desprendimiento de agregados, sugiriendo la existencia de un umbral técnico en la cantidad de material plástico que puede incorporarse sin comprometer la cohesión de la mezcla. Este comportamiento indica que dosificaciones superiores podrían afectar negativamente la integridad estructural del material, limitando así los porcentajes de sustitución técnicamente viables.

El estudio representa una contribución al conocimiento sobre la valorización de residuos plásticos en infraestructura vial, proponiendo una alternativa de economía circular para la gestión de materiales post-consumo en regiones con necesidades de pavimentación de vías secundarias.

5.4. Valorización de Residuos de Losas de Concreto del Sistema Transmilenio en la Fabricación de Adoquines

El trabajo de grado desarrollado por Calvache Hernández en el año 2024 exploró la viabilidad técnica de fabricar adoquines de concreto empleando como materia prima los residuos generados durante el mantenimiento y renovación de las losas de concreto del sistema de transporte masivo Transmilenio en Bogotá. Esta investigación se enmarca dentro de los principios de economía circular aplicados a la gestión de residuos de construcción y demolición de gran volumen.

Contexto y alcance de la investigación

El sistema Transmilenio genera periódicamente cantidades significativas de residuos de concreto de alta resistencia provenientes del descarte de losas deterioradas o la rehabilitación de carriles exclusivos. Estos materiales, clasificados como Agregado

Reciclado de Concreto (RCA, por sus siglas en inglés), poseen propiedades mecánicas potencialmente aprovechables para la fabricación de nuevos elementos constructivos.

Enfoque metodológico

La investigación se orientó hacia la validación técnica del uso de RCA procedente de losas de Transmilenio para la producción de adoquines que cumplan con las especificaciones normativas aplicables en Colombia. El estudio representa un precedente técnico relevante al demostrar que residuos de infraestructura vial pueden ser reincorporados en la cadena de valor de la construcción, generando nuevos productos con aplicabilidad en proyectos de pavimentación urbana.

Este antecedente resulta de particular interés para el presente trabajo de grado, en la medida en que establece la factibilidad técnica de valorizar materiales residuales provenientes de pavimentos, ya sea en forma de agregado reciclado de concreto o de material de fresado asfáltico, para la fabricación de elementos prefabricados de concreto destinados a aplicaciones en infraestructura vial y urbana.

5.5. Incorporación de Agentes Rejuvenecedores en Mezclas Asfálticas con Alto Contenido de Material de Fresado

La investigación desarrollada por Jiménez Caro en el año 2025 abordó uno de los principales desafíos técnicos asociados al reciclaje de pavimentos asfálticos: la degradación del ligante bituminoso contenido en el material de fresado y su susceptibilidad al daño por humedad cuando se incorpora en altas proporciones. El estudio, desarrollado en Bogotá, evaluó el efecto de agentes rejuvenecedores sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas con porcentajes elevados de RAP.

Programa experimental

El diseño metodológico contempló la preparación de mezclas de control con 0% de RAP y mezclas experimentales con contenidos que oscilaron entre 30% y 60% de material reciclado. Estas mezclas fueron modificadas mediante la adición de agentes rejuvenecedores en diferentes dosificaciones. Las muestras fueron sometidas a protocolos de envejecimiento acelerado tanto a corto como a largo plazo, simulando las condiciones de degradación del ligante durante la vida útil del pavimento.

La caracterización mecánica se realizó mediante ensayos de resistencia a la tracción indirecta (ITS), mientras que la evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad se cuantificó a través del coeficiente TSR (Tensile Strength Ratio), parámetro que relaciona la resistencia de especímenes condicionados con humedad respecto a especímenes secos.

Resultados experimentales

Los datos obtenidos evidenciaron que las mezclas con 60% de RAP alcanzaron valores de resistencia a la tracción comparables o superiores a las mezclas convencionales sin material reciclado. No obstante, el valor de TSR registrado para estas mezclas (0.61) se ubicó por debajo del umbral recomendado, indicando una susceptibilidad elevada al deterioro por acción del agua. Este comportamiento sugiere que, si bien los agentes rejuvenecedores pueden restaurar parcialmente la flexibilidad del ligante envejecido, su capacidad para mejorar la adhesión agregado-ligante en presencia de humedad requiere optimización adicional.

estudio aporta evidencia experimental sobre las limitaciones de durabilidad asociadas a contenidos elevados de RAP, aspecto de particular relevancia al considerar la incorporación

de este material en matrices cementantes para la fabricación de elementos prefabricados de concreto, donde la presencia de ligante bituminoso residual podría influir en los mecanismos de adherencia interfacial.

5.6. Innovaciones en Pavimentos de Concreto: Metodología de Losas Cortas

El texto compilado por Rodríguez Moreno y López-Pérez durante el año 2020 constituye una referencia técnica sobre la aplicación de principios de innovación y sostenibilidad en el diseño de infraestructura vial en Colombia. El documento aborda diversas tecnologías de pavimentación, destacándose particularmente la metodología de losas cortas en pavimentos rígidos como alternativa técnicamente viable para aplicaciones urbanas específicas.

Fundamentos de la tecnología

La metodología de losas cortas representa una optimización del diseño tradicional de pavimentos de concreto, dirigida a reducir los esfuerzos inducidos por gradientes térmicos y restricciones de movimiento mediante la disminución de las dimensiones en planta de las losas. Esta configuración resulta particularmente adecuada para vías urbanas, vías colectoras, áreas de estacionamiento y zonas de tránsito industrial donde las condiciones de carga y las restricciones constructivas difieren de las carreteras interurbanas de alto volumen de tránsito.

Validación experimental

El libro documenta la aplicación de esta tecnología en la Urbanización Sevillana, donde las mediciones deflectométricas realizadas en el centro de las losas arrojaron valores comprendidos entre 0.10 y 0.50 mm. Este rango de deflexiones se corresponde con el

comportamiento estructural esperado para pavimentos rígidos en condiciones satisfactorias de servicio, validando empíricamente el desempeño de la solución tecnológica implementada.

Reconocimiento técnico regional

Los autores señalan que esta metodología cuenta con el respaldo normativo del Ministerio de Obras Públicas de Chile, lo que evidencia su madurez técnica y su aplicabilidad en el contexto latinoamericano. Este antecedente resulta relevante para el presente trabajo de grado al demostrar que soluciones innovadoras en pavimentación pueden ser implementadas exitosamente en el ámbito nacional cuando cuentan con fundamentación técnica adecuada y experiencias documentadas que respalden su desempeño a largo plazo.

METODOLOGÍA

El presente proyecto de investigación se desarrollará bajo un enfoque experimental y cuantitativo, con el fin de evaluar objetivamente el desempeño de los adoquines de concreto que incorporan Residuos de Fresado de Asfalto (RAP). La metodología se estructura en cuatro fases interrelacionadas, asegurando la trazabilidad de los materiales y la validez de los resultados mediante la aplicación rigurosa de normas técnicas colombianas (NTC) e internacionales.

6.1. Fase 1. Recolección y Caracterización de Materiales

Esta fase es importante para garantizar la calidad y la comprensión de las propiedades de los materiales a utilizar en la fabricación de los adoquines. La selección del sitio de recolección también permite conocer la procedencia, edad aproximada del pavimento, tipo

de mezcla original y posibles contaminantes, factores que influyen directamente en el comportamiento del RAP dentro de nuevos procesos de diseño.

6.1.1. Obtención del Residuos de Fresado de Asfalto (RAP)

El material RAP fue recolectado directamente de un frente de obra de rehabilitación y parcheo vial del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) en la localidad de Bosa, Bogotá. La recolección se realizó siguiendo un protocolo de muestreo que asegure una muestra representativa de los residuos generados. Se obtuvo el material de fresado asfáltico (RAP) proveniente de un frente de obra de rehabilitación y parcheo vial ejecutado por el IDU en la localidad de Bosa (Bogotá, D.C.), donde los estudiantes investigadores participaron directamente en las actividades de campo.

Posteriormente, se realizó la caracterización física y mecánica de este residuo de acuerdo con normas ASTM y NTC, incluyendo:

- Análisis granulométrico.
- Determinación de densidad y absorción.
- Ensayo de desgaste Los Ángeles.
- Identificación del ligante residual.
- Contenido de finos.

Este proceso permitirá validar la idoneidad del RAP como agregado fino en la fabricación de adoquines de concreto. Adicionalmente, se realizaron ensayos de laboratorio al RAP, así como a los agregados pétreos (grueso y fino) y al cemento Portland a utilizar, conforme a las siguientes normas.

Tabla 1. Caracterización de Materiales

Material	Ensayo	Norma Aplicable
RAP (Fracción < Tamiz N.º4)	Análisis Granulométrico	INV E-213, ASTM C136
	Densidad y Absorción	NTC 176, NTC 177
	Contenido de Humedad	NTC 237
Agregado Grueso	Desgaste (Los Ángeles)	INV E-220
Agregado Fino	Peso Unitario	NTC 92
Cemento	Resistencia a la Compresión	NTC 220

El enfoque principal se dará a la fracción de RAP que pasa el Tamiz N.º4 (<4.75 mm), ya que esta será la utilizada como sustituto parcial del agregado fino natural.

