

Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto por arena-PEAD mediante tratamiento térmico.

Karen Vannessa Torres Gómez y Juan Sneyder Niño Moreno

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

M.Sc. Luis Alberto Capacho Silva

Profesor titular, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Programa académico

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, por ser mi guía en cada paso de este trayecto, por darme la fortaleza necesaria para continuar aun en los momentos más difíciles y por iluminar mi camino con sabiduría y esperanza. Gracias por sostenerme y mostrarme que con fe todo es posible.

A mi mamá Nora Gómez Reyes, quien ha sido mi apoyo incondicional y mi refugio en cada instante de adversidad. Su amor y entrega constante me han dado la fuerza para levantarme y seguir adelante. Este logro también es suyo, por su dedicación, sacrificio y la infinita paciencia con la que me ha acompañado en todo momento.

A mi hijo Khenner David Salas Torres, que, con su voz, sus risas y sus ocurrencias ha sido curita a mi corazón, llenándome de motivación y alegría. Él es mi motor, mi razón más grande para no rendirme y la inspiración que me impulsa a luchar cada día por construir un mejor futuro.

A mi hermano Cristian Giovanni Gómez Reyes, quien siempre ha estado presente cuando lo he necesitado, brindándome su apoyo sincero y su compañía leal. Gracias por ser ese pilar firme en el que puedo confiar y por caminar conmigo en cada etapa de este proceso.

A Freddy, una persona muy especial en mi vida, cuyo apoyo constante, comprensión y compañía me han dado serenidad y ánimo en los momentos más exigentes de este trayecto. Gracias por creer en mí, por estar siempre dispuesto a tenderme la mano y por recordarme que no estoy sola en este camino.

Finalmente, a mis amigas Natha, Juli, Adri, Caro, Dianís, aquellas que Dios y la universidad me concedieron como un regalo invaluable. Gracias por acompañarme, por sus palabras de aliento, por compartir risas, lágrimas y aprendizajes, y por hacer de este recorrido una experiencia más llevadera y significativa.

Karen Vanessa Torres Gómez

Dedicatoria

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme hacer realidad este sueño, porque sin su guía y fortaleza nada de esto habría sido posible.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por estar siempre a mi lado en los momentos difíciles y brindarme la motivación necesaria para alcanzar este logro tan importante en mi vida.

A mis compañeros y amigos que conocí durante el camino, gracias por sus consejos, su compañía y por compartir conmigo esta etapa, haciéndola más llevadera y significativa.

A mis profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, por transmitirme su conocimiento, su experiencia y por dejarme valiosas enseñanzas que me acompañarán siempre.

A los laboratoristas de la Escuela de Ingeniería Civil, por su colaboración desinteresada y su disposición en la realización de los ensayos, contribuyendo de manera esencial al desarrollo de este proyecto.

Y, de manera muy especial, a mi mamá Luz Minta Niño Moreno, por su ánimo constante y por ese empuje en los momentos más difíciles, por recordándome siempre que la perseverancia es la clave para llegar a la cima.

Juan Sneyder Niño Moreno

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las instituciones que hicieron posible el desarrollo de este proyecto con su valiosa colaboración. En especial, extendemos un reconocimiento a la Escuela de Ingeniería Civil y a la Universidad Industrial de Santander, por su compromiso en la formación de profesionales íntegros, capaces de enfrentar los desafíos de la industria con innovación, eficiencia y eficacia, sin perder de vista los valores humanos que deben distinguir a todo buen profesional.

A nuestro profesor, ingeniero y director Luis Alberto Capacho Silva, por su valioso apoyo y dedicación a lo largo de este proceso. Su orientación, compromiso y apoyo constante fueron fundamentales para culminar con éxito este proyecto de investigación y cerrar de la mejor manera nuestra etapa universitaria.