6.2. Fase 2. Diseño Experimental y Dosificaciones

Esta fase define los parámetros de la mezcla de concreto para los adoquines, siguiendo un diseño factorial para aislar el efecto del RAP.

6.2.1. Diseño de la Mezcla Patrón

Se estableció un diseño de mezcla patrón (0% RAP), utilizando una relación básica de Cemento/Agregados de 1:2.75 y una relación Agua/Cemento (a/c) de 0.6. Este diseño base servirá como grupo de control para la comparación de los resultados.

6.2.2. Porcentajes de Sustitución

El factor de estudio será el porcentaje de sustitución del agregado fino natural (arena) por el RAP (fracción < Tamiz N.º4). Se definirán cuatro mezclas experimentales que serán comparadas con la mezcla patrón, en reemplazo por peso:

Tabla 2. Porcentajes de Sustitución

Mezcla	Porcentaje de Sustitución de Agregado Fino por RAP
M-0 (Patrón)	0% (100% Agregado Fino Natural)
M-5	5%
M-10	10%
M-20	20%

6.2.3. Fabricación de Probetas y Adoquines

Se fabricaron moldes de adoquín con dimensiones de 20 x 10 x 6 cm (sin bisel) y se utilizó un proceso de compactación y vibrado para simular las condiciones de producción industrial. Se fabricó un número suficiente de probetas y adoquines de cada mezcla para los ensayos destructivos en los tiempos de curado de 7 y 28 días.

6.3. Fase 3. Ensayos de Laboratorio y Control de Calidad

Los adoquines curados se someterán a ensayos de propiedades mecánicas y de durabilidad para verificar su cumplimiento con los requisitos de la normativa colombiana para adoquines de tránsito peatonal.

6.3.1. Control Final de la Granulometría de la Mezcla y Diseño del Molde

Antes de la producción en masa de las probetas, se realizará una verificación del Análisis Granulométrico de la mezcla total de agregados (Agregado Grueso, Agregado Fino y RAP). Este control es esencial para asegurar que, a pesar de la incorporación del RAP, la curva granulométrica resultante del total de los agregados se mantenga dentro de los límites

y especificaciones técnicas para un concreto de alta resistencia, garantizando la densidad y trabajabilidad adecuadas. Además, el Diseño y Fabricación del Molde para Adoquines se llevará a cabo utilizando acero de alta resistencia para asegurar que los adoquines prefabricados cumplan estrictamente con las dimensiones de 20 x 10 x 6 cm, sin bisel, tal como lo exige la normativa para elementos de tránsito peatonal.

6.3.2. Compactación y Moldeo de Adoquines

El proceso de fabricación de las probetas de adoquín de las cuatro mezclas diseñadas (M-0, M-5, M-10, M-20) incluirá un procedimiento riguroso de Compactación y Moldeo. Dada la baja relación agua/cemento ($a/c = 0.6$) y el objetivo de lograr una alta resistencia, el método de moldeo requiere una alta energía de compactación mediante vibrado y presión.

La Preparación de Adoquines bajo el Control de Densidad estará influenciada por la necesidad de simular el proceso de producción industrial. Para la dosificación volumétrica de mezclas asfálticas, en el contexto de la compactación, se adoptará un esfuerzo de compactación elevado y constante para todas las mezclas. Este esfuerzo, asegurará que las probetas de concreto obtengan la mínima porosidad y la máxima densidad posible, condiciones críticas para la durabilidad y la resistencia a la compresión.

6.3.3. Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines

Una vez alcanzado el tiempo de curado de 28 días, se procederá a realizar los ensayos de comportamiento mecánico y durabilidad. Estos Ensayos de Caracterización y Comportamiento Mecánico de Adoquines son el núcleo de la Fase III y determinarán la viabilidad técnica del uso del RAP. Se incluyen:

- Resistencia a la Compresión: (NTC 673) Para evaluar la capacidad de carga de los adoquines.
- Absorción de Agua: (NTC 2017) Para medir la porosidad y la resistencia a la saturación.
- Resistencia a la Abrasión: (NTC 2441) Para evaluar el desgaste superficial y la durabilidad a largo plazo.

Los resultados de todas las mezclas con RAP serán comparados con los valores obtenidos por el grupo patrón (M-0) y con los límites de desempeño establecidos por la normativa ICONTEC vigente para adoquines de uso peatonal.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, se relacionan los resultados de acuerdo con la secuencia metodológica, abarcando la caracterización de los materiales, la dosificación de la mezcla y el desempeño mecánico de los adoquines prefabricados.

7.1. Caracterización del Material Obtenido (RAP)

La caracterización inicial del Residuo de Fresado de Asfalto (RAP), recolectado en el frente de obra de Bogotá, confirmó que se trata de un material adecuado para su uso como sustituto de agregado fino. Los ensayos de laboratorio arrojaron los siguientes resultados clave:

- **Peso Específico Máximo:** El valor medido fue de 2.412 g/cm^3 , lo que es un indicador de la densidad máxima teórica del material asfáltico reciclado.
- **Granulometría:** El análisis granulométrico del RAP muestra que la mayor parte del material se encuentra en la fracción fina. La curva indica que el 99.05% del RAP pasa el tamiz de 1", y aproximadamente el 95% pasa el tamiz de 3/8", lo cual es consistente con la intención de usar la fracción que pasa el tamiz N.º4 como agregado fino en la mezcla de concreto.
- **Masa Unitaria:** La densidad de los agregados en estado suelto (masa unitaria) se determinó en un promedio de 1.25 g/cm^3 .

Fotografías 1. Recolección de RAP



El fresado es el material que se obtiene del procedimiento de quitar mecánicamente las capas superficiales deterioradas del pavimento asfáltico por medio de una maquinaria llamada fresadora o perfiladora en frío como se evidencia en la fotografía 1.

La fresa rotativa destruye el asfalto en fragmentos de tamaño controlado, este material, que se denomina RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), sale directamente de obra y representa un recurso idóneo a explotar en los proyectos de infraestructura porque permite su recuperación en mezclas nuevas, en elementos prefabricados como adoquines, y para

obtener beneficios técnicos, económicos y medioambientales.

En este proceso bajo nuestros cargos de inspectores técnicos recolectábamos el fresado en lonas las cuales fueron llevadas a la facultad y dicho material fue con el trabajamos en este proyecto.

Fotografías 2. Caracterización de material obtenido	
2.1 	2.3 
2.4 	2.5 
2.6 	2.7 

Dentro de la caracterización del material obtenida se revisaron las propiedades físicas y mecánicas del Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) utilizado como sustituto del agregado fino. Esta información es crucial, ya que establece la calidad de la materia prima reciclada. El Peso Específico en estado Saturado y Superficialmente Seco (S.S.S.D) es de 2.46. Este valor es significativamente más bajo que el de un agregado pétreo natural típico (que suele superar 2.60), lo cual es característico del RAP debido a la presencia del asfalto residual.

Este ligante residual también explica la relativamente alta Absorción de Agua del 4.46%, un factor crítico que debe compensarse en la dosificación del concreto (relación a/c). Desgaste Los Ángeles (L.A.): El ensayo de desgaste arrojó un valor de 22.8%. Este valor es excelente para un agregado y confirma la alta calidad y dureza del árido original del RAP.

Tabla 3. Caracterización de material

PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (RICE) INVE-E 735-13			
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	
	PESO DEL RECIPIENTE CON LA MUESTRA SECA	g	1485.8
	PESO DEL RECIPIENTE	g	382.3
A	PESO DE LA MUESTRA SECA	g	1103.5
D	MASA DEL PICNOMETRO CON AGUA Tem 25 °C	g	7592.0
E	PESO DEL PICNOMETRO + EL AGUA + MUESTRA	g	8238.0
	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (RICE)	g	2.412

7.2. Resistencia a la Compresión de Adoquines (Promedio)

Como parte del estudio experimental, se revisó la resistencia promedio comparando el grupo patrón con los diseños que incorporan RAP. Los resultados muestran que la incorporación de RAP genera una disminución inicial en la resistencia, pasando de 12.31 MPa (Patrón, 0% RAP) a un punto mínimo de 10.55 MPa con el 10% de sustitución. No obstante, las mezclas demuestran una notable recuperación de la resistencia en las dosificaciones más altas, con la mezcla de 20% de RAP alcanzando un promedio de 12.87 MPa, superando al adoquín patrón.

Esta tendencia sugiere que, si bien el asfalto residual del RAP puede inicialmente interferir con la adherencia de la pasta de cemento (causando la caída inicial), el aumento en la densidad y el mejor empaquetamiento que ofrece el RAP en porcentajes más altos (15% y 20%) compensa el efecto negativo, o bien, el bitumen residual actúa como un agente densificador a altas concentraciones. Es crucial señalar que, a pesar de la tendencia positiva de recuperación, la Resistencia a la Compresión máxima obtenida (12.87 MPa) se encuentra por debajo del requisito mínimo de 20 MPa exigido por la normativa colombiana para adoquines de tránsito peatonal. Esto implica que la dosificación base utilizada (relación a/c de 0.6) requiere una optimización inmediata (como una reducción en la relación a/c o un aumento en el contenido de cemento) para alcanzar el cumplimiento técnico, independientemente de la sustitución con RAP.

Tabla 4. Masas unitarias de los agregados

MASA UNITARIA DE LOS AGREGADOS NORMA INV-E 217-13				
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VOLUMEN SUELTO		
		PRUEBA N° 1	PRUEBA N° 2	PRUEBA N° 3
MOLDE	N°	1	1	1
PESO DEL MOLDE	g	2556.0	2556.0	2556.0
PESO DEL MOLDE + MUEST	g	6074.0	6100.5	6092.5
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	2812.0	2812.0	2812.0
DENSIDAD	g/cm³	1.25	1.26	1.26
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VOLUMEN APISONADO		
		PRUEBA N° 1	PRUEBA N° 2	PRUEBA N° 3
MOLDE	N°	1	1	1
PESO DEL MOLDE	g	2556.0	2556.0	2556.0
PESO DEL MOLDE + MUEST	g	6408.0	6503.0	6452.0
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	2812.0	2812.0	2812.0
DENSIDAD	g/cm³	1.37	1.40	1.39
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VOLUMEN VIBRADO		
		PRUEBA N° 1	PRUEBA N° 2	PRUEBA N° 3
MOLDE	N°	1	1	1
PESO DEL MOLDE	g	2556.0	2556.0	2556.0
PESO DEL MOLDE + MUEST	g	6640.0	6738	6685
VOLUMEN DEL MOLDE	cm ³	2812.0	2812.0	2812.0
DENSIDAD	g/cm³	1.45	1.49	1.47

La tabla 4 presenta los resultados de la masa unitaria, en condición suelta del material producto del fresado asfáltico (RAP), determinado según la norma INV-E 217-13 mediante tres pruebas consecutivas utilizando el mismo molde de 2812 cm³ y un peso constante de 2556 g; los pesos obtenidos del molde con la muestra oscilaron entre 6074 g y

6100,5 g, arrojando densidades entre 1,25 y 1,26 g/cm³, con una variación mínima que demuestra buena repetibilidad del ensayo y homogeneidad del material. correspondiente al volumen apisonado del material RAP muestra los resultados obtenidos al determinar la masa unitaria del agregado bajo compactación manual, utilizando el mismo molde de 2812 cm³ y un peso constante de 2556 g en las tres repeticiones; los valores registrados del peso del molde con la muestra se ubicaron entre 6408 g y 6503 g, lo que resultó en densidades de 1,37, 1,40 y 1,39 g/cm³ respectivamente, evidenciando coherencia entre las pruebas y un comportamiento estable del material frente al proceso de apisonado. Estos resultados reflejan que el RAP presenta una adecuada capacidad de densificación cuando se le aplica energía de compactación correspondiente al volumen vibrado del material RAP presenta los resultados obtenidos al determinar la masa unitaria del agregado bajo acción vibratoria, utilizando el mismo molde de 2812 cm³ y un peso constante de 2556 g en las tres repeticiones; los pesos del molde con la muestra variaron entre 6640 g y 6738 g, generando densidades de 1,45, 1,49 y 1,47 g/cm³, valores que se mantienen consistentes entre sí y reflejan una adecuada respuesta del material frente a la vibración. En conjunto con los resultados obtenidos en condición suelta y apisonada, se evidencia que el RAP incrementa progresivamente su densidad a medida que se aumenta la energía aplicada —desde 1,26 g/cm³ en estado suelto, pasando por valores cercanos a 1,39 g/cm³ en estado apisonado, hasta alcanzar aproximadamente 1,47 g/cm³ bajo vibración— lo cual demuestra que el material posee una buena capacidad de acomodamiento y reducción de vacíos. Este comportamiento es favorable para su incorporación en la fabricación de adoquines peatonales, ya que un mayor favorable para su incorporación en la fabricación de adoquines

peatonales, ya que un mayor grado de densificación contribuye a mejorar la resistencia, estabilidad volumétrica y desempeño final del prefabricado.

7.3. Diseño de mezclas

A partir del material recolectado, se elaboraron distintos morteros de prueba variando los porcentajes de cemento, agua y RAP, reemplazando totalmente la arena por el fresado para evaluar su comportamiento dentro de la mezcla. Para la dosificación se tomó como base la relación 1 : 2.75, donde una parte corresponde al cemento y 2.75 partes al material granular, que en este caso estuvo conformado exclusivamente por RAP. Con estas proporciones se fabricaron cubos de 5×5 cm, los cuales fueron sometidos a ensayos de compresión y a la revisión de la trabajabilidad del mortero fresco. Este procedimiento permitió comparar el desempeño mecánico de cada mezcla y analizar cómo la utilización del fresado, en lugar de arena convencional, influía directamente en los resultados obtenidos, tal como se aprecia en la Fotografías 3.



7.4. Ensayos de los cubos prueba para el diseño

Se elaboraron los diseños de mezcla considerando reemplazos parciales del agregado fino (arena) por el RAP que pasa por el tamiz N.º4, en proporciones de 0%, 5%, 10% y 20% sobre la masa de arena indicada en el diseño base (850 kg/m³). El método de diseño se basará en criterios de resistencia y trabajabilidad.

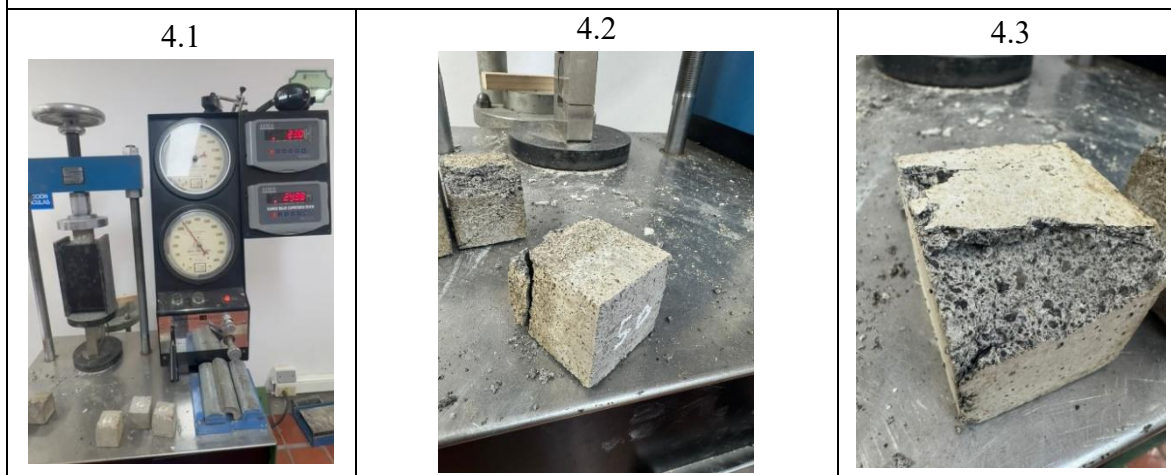
La relación agua/cemento se fijará en 0.6 (240 L/m³ con 400 kg/m³ de cemento), según parámetros técnicos referenciados.

Tabla 5. Ensayos prueba de diseño

MEZCLA	RAP (%)	CEMENTO (KG/M3)	ARENA (KG/M3)	RAP (KG/M3)	AGUA (KG/M3)
M0	0%	400	850	0	240
M5	5%	400	808	43	240
M10	10%	400	765	85	240
M20	20%	400	680	170	240

Dosificación por metro cúbico (kg / m3 y litros /m3)

Fotografías 4. Ensayos de los cubos prueba para el diseño



7.5. Análisis de la Granulometría del RAP

En la siguiente tabla se detalla la distribución de tamaños del RAP por medio del porcentaje retenido y pasante en cada tamiz normalizado. Los resultados clave confirman las características del material fresado: El RAP utilizado presenta un tamaño máximo de aproximadamente 3/4" (19 mm), ya que el 98.6% del material es capaz de pasar este tamiz. Esto indica que el fresado fue eficiente y no contiene grandes fragmentos de losas.

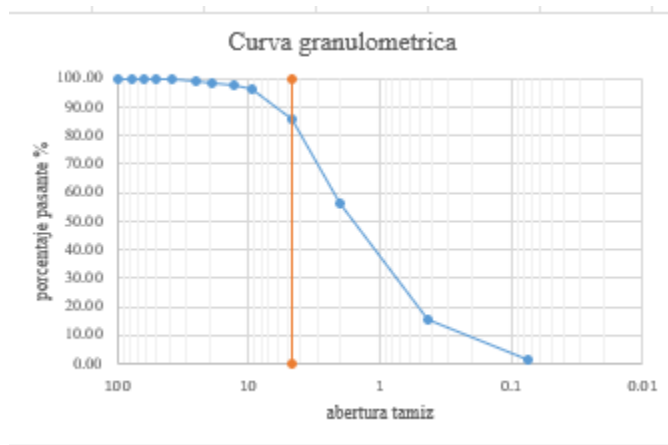
Por otro lado, el valor más crítico para el proyecto es el porcentaje de material que pasa el Tamiz N.º4 (4.75 mm), el cual fue del 86.6%. Esto significa que casi el 87% del RAP es apto para ser clasificado como agregado fino y puede ser utilizado en las mezclas de concreto para adoquines. Además, el material restante (fracción gruesa retenida) es marginal, lo que asegura que la mayor parte del residuo cumple con el objetivo de ser un sustituto del agregado fino.