Juan y Karen.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Marco teórico	17
2.1 Polietileno de alta densidad PEAD.....	18
2.2. Adoquín.....	20
2.2.1. Norma NTC 2017. Adoquines de concreto para pavimentos.	21
2.2.2. Norma NTC 5147. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de los prefabricados de concreto utilizados en pisos y pavimentos, mediante abrasivo de corindón y disco metálico ancho.	22
2.3. Material compuesto.....	22
3. Metodología	23
3.1. Caracterización de la arena	23
3.1.1. Granulometría	24
3.1.1.1. Material que pasa el tamiz (No. 200).....	25
3.1.2. Módulo de finura.....	25
3.1.3. Requisitos de calidad	26
3.1.3.1. Durabilidad – ensayo de solidez de sulfatos.	26
3.1.3.2. Limpieza – equivalente de arena.....	27
3.1.3.3. Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales.....	27

3.1.3.4. Color más oscuro permisible.	28
3.1.4. Peso específico y absorción de la arena fina.....	28
3.1.5. Ensayo de peso unitario de la arena fina.....	29
3.2. Caracterización del polietileno alta densidad PEAD.....	31
3.2.1. Peso específico del PEAD	31
3.2.2. Fluencia del PEAD.	32
3.3. Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto	33
3.3.1. Cálculo del volumen de los moldes.	33
3.3.2. Dosificación de materiales.....	34
3.3.3. Elaboración de las probetas	35
3.3.3.1. Moldeado de probetas	35
3.3.3.2. Compactación	36
3.3.3.3. Desencofrado y toma de mediciones.	36
3.3.4. Ensayo de compresión.	37
3.4. Dosificación óptima.	38
3.4.1. Probetas elaboradas con variación de temperatura	40
3.5. Fabricación de los adoquines.	40
3.5.1. Proyección de la masa para el adoquín	41
3.5.2. Dosificación del material	42
3.5.2.1. Moldeado, compactación y mezclado.....	43
3.5.2.2. Desencofrado del adoquín.....	44
3.5.3. Medición de dimensiones y cálculo de densidad del Adoquín.....	44
3.6. Ensayos a los adoquines.....	45

3.6.1. Ensayo a compresión.	45
3.6.2. Ensayo a flexo tracción.....	46
3.6.3. Absorción de agua.....	47
3.6.4. Ensayo de desgaste o abrasión.....	48
4.Resultados	49
4.1. Caracterización de la arena	49
4.1.1. Granulometría.	49
4.1.1.1. Material que pasa el tamiz No 200.	50
4.1.2. Módulo de finura.....	51
4.1.3. Requisitos de calidad	51
4.1.3.1. Durabilidad- Ensayo de solidez de sulfatos.	51
4.1.3.2. Limpieza- Ensayo equivalente de arena.	52
4.1.3.3. Ensayo contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales.	53
4.1.3.4. Ensayo color más oscuro permisible.....	53
4.1.4. Peso específico y absorción de la arena del agregado fino.	54
4.1.5. Peso unitario de la arena.	54
4.2. Caracterización del (PEAD).	55
4.2.1. Peso específico.....	55
4.2.2. Fluencia.....	56
4.3. Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto.	56
4.3.1. Volumen promedio de los moldes	57
4.3.2. Dosificación de los materiales.	58
4.3.3. Elaboración de las probetas	59

4.3.3.1. Moldeado	59
4.3.3.2. Compactación	59
4.3.3.3. Desencofrado y toma de mediciones	60
4.3.4. Ensayo de compresión.	60
4.4. Dosificación óptima.	62
4.4.1. Probetas realizadas con variación de temperatura	64
4.5. Fabricación de los adoquines.	65
4.5.1. Proyección de la masa para el adoquín	66
4.5.2. Dosificación del material	66
4.5.2.1. Moldeado, compactación y mezclado	67
4.5.2.2. Desencofrado del adoquín.....	67
4.5.3. Medición de dimensiones y cálculos de densidad del adoquín.....	68
4.6. Ensayos a los adoquines.....	69
4.6.1. Ensayo a compresión	69
4.6.2. Ensayo de absorción.	71
4.6.3. Ensayo a flexo tracción.....	73
4.6.4. Ensayo de abrasión	75
5. Estimación beneficio ambientales del uso del PEAD.....	76
6. Conclusiones.....	77
Referencias bibliográficas.....	79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Propiedades del PEAD virgen y reprocesados</i>	20
Tabla 2. <i>Propiedades físicas del adoquín</i>	21
Tabla 3. <i>Granulometría de la arena.</i>	49
Tabla 4. <i>Resultados ensayo pasa No 200.</i>	51
Tabla 5. <i>Resultados ensayo INV E-220.</i>	52
Tabla 6. <i>Resultados ensayo equivalente de arena.</i>	52
Tabla 7. <i>Peso específico y absorción de la arena.</i>	54
Tabla 8. <i>Peso unitario de la arena.</i>	55
Tabla 9. <i>Peso específico del PEAD.</i>	55
Tabla 10. <i>Fluencia del PEAD.</i>	56
Tabla 11. <i>Volumen promedio de los moldes</i>	57
Tabla 12. <i>Masa de material por cada dosificación.</i>	58
Tabla 13. <i>Material fraccionado</i>	59
Tabla 14. <i>Tabla comparativa en las tres máquinas (dosificación del 15%)</i>	61
Tabla 15. <i>Resultados de ensayo a compresión por dosificación.</i>	62
Tabla 16. <i>Dosificación óptima</i>	63
Tabla 17. <i>Análisis estadístico</i>	63
Tabla 18. <i>Ensayo de probetas con reducción de temperatura.</i>	65
Tabla 19. <i>Fabricación de adoquines.</i>	65
Tabla 20. <i>Dosificación del material para el adoquín.</i>	66
Tabla 21. <i>Medición de dimensiones y cálculos de densidad del adoquín.</i>	68