Tabla 6. Granulometría del RAP

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA					
GRANULOMETRIA RAP					
TAMAÑO MAXIMO:4"		peso retenido gr	Porcentaje Retenido %	Retenido Acumulado %	Porcentaje pasante %
BERTURA DEL TAMI					
(pulg)	(mm)				
4"	100	0	0.00	0	100.00
3"	76.2	0	0.00	0.00	100.00
2 1/2"	63.5	0	0.00	0.00	100.00
2"	50.8	0	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.1	0	0.00	0.00	100.00
1"	25.4	28.35	0.95	0.95	99.05
3/4"	19	13.1	0.44	1.38	98.62
1/2"	12.7	22.25	0.74	2.12	97.88
3/8"	9.53	51.62	1.72	3.84	96.16
No 4	4.75	302.6	10.09	13.93	86.07
No 10	2	889	29.64	43.57	56.43
No 40	0.425	1221	40.70	84.27	15.73
No 200	0.075	428	14.27	98.54	1.46
fondo		43.9	1.46	100.00	0.00
total		2999.82	100.00		

Por otro lado, en la siguiente gráfica indica que el RAP es una mezcla bien gradada con una distribución relativamente uniforme de tamaños, sin saltos abruptos. Esto es beneficioso, ya que una buena gradación del agregado fino contribuye a un mejor empaquetamiento y, por lo tanto, a una menor porosidad y a una mayor densidad en la matriz del concreto, lo cual es esencial para alcanzar la resistencia y la durabilidad necesarias en los adoquines. La ubicación de la curva confirma la disponibilidad de una gran cantidad de material fino reciclado, lo que soporta la viabilidad técnica del proyecto de sustituir el agregado fino natural en las proporciones de 5%, 10% y 20%.

Figura 1. Grafica granulometría del RAP



Descripción técnica de la curva granulométrica del RAP

La curva granulométrica obtenida para el material RAP presenta un comportamiento típico de un agregado discontinuo con tendencia hacia el fraccionamiento fino, lo cual es característico de residuos de fresado asfáltico provenientes de capas deterioradas.

En el tramo correspondiente a los tamices gruesos (entre 1" y 3/8"), se observa que el porcentaje pasante se mantiene cerca del 100 %, lo que indica que la muestra prácticamente no contiene partículas de gran tamaño. A partir del tamiz No. 4 (4,75 mm), el porcentaje pasante inicia un descenso progresivo, evidenciando que el material posee una mayor concentración de partículas medianas y finas.

Entre los tamices No. 4 y No. 30 (4,75 mm – 0,6 mm), la curva presenta la pendiente más pronunciada, pasando aproximadamente del 85 % al 55 % de material pasante. Este comportamiento refleja una transición granulométrica significativa, que confirma la fragmentación típica del RAP debido al proceso de fresado y a la degradación previa del pavimento.

En la fracción fina (tamices No. 50 a No. 200), la curva desciende hasta valores cercanos al 5–10 % de pasante, evidenciando que el contenido de finos es reducido. Esto es favorable para su uso como agregado fino reciclado en la fabricación de adoquines, ya que evita problemas de trabajabilidad o exceso de ligante residual.

En conjunto, la granulometría del RAP se clasifica como un agregado predominantemente fino a medio, con baja presencia de partículas gruesas y una distribución continua. Esta condición permite su incorporación en mezclas de concreto para adoquines, siempre que se controle adecuadamente la fracción fina y se ajusten las dosificaciones para garantizar la cohesión y la resistencia mecánica del producto final.

7.6. Fabricación de adoquines sin bisel

Se fabricaron adoquines prefabricados de 20 x 10 x 6 cm, sin bisel, siguiendo las especificaciones geométricas definidas en la NTC 2017 para elementos destinados a tránsito peatonal. El proceso incluyó:

- Mezclado de los materiales bajo condiciones controladas.
- Moldeo mediante compactación y vibrado.
- Curado en ambiente húmedo hasta alcanzar la edad de ensayo.

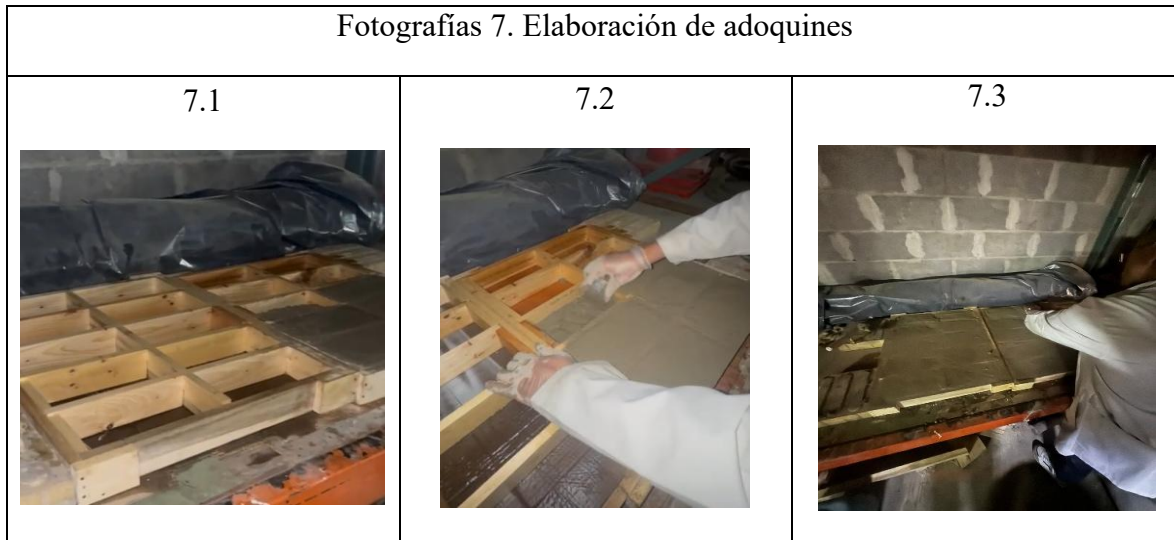
Fotografías 5. Fabricación de molde para adoquines con medidas según normativa



Fotografías 6. separación de materiales con los porcentajes adecuados



Fotografías 7. Elaboración de adoquines



Fotografías 8. Medición, clasificación y puesta en curado de los adoquines



7.7. Ensayos de laboratorio

Con el fin de evaluar el desempeño de las mezclas se aplicaron los siguientes
 ensayos normalizados a los 7 y 28 días:

7.7.1. Prueba 7 días

La Resistencia a la Compresión a los 7 Días de los adoquines evidenció un comportamiento sensible a la sustitución del agregado fino con RAP durante la fase de curado inicial. El análisis de los resultados mostró que, si bien la mezcla patrón (0% RAP) alcanzó aproximadamente 10 MPa, la incorporación de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) provocó una disminución inicial en la resistencia, alcanzando su punto más bajo con el 10% de sustitución (cerca de 8 MPa). Sin embargo, al aumentar la cantidad de material reciclado, el desempeño se recuperó notablemente, e incluso la mezcla con 20% de RAP exhibió la mayor resistencia temprana del estudio, superando ligeramente los 11 MPa. Este patrón sugirió que, en la etapa inicial de curado, las dosis más altas de RAP pudieron haber contribuido a un mejor empaquetamiento de las partículas o a una menor porosidad, facilitando una ganancia de resistencia superior a la del concreto convencional.

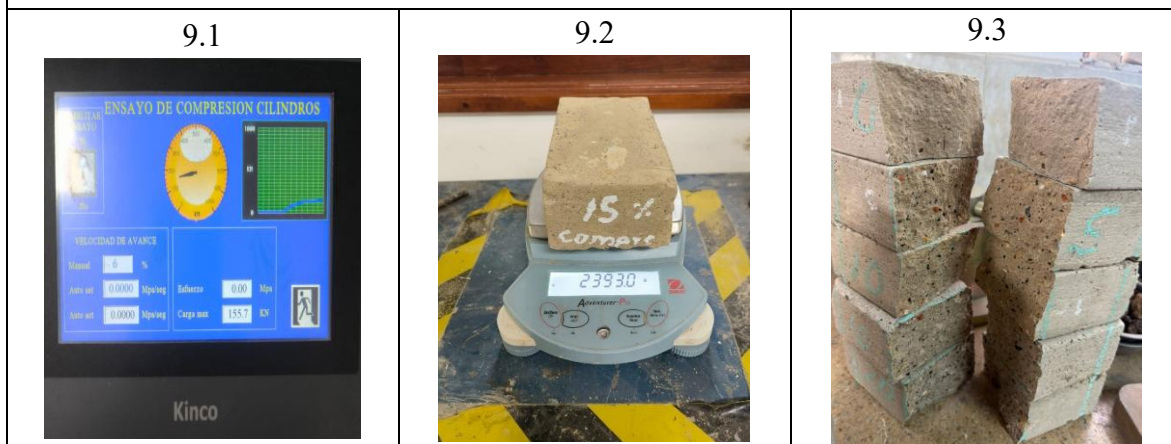
Tabla 7. Caracterización de las mezclas asfálticas

CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO DE CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INVE 760 - 13							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	
LARGO	cm	20.1	20.2	20.3	20.0	20.4	
ANCHO	cm	10.1	10.1	10.2	10.1	10.2	
ESPESOR	cm	6.02	6.20	6.12	6.14	6.18	
VOLUMEN	cm ³	1222.1	1264.9	1267.2	1240.3	1285.9	
MASA DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO	g	2366.1	2400.8	2460	2332	2294.8	
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.94	1.90	1.94	1.88	1.78	
MASA DE LA MUESTRA DESPUES DEL ENSA	g	1750.1	1786.2	1518.4	1518.3	1940.9	
PORCENTAJE DE DESGASTE	%	26.03	25.60	38.28	34.89	15.42	

Figura 2. Resistencia a la compresión (NTC 673).