Tabla 22. <i>Resultados del ensayo a compresión</i>	69
Tabla 23. <i>Comparación con los requisitos de calidad del artículo 510-13 de INVIAS...</i>	70
Tabla 24. <i>Resultado del ensayo de absorción de agua.</i>	72
Tabla 25. <i>Resultado ensayo a flexo tracción.</i>	73
Tabla 26. <i>Resultado ensayo abrasión.</i>	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Composición química del PEAD.</i>	19
Figura 2. <i>PEAD triturado.</i>	31
Figura 3 <i>Compactación de las probetas</i>	36
Figura 4 <i>Ensayo a compresión de los adoquines</i>	45
Figura 5 <i>Ensayo a flexo tracción de los adoquines</i>	47
Figura 6 <i>Ensayo absorción de agua de los adoquines</i>	48
Figura 7 <i>Granulometría de la arena fina</i>	50
Figura 8 <i>Ensayo materia orgánica</i>	53
Figura 9 <i>Proceso de elaboración de probetas</i>	57
Figura 10 <i>Ensayo a compresión de las probetas</i>	61
Figura 11 <i>Degradación del termoplástico</i>	64
Figura 12 <i>Compactación del adoquín</i>	67
Figura 13 <i>Proceso inicial y resultado final de los adoquines</i>	68
Figura 14 <i>Diagrama fuerza- desplazamiento ensayo adoquín (A5)</i>	71
Figura 15 <i>Ensayo a compresión</i>	71
Figura 16 <i>Ensayo de absorción de agua</i>	72
Figura 17 <i>Diagrama, fuerza–desplazamiento ensayo a flexo-tracción del adoquín (A6)</i>	74
Figura 18 <i>Ensayo a flexo tracción</i>	74
Figura 19 <i>Ensayo de abrasión.</i>	76

Lista de Apéndices

	Pag.
Apéndice A. <i>Registro fotográfico para la caracterización de la arena fina</i>	82
Apéndice B. <i>Caracterización del PEAD</i>	85
Apéndice C. <i>Medición del molde</i>	86
Apéndice D. <i>Elaboración de probetas</i>	86
Apéndice E. <i>Ensayo a compresión</i>	90
Apéndice F. <i>Fabricación de los adoquines</i>	91

Resumen

Título: Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto por Arena-PEAD mediante tratamiento térmico. *

Autor: Karen Vannessa Torres Gómez, Juan Sneyder Niño Moreno. **

Palabras Clave: arena, PEAD, tratamiento térmico, adoquines, materiales compuestos, reciclaje, compresión, abrasión.

Se presenta la fabricación y caracterización de un adoquín prototipo compuesto por arena y polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado, consolidado mediante tratamiento térmico. El objetivo fue identificar una dosificación óptima y evaluar su desempeño frente a criterios de las normas NTC 2017 y NTC 5147. La metodología incluyó: caracterización de la arena según INVIAS, determinación del peso específico del PEAD, diseño de mezclas con variación de %PEAD y parámetros térmicos (temperatura/tiempo), elaboración de probetas cilíndricas para preseleccionar la mezcla, fabricación de adoquines (23×11×5 cm) y ensayos de compresión, flexotracción, absorción y abrasión. Se verificó control dimensional y de densidad a 11 especímenes, así como la reproducibilidad del proceso de compactación. Los resultados muestran que la fusión parcial del PEAD actúa como matriz ligante de la arena, permitiendo alcanzar resistencias compatibles con aplicaciones de tráfico ligero; adicionalmente, el análisis de sensibilidad térmica ± 10 °C sobre la temperatura óptima, evidenció el rango operativo de proceso. Se discuten tablas de contraste frente a límites de NTC 2017/5147.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías Fiscomecánicas Escuela de Ingeniería Civil. Programa académico. Director: Luis Alberto Capacho Silva. M.Sc.