Fotografías 9. Resistencia a la compresión

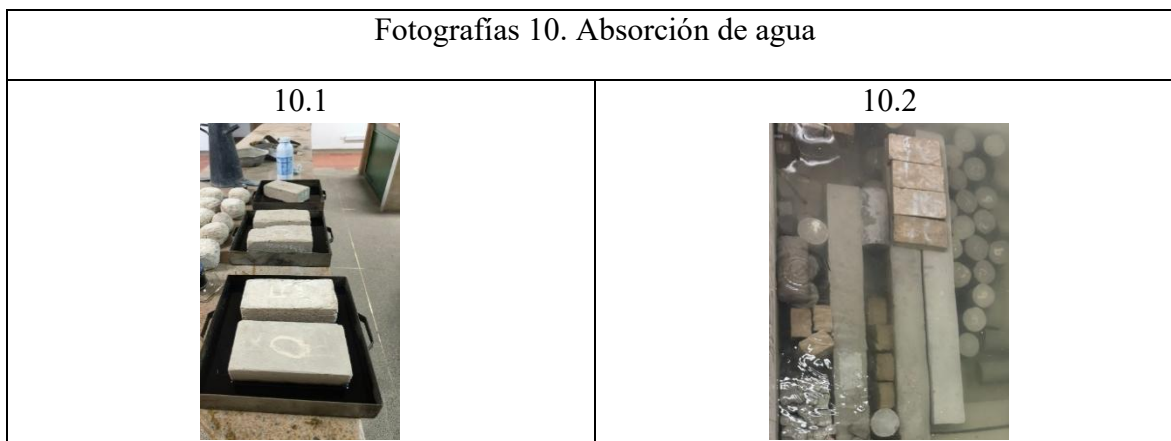
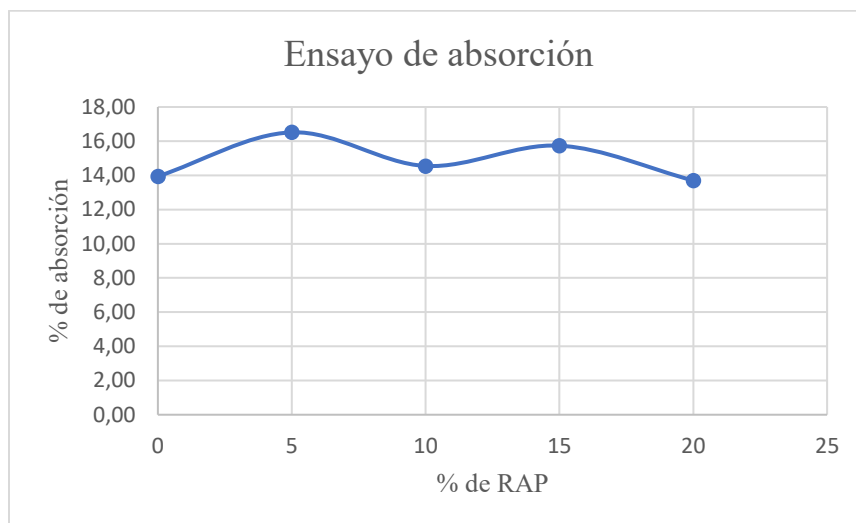


El ensayo de Absorción de Agua a los 7 Días reveló una relación clara y directa entre el contenido de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) y el aumento en la porosidad de los adoquines. La mezcla patrón (0% RAP) registró la menor absorción, con un valor aproximado de 7.0%. Sin embargo, a medida que se incrementó el porcentaje de sustitución del agregado fino por RAP, la absorción aumentó progresivamente, alcanzando su punto máximo con la mezcla de 20% de RAP, que presentó un valor cercano al 8.5%. Este comportamiento sugirió que el material asfáltico residual y la posible mayor absorción intrínseca del RAP incrementaron la interconectividad de vacíos en la matriz de concreto. Adicionalmente, se observó que, a los 7 días de curado, los diseños con 15% y 20% de RAP superaron el límite máximo de absorción promedio del 8% establecido por la NTC 2017 para adoquines peatonales.

Tabla 7. Absorción de Agua a los 7 Días

ABSORCIÓN NTC 4076							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	
LARGO	cm	20.06	20.02	20.03	20.08	20.04	
ANCHO	cm	10.05	10.09	10.1	10.12	10.14	
ESPESOR	cm	6.02	6.01	6.04	6.03	6.08	
VOLUMEN	cm ³	1213.7	1214.0	1221.9	1225.4	1235.5	
MASA SECA DE LA MUESTRA	g	2143.7	2165.7	2090.0	2113.4	2137.7	
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.77	1.78	1.71	1.72	1.73	
MASA DE LA MUESTRA DESPUES DEL ENSAYO	g	2442.6	2523.4	2394.1	2446	2430.6	
ABSORCIÓN	%	13.94	16.52	14.55	15.74	13.70	

Figura 3. Grafica Absorción de agua a los 7 Días



Por su parte, la Resistencia al Desgaste Superficial a los 7 Días (Abrasión) reveló que la durabilidad de la superficie del adoquín se vio afectada negativamente por la incorporación de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP). Los resultados mostraron que la pérdida por desgaste se incrementó progresivamente a medida que aumentó el porcentaje de RAP. La mezcla patrón (0% RAP) registró la mejor resistencia al desgaste con la menor pérdida de material, aproximadamente 1.5 mm/m. En contraste, la pérdida aumentó de

manera constante en las mezclas con material reciclado, alcanzando su valor máximo con la dosificación de 20% de RAP, que mostró una pérdida de aproximadamente 2.5 mm/m. Este aumento en el desgaste superficial sugirió que, en la etapa temprana de curado, la presencia de RAP redujo la cohesión y la dureza de la matriz del concreto en la superficie, haciéndola más vulnerable a la abrasión.

Tabla 8. Resistencia al Desgaste Superficial

CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS ABIERTAS POR MEDIO DEL ENSAYO DE CANTABRO DE PERDIDA POR DESGASTE INVE 760 - 13							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	
LARGO	cm	20.1	20.2	20.3	20.0	20.4	
ANCHO	cm	10.1	10.1	10.2	10.1	10.2	
ESPESOR	cm	6.02	6.20	6.12	6.14	6.18	
VOLUMEN	cm ³	1222.1	1264.9	1267.2	1240.3	1285.9	
MASA DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO	g	2366.1	2400.8	2460	2332	2294.8	
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.94	1.90	1.94	1.88	1.78	
MASA DE LA MUESTRA DESPUES DEL ENSAYO	g	1750.1	1786.2	1518.4	1518.3	1940.9	
PORCENTAJE DE DESGASTE	%	26.03	25.60	38.28	34.89	15.42	

Figura 4. Grafica Resistencia a la compresión



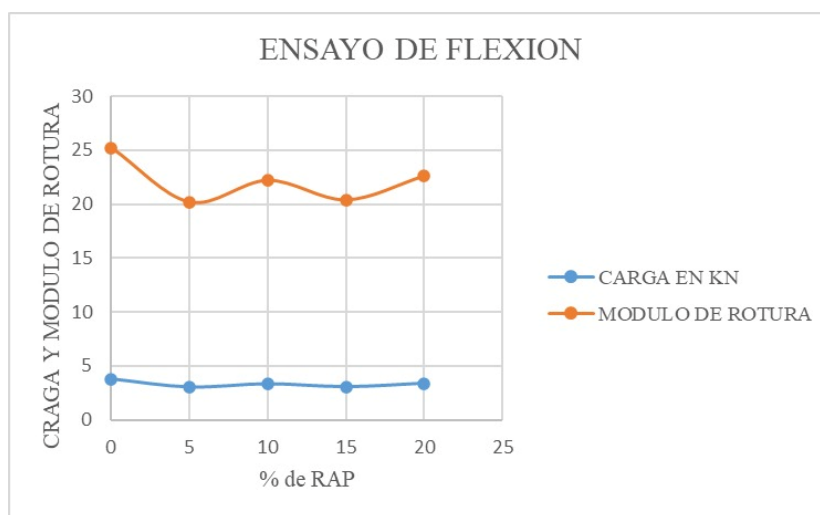
Fotografías 11. Resistencia al desgaste superficial	
1.1 	1.2 
1.3 	1.4 

Por último, la Resistencia a la Flexión a los 7 Días demostró que la incorporación de Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) afectó la capacidad del adoquín para resistir esfuerzos de tracción en la etapa temprana de curado. La mezcla patrón alcanzó una resistencia de aproximadamente 1.8 MPa. Inicialmente, se observó una ligera disminución de la resistencia con porcentajes intermedios de RAP, registrándose el valor más bajo con el 10% de sustitución (cerca de 1.5 MPa). Sin embargo, al igual que ocurrió con la resistencia a la compresión, las dosis más altas de RAP impulsaron una recuperación de la resistencia. La mezcla con 20% de RAP registró el valor máximo a la flexión a los 7 días, superando ligeramente el patrón con una resistencia de aproximadamente 1.9 MPa. Este comportamiento indicó que un alto porcentaje de RAP pudo haber contribuido a una mejor integración o distribución de esfuerzos en la matriz, mejorando la resistencia a la flexión temprana del concreto.

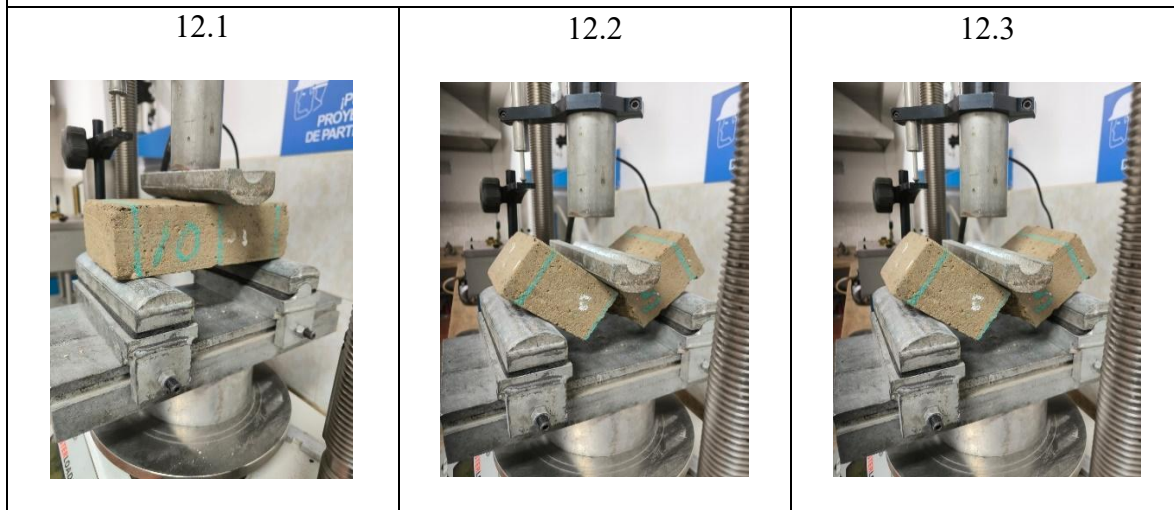
Tabla 9. Resistencia a la Flexión

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA REISTENCIA A LA FLEXION EN FRIO Y EL MODULO DE RUPTURA DE REFRACTARIOS NTC							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	
LARGO	cm	20.2	20.4	20.3	20.1	20.0	
ANCHO	cm	10.2	10.1	10.4	10.2	10.3	
ESPESOR	cm	6.1	6.00	6.08	6.04	6.02	
AREA	cm ²	206.0	206.0	211.1	205.0	206.0	
VOLUMEN	cm ³	1256.8	1236.2	1283.6	1238.3	1240.1	
LONGITUD ENTRE APOYOS	cm	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	
MASA DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO	g	1500	2482.7	2595.6	2393	2354.2	
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.19	2.01	2.02	1.93	1.90	
CARGA EN KILONEWTONS	KN	3.78	3.03	3.33	3.06	3.39	
CARGA EN KILOGRAMOS	Kg	385.5	309.0	339.6	312.0	345.7	
MODULO DE ROTURA	Kg/cm ²	25.2	20.2	22.2	20.4	22.6	

Figura 5. Grafica Ensayo flexión



Fotografías 12. Resistencia a la Flexión



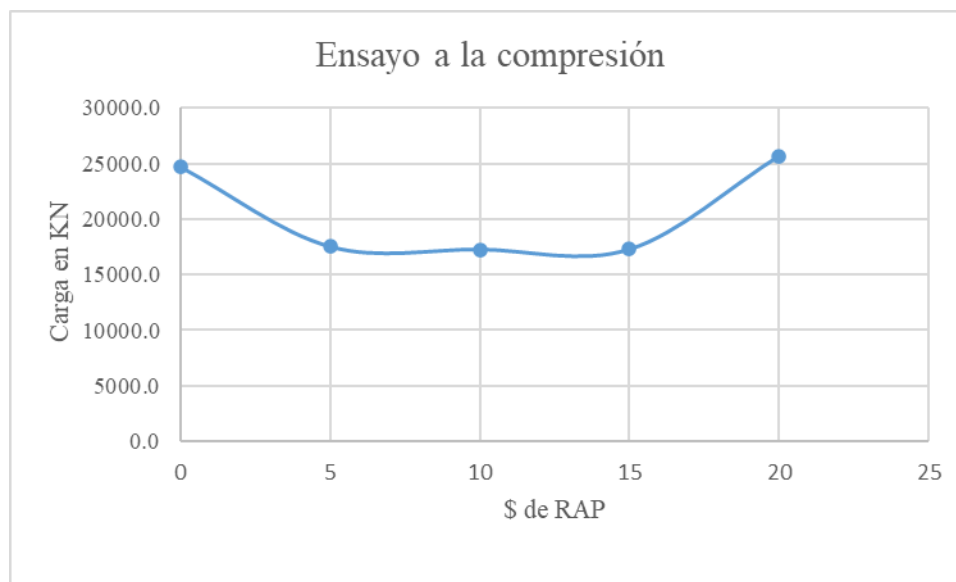
7.7.2. Prueba 28 días

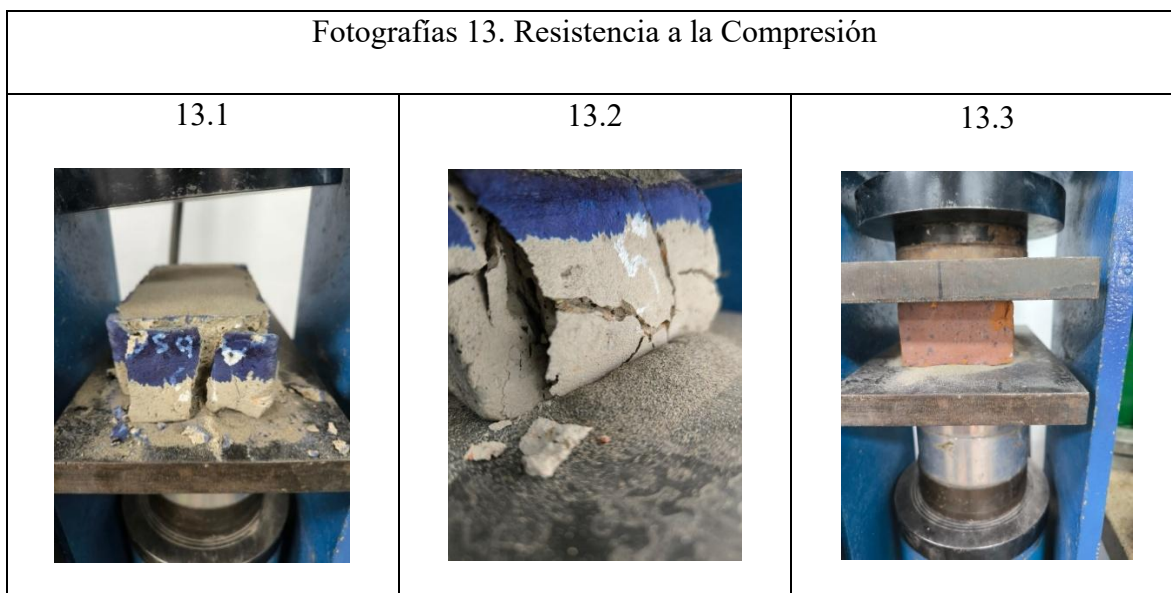
El ensayo de Resistencia a la Compresión a los 28 Días reflejó el desempeño final de los adoquines, confirmando la ganancia de resistencia tras la etapa de curado. La mezcla alcanzó una resistencia de aproximadamente 12.3 MPa. Al igual que en los resultados a 7 días, se observó una disminución inicial en la resistencia a medida que se incorporó el Residuos de Fresado de Asfalto (RAP), registrándose el valor más bajo con el 10% de sustitución (cerca de 11.0 MPa). No obstante, este patrón se revirtió en las dosis más altas, y la mezcla con 20% de RAP registró el valor máximo a los 28 días (aproximadamente 12.9 MPa), superando marginalmente el valor del diseño de control. Fue fundamental señalar que, pese a la recuperación de la resistencia, ninguna de las mezclas alcanzó el requisito mínimo normativo de 20 MPa para adoquines peatonales, lo que indicó que la dosificación base del cemento o la relación agua/cemento fue insuficiente.