Abstract

Title: Manufacturing of a prototype paving stone composed of sand-HDPE through thermal treatment *

Author: Karen Vannessa Torres Gómez, Juan Sneyder Niño Moreno ¹

Key Words: sand, HDPE, thermal treatment, paving blocks, composite materials, recycling, compressive strength, abrasion.

This work presents the manufacturing and characterization of a prototype paving block made of sand and recycled high-density polyethylene (HDPE), consolidated through thermal treatment. The goal was to identify an optimal mix and assess performance against NTC 2017 and NTC 5147 criteria. The methodology comprised: sand characterization (INVIAS guidelines), HDPE specific gravity, mix designs varying HDPE content and thermal parameters (temperature/time), cylindrical specimens for pre-selection, prototype blocks (23×11×5 cm), and compressive strength, flexural strength, water absorption, and abrasion tests. Dimensional control to 11 specimens, confirming process reproducibility. Results indicate that partially molten HDPE acts as a binder for sand, enabling strengths suitable for light-traffic pavements; a ± 10 °C thermal sensitivity analysis delineated the operating window. Comparison tables versus NTC 2017/5147.

* Degree Work

¹ Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Academic program. Director: Luis Alberto Capacho Silva. M.Sc.

Introducción

La acumulación de residuos plásticos, en especial del polietileno de alta densidad (PEAD), representa uno de los retos ambientales más urgentes de la actualidad. Su uso extensivo en envases, tuberías y elementos de consumo masivo, sumado a una disposición final inadecuada, genera contaminación y desaprovecha un recurso con gran potencial de reciclaje (Khanyi et al., 2024).

Los adoquines, fabricados habitualmente en concreto, arcilla o piedra natural, son ampliamente utilizados en pavimentos por su resistencia y durabilidad. Sin embargo, su producción implica un alto consumo energético y de recursos no renovables (Arango-Londoño, 2020). En este contexto, incorporar plásticos reciclados como el PEAD en la fabricación de adoquines aparece como una alternativa innovadora y sostenible, que simultáneamente contribuye a reducir la contaminación plástica y diversificar las soluciones constructivas (Santos & Zurita, 2022; Arias Rodríguez et al., 2023).

En Colombia no existe una normativa específica para adoquines elaborados con plásticos reciclados; por ello, las normas NTC 2017 (ICONTEC, 2018)¹ y NTC 5147 (ICONTEC, 2004)², diseñadas para adoquines de concreto, son empleadas como referencia. Estos establecen parámetros técnicos relacionados con resistencia a compresión, flexo-tracción, absorción y abrasión, lo que permite evaluar la viabilidad de nuevos materiales.

¹ Norma técnica colombiana, NTC 2017 - Adoquines de concreto para pavimentos

² Norma técnica colombiana, NTC 5147 – Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de los prefabricados de concreto utilizados en pisos y pavimentos, mediante abrasivo de corindón y disco metálico ancho.

En esta misma línea, existen antecedentes como el estudio de Gómez y Ocaño (2019) sobre ladrillos macizos fabricados con suelo y Polietileno Tereftalato, PET(Gómez & Ocaño, 2019). En su investigación, los autores demostraron que es posible alcanzar una resistencia de 9,85 MPa utilizando arena fina y un tratamiento térmico adecuado. o también “Ladrillo perforado elaborado con material Arena-Pet” (Nicolás Chacón,2024). Este hallazgo es fundamental, ya que no solo confirma que la combinación de arena con polímeros reciclados es viable, sino que establece un punto de comparación positivo para los niveles de resistencia que buscamos alcanzar con el uso de PEAD en este proyecto.

El presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar una dosificación óptima para construir un adoquín compuesto de arena y PEAD mediante tratamiento térmico, evaluando su desempeño frente a los requisitos de calidad establecidos en las normas NTC-2017 (ICONTEC, 2018) y NTC-5147 (ICONTEC, 2004). Para ello, se plantea una metodología experimental que contempla la caracterización de materias primas, la definición de una dosificación óptima y la evaluación del comportamiento físico-mecánico de los prototipos frente a los parámetros normativos.