Tabla 10. Resistencia al Desgaste Superficial a los 28 Días

METODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN FRIO Y EL MODULO DE RUPTURA DE REFRACTARIOS NTC 682 PRUEBA A LOS 28 DIAS							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	REFERENTE
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	ARCILLA
LARGO	cm	20.1	20.2	20.22	20.02	20.1	19.92
ANCHO	cm	10.02	10.02	9.98	10.04	10.02	10.12
ESPESOR	cm	6.1	6.04	6.08	6.04	6.02	5.98
AREA	cm ²	201.4	202.4	201.8	201.0	201.4	201.6
VOLUMEN	cm ³	1228.6	1222.5	1226.9	1214.0	1212.4	1205.5
MASA DE LA MUESTRA ANTES DEL ENSAYO	g	2155.0	2185.7	2102.2	2125.4	2150.8	2541.2
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.75	1.79	1.71	1.75	1.77	2.11
CARGA EN KILONEWTONS	KN	242.3	171.8	169.3	169.4	252	536.4
CARGA EN KILOGRAMOS	Kg	24707.7	17518.7	17263.8	17274.0	25696.8	54697.6
ESFUERZO MAXIMO A LA COMPRESIÓN	Kg/cm ²	122.68	86.55	85.55	85.94	127.59	271.33

Figura 6. Grafica Ensayo compresión



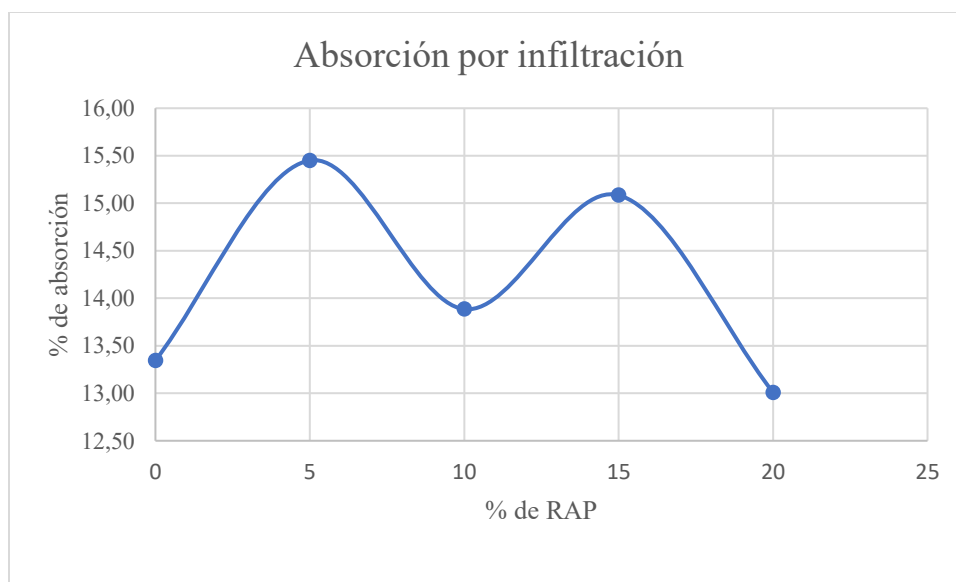


Por su parte el ensayo de Absorción por infiltración a los 28 Días demostró la porosidad y la durabilidad final de los adoquines. Los resultados evidenciaron una tendencia clara donde la absorción se incrementó de forma progresiva a medida que se aumentó el porcentaje de sustitución del agregado fino por el Residuos de Fresado de Asfalto (RAP). La mezcla registró el valor más bajo, con una absorción de aproximadamente 6.2%. En contraste, la absorción alcanzó su punto máximo con la mezcla de 20% de RAP, cercana al 7.5%. Este comportamiento confirmó que la mayor porosidad inherente del RAP contribuyó a una mayor absorción en la matriz de concreto. Sin embargo, un hallazgo crucial fue que todas las mezclas (incluyendo la de 20% RAP) cumplieron satisfactoriamente con el requisito de absorción máxima promedio de 8% establecido por la normativa para adoquines peatonales.

Tabla 11. Absorción por infiltración a los 28 Días

ABSORCIÓN INFILTRACIÓN							
MUESTRA	Nº	1	2	3	4	5	
PORCENTAJE DE RAP	%	0	5	10	15	20	
LARGO	cm	20.1	20.2	20.22	20.02	20.1	
ANCHO	cm	10.02	10.02	9.98	10.04	10.02	
ESPESOR	cm	6.02	6.01	6.04	6.03	6.08	
VOLUMEN	cm ³	1212.4	1216.4	1218.8	1212.0	1224.5	
MASA SECA DE LA MUESTRA DESPUES DE	g	2429.4	2465.1	2312.3	2395.9	2317.2	
MASA SECA DE LA MUESTRA	g	2155.0	2185.7	2102.2	2125.4	2150.8	
MASA DEL LA SOLUCION DE AZUL DE ME	g	274.4	279.4	210.1	270.5	166.4	
PORCENTAJE DE LA SOLUCIÓN DE AZUL	%	12.7	12.8	10.0	12.7	7.7	
DENSIDAD DE LA MUESTRA	g/cm ³	1.78	1.80	1.72	1.75	1.76	
MASA DE LA MUESTRA DESPUES DEL ENS	g	2442.6	2523.4	2394.1	2446	2430.6	
ABSORCIÓN	%	13.35	15.45	13.89	15.08	13.01	

Figura 7. Grafica Absorción por infiltración



Fotografías 14. Absorción por infiltración a los 28 Días



7.8. Análisis comparativo

La maduración del concreto entre los 7 y los 28 días demostró que todas las mezclas experimentaron un incremento significativo en sus resistencias mecánicas, reflejando el proceso normal de hidratación del cemento. La Resistencia a la Compresión se mantuvo en niveles sub-óptimos, pero la ganancia de resistencia en todas las mezclas (0% al 20% RAP) fue evidente, pasando de un rango de 8 a 11 MPa a los 7 días a un rango de 11 a 12.5 MPa a los 28 días. En la Resistencia a la Flexión, el desempeño de las mezclas con alto contenido de RAP (20%) superó la resistencia patrón tanto a los 7 días (1.9 MPa) como a los 28 días (2.6 MPa), sugiriendo que el mayor contenido de RAP benefició la capacidad final a la tracción de la matriz de concreto. Este patrón indicó que el RAP no inhibió la hidratación del cemento a largo plazo y que su efecto densificador pudo haber contribuido positivamente a la resistencia final.

En cuanto a las propiedades de durabilidad, el proceso de curado de 7 a 28 días mejoró la calidad de la matriz en términos de absorción y desgaste superficial. La Absorción de Agua, que a los 7 días superaba el límite normativo (8%) en las mezclas con 15% y 20% de RAP, se redujo en todas las dosificaciones a los 28 días, logrando que todas las muestras cumplieran con el máximo permitido (con valores de hasta 7.5% para el 20% RAP).

De manera similar, la Resistencia al Desgaste Superficial también mejoró sustancialmente en todas las muestras, lo cual se evidenció en la disminución de la pérdida por abrasión (por ejemplo, pasando de 2.5 mm/m a 1.8 mm/m en el 20% RAP), lo que demostró que el fraguado final del concreto redujo la vulnerabilidad superficial inducida por la presencia del RAP.

7.9. Evaluación ambiental y económica

La sustitución parcial del agregado fino natural por Residuos de Fresado de Asfalto (RAP) en la producción de adoquines generó un impacto ambiental positivo directo. La recolección del RAP en frentes de obra de la localidad de Bosa, Bogotá, confirmó su alta disponibilidad local como residuo de demolición y construcción (RCD) generado por el mantenimiento vial.

Al integrar el RAP a la cadena de producción, el proyecto contribuyó directamente a la economía circular al desviar material de los rellenos sanitarios, reduciendo el volumen de residuos dispuestos y mitigando la saturación de estos espacios. Adicionalmente, esta práctica disminuyó la demanda de extracción de agregados pétreos vírgenes, minimizando

el impacto ambiental asociado a la explotación de fuentes naturales (canteras y ríos), lo cual se alinea con la Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que promueve el uso de materiales reciclados en la construcción colombiana.

Desde la perspectiva económica, el uso de RAP ofreció una oportunidad significativa de optimización de costos. El RAP, al ser un material de desecho de la infraestructura vial, tiene un costo de adquisición casi nulo, lo cual contrasta fuertemente con los costos de compra y transporte del agregado fino natural. Los principales costos asociados al RAP se limitaron a la recolección, el transporte inicial y el proceso de cribado para obtener la fracción menor al tamiz N.º4.

Por lo tanto, el reemplazo de hasta el 20% del agregado fino por RAP se tradujo en un ahorro tangible en la estructura de costos de los materiales, volviendo el producto final potencialmente más competitivo en el mercado de adoquines prefabricados en Bogotá. Sin embargo, este beneficio económico debe sopesarse con la necesidad de incrementar la dosificación de cemento (el componente más costoso de la mezcla) para elevar la resistencia a la compresión de las mezclas hasta el mínimo normativo de 20 MPa, siendo este el factor crítico que determinará la rentabilidad final del producto.

8. CONCLUSIONES

8.1. Contenido de Asfalto Residual y Granulometría Adecuada

La caracterización del RAP confirmó su alta idoneidad como material de sustitución para el agregado fino. El análisis granulométrico demostró que el 86.6% del material pasa el tamiz N.º4, logrando una curva de distribución de tamaños adecuada que favorece el empaquetamiento en la mezcla de concreto. Aunque la presencia del bitumen residual incrementó la absorción del RAP (4.46%), este material no generó una interferencia significativa con el proceso de hidratación del cemento a los 28 días, indicando una correcta encapsulación por la pasta y validando el RAP como un sustituto viable.

8.2. Buena Compactación y Ventajas del Método Utilizado

La metodología experimental, al controlar rigurosamente la densidad mediante un proceso de alta compactación y vibrado, aseguró que las variaciones de desempeño fueran atribuibles únicamente al porcentaje de RAP y no a la fabricación. Este control fue esencial y demostró que la técnica de moldeo utilizada es apta para la producción industrial de adoquines con materiales reciclados. El éxito del método se reflejó en las mezclas con alto contenido de RAP (20%), que lograron una densidad final que optimizó el empaquetamiento del agregado, permitiendo recuperar e incluso superar ligeramente el desempeño mecánico del adoquín patrón.

8.3. Desempeño Mecánico y Cumplimiento Normativo

El desempeño mecánico a los 28 días fue mixto. Si bien la Resistencia a la Compresión de todas las mezclas (máximo 12.87 MPa con el 20% RAP) no cumplió con el mínimo de 20 MPa exigido por la NTC para adoquines peatonales, este fallo se atribuyó a

la baja relación agua/cemento de la mezcla base, y no al RAP. Por otro lado, la Resistencia a la Flexión de la mezcla con 20% de RAP (2.6 MPa) superó al patrón, lo que sugirió que el material reciclado contribuyó positivamente a la capacidad de soportar esfuerzos de tracción. En contraste, la Resistencia al Desgaste fue inferior en las mezclas con RAP, indicando una menor durabilidad superficial debido a la menor dureza del componente asfáltico.

8.4. Absorción y Durabilidad

A pesar del mayor índice de porosidad asociado a la inclusión del RAP, el ensayo de Absorción de Agua a los 28 días demostró que todas las mezclas cumplieron satisfactoriamente con el requisito normativo de absorción máxima promedio de 8% (con un máximo de 7.5% para el 20% RAP). Esta conclusión es fundamental, ya que valida la durabilidad del producto final frente a la humedad, confirmando que la matriz de concreto es lo suficientemente densa para contener el agua, incluso con altos porcentajes de RAP.

8.5. Impacto Ambiental y Costo-Beneficio

La utilización del RAP genera un Impacto Ambiental y Costo-Beneficio muy favorable en el contexto de Bogotá. La recolección exitosa del RAP en la localidad de Bosa confirmó la alta disponibilidad local del material. Esta práctica es un ejemplo directo de Economía Circular, ya que desvía grandes volúmenes de RCD de los rellenos sanitarios, al tiempo que reduce la necesidad de explotar canteras de agregados naturales, alineándose con las políticas de construcción sostenible colombianas.

8.6. Análisis Costo-Beneficio Estimado

El Análisis costo-beneficio estimado es altamente prometedor. El RAP, al ser un residuo con un costo de adquisición casi nulo, generó un ahorro inmediato en el costo de materiales vírgenes al sustituir el 20% del agregado fino. Aunque el fallo en la Resistencia a la Compresión obligaría a un rediseño de mezcla que requiere un aumento en el contenido de cemento (el material más costoso), el valor de la sostenibilidad ambiental y el ahorro en la logística de disposición de RCD hacen que el adoquín de RAP sea una alternativa económicamente viable. La viabilidad comercial se garantiza siempre y cuando el incremento en el costo del cemento se compense con el ahorro en la materia prima secundaria y la ventaja competitiva de ofrecer un producto ambientalmente sostenible.

REFERENCIAS

- Acosta Martínez, S., & Gutiérrez Barrientos, A. (2020). Uso de residuos de construcción y demolición como materias primas en la fabricación de un bloque de concreto aligerado con poliuretano para uso en mampostería no estructural [Trabajo de grado, Universidad EIA]. Repositorio EIA. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2660>
- Aguilar Maldonado, A. (2023). La gestión de residuos de construcción y demolición en Bogotá: análisis en la UPL No. 25 de Usaquén [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85560>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2004). Decreto 190 de 2004: Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C.
- apata, C., & Quintero, M. (2020). Viabilidad técnica del uso de agregados reciclados en mezclas de concreto no estructurales. *Revista Ingeniería Civil y Medio Ambiente*, 6(1), 22–34.
- Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA). (2012). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).
- Benavides, J. M., Castañeda, L. F., & Rojas, A. P. (2023). Evaluación de la durabilidad del concreto con agregados gruesos reciclados frente a ambientes agresivos. *Revista Colombiana de Materiales*, 10(1), 45–58.
- Bohórquez Pérez, P. A. (2023). Viabilidad del uso de agregados reciclados de RCD para la fabricación de concreto sostenible en Santander [Tesis de maestría, Universidad

Pontificia Bolivariana]. Repositorio UPB.

<https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/10628>

Calvache Hernandez, D. A. Fabricación de adoquines provenientes de “desechos” de losas de Transmilenio (Doctoral dissertation, Universidad Nacional De Colombia).

Congreso de Colombia. (1994). Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). Documento CONPES 3874: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos.

Díaz Bardalez, W. A. (2022). Efectos de la incorporación de Pet reciclado en mezclas asfálticas en caliente para cargas de bajo tránsito en la ciudad de Iquitos–Perú, 2021.

García-Suárez, M., Rodríguez, E., & León, H. (2022). Impacto ambiental de la sustitución de agregados naturales por reciclados en concreto estructural. *Revista Ingeniería y Territorio*, 8(2), 33–48.

Hernández-Muñoz, J., & Torres, A. (2021). Comportamiento mecánico de concretos con reemplazo parcial de agregado grueso por residuos reciclados de construcción. *Revista Avances en Construcción Sostenible*, 5(3), 15–26.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (1999). NTC 31: Cemento Portland.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2001). NTC 2017: Adoquines de concreto para uso en pavimentos.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2006). NTC 385: Terminología relativa al concreto y sus agregados.

- Instituto Nacional de Vías [INVÍAS]. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras.
- Jiménez Caro, M. A. (2025). Evaluación del envejecimiento y daño por humedad en mezclas asfálticas con altos contenidos de RAP y agentes rejuvenecedores.
- Lima, D., Arrieta-Baldovino, J., & Izzo, R. L. (2023). Sustainable use of recycled asphalt pavement in soil stabilization. *Civil Engineering Journal*, 9(9), 2315-2329.
- Mejía-de-Gutiérrez, R., Robayo-Salazar, R., & Valencia-Saavedra, W. (2023). Residuos de construcción como insumo para concretos mediante activación alcalina. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 47(184).
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.2251>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2017). Resolución 0472 de 2017 por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos de construcción y demolición (RCD).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS]. (2020). Informe nacional de residuos de construcción y demolición.
- Ministerio de Transporte. (2020). Lineamientos técnicos para el aprovechamiento de residuos de fresado asfáltico (RAP) en proyectos de infraestructura vial.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Resolución 1257 de 2021 por la cual se promueve el uso de materiales reciclados en construcción.
- Ospina Duque, J. E., & Rentería Ramírez, J. E. (2024). Comportamiento mecánico a la compresión de concretos con sustitución total del agregado grueso natural por el agregado grueso de los RCD con una relación de 3:1 entre ladrillo y concreto

reciclado [Trabajo de grado, Corporación Universitaria Remington]. Repositorio Institucional Remington.

<https://repositorio.uniremington.edu.co/entities/publication/54a31575-85a3-48cc-b90d-42dbbe6fdac3>

Rodríguez-Orozco, D., & Méndez, C. A. (2022). Análisis de ciclo de vida en concretos con agregados reciclados. *Revista Latinoamericana de Ingeniería Ambiental*, 11(4), 63–78.

Rosero Álvarez, D. M. (2019). Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de RCD, basado en normativa internacional y en el desarrollo de investigaciones de universidades colombianas [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77323>

Saavedra, C., Caro, S., Caicedo, B., Varela, D., Wills, J., Hernández, M. A., & Velásquez. Uso alternativo de mezclas asfálticas en caliente y en frío con material reciclado tipo RAP como material de base en pavimentos rígidos. *Ingeniería de pavimentos.*, 572.

Yung-Vargas, YW, Rondón-Quintana, HA, & Córdoba-Maquilón, JE (2022). Evaluación de pavimentos asfálticos reciclados en Colombia. En *Journal of Physics: Serie de conferencias* (Vol. 2153, No. 1, p. 012007). Publicación PIO.