Como resultado de esta investigación, se logró desarrollar un adoquín que integra arena y polietileno de alta densidad (PEAD) bajo un tratamiento térmico a 220°C. Al poner a prueba el material, los resultados fueron sumamente positivos: se alcanzó una resistencia a la compresión de 18.99 MPa y un desempeño sólido en las pruebas de flexotracción.(5.79Mpa) Además, el producto destacó por su baja permeabilidad, con una absorción de agua inferior al 7% cumpliendo con la norma NTC 2017(ICONTEC, 2018), y una notable resistencia al desgaste en los ensayos de abrasión.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una dosificación óptima para construir un adoquín compuesto de arena y PEAD mediante tratamiento térmico, evaluando su desempeño frente a los requisitos de calidad establecidos en las normas NTC-2017 y NTC-5147.

1.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar y ejecutar un proceso experimental que integre las mejores condiciones de tratamiento térmico (tiempo y temperatura) y la dosificación óptima de arena y PEAD, para determinar en qué punto de convergencia se dan las propiedades mecánicas máximas del adoquín.
- Comparar los resultados de las pruebas realizadas con los parámetros establecidos en las Normas Técnicas Colombianas NTC-2017 y NTC-5147, con el propósito de evaluar si los adoquines compuestos de arena y PEAD cumple requisitos de calidad, como: compresión, flexotracción, absorción y abrasión.
- Estimar los beneficios ambientales en el aspecto económico de la inclusión de PEAD reciclado en la fabricación de adoquines.

2. Marco teórico

El polietileno de alta densidad (PEAD) destaca por sus propiedades mecánicas, químicas y su potencial de reciclaje, lo que lo convierte en un material atractivo para aplicaciones en construcción sostenible (Guzmán & Murillo, 2014; Palmay et al., 2021; Gómez García, 2021). Entre estas aplicaciones se encuentran los adoquines, elementos ampliamente usados en

pavimentación y regulados por normas como la NTC 2017 (ICONTEC, 2018) y la NTC 5147 (ICONTEC, 2004), que aseguran su calidad y durabilidad.

Asimismo, los materiales compuestos permiten combinar ventajas de diferentes materiales para obtener propiedades mejoradas, lo que respalda la viabilidad de integrar PEAD reciclado en la elaboración de adoquines como alternativa técnica y ambiental (Askeland, 1984).

2.1 Polietileno de alta densidad (PEAD)

El polietileno es el termoplástico de mayor uso en la actualidad; se trata de un material económico que puede moldearse en múltiples formas, extruirse para fibras o soplarse para obtener películas delgadas (Guzmán & Murillo, 2014).

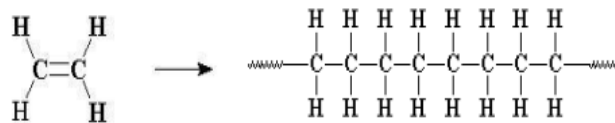
El polietileno de alta densidad (PEAD) ó High-Density Polyethylene (HDPE) constituye el polímero sintético más fabricado a nivel mundial. Es un material incoloro, inodoro y no tóxico, obtenido a bajas presiones. En comparación con el polietileno de baja densidad, presenta menor ductilidad, pero ofrece mayor dureza, resistencia mecánica y una permeabilidad cuatro veces inferior. Por sus propiedades físico-químicas, destaca por su resistencia al impacto y agentes químicos. Además, mantiene buena calidad tras su reciclaje, el cual se realiza mediante procesos mecánicos (Palmy et al., 2021).

Los productos elaborados con PEAD son altamente reciclables y cada vez más utilizados, especialmente en tapas, debido a cualidades como durabilidad, resistencia al desgaste, inercia química, ligereza, impermeabilidad y, sobre todo, su capacidad de ser reciclado. Desde el enfoque ambiental, el PEAD representa un material con gran potencial de aprovechamiento. En Colombia, aunque el PET ha tenido mayor relevancia, diversas empresas trabajan en el reciclaje de PEAD,

principalmente a partir de tapas de botellas. Estos se recolectan y transforman en nuevos bienes como tuberías, mobiliario urbano, envases no alimentarios (Gómez García, 2021). A continuación, en la Figura 1, se detalla la composición química del PEAD.

Figura 1.

Composición química del PEAD.



La Figura 1, muestra la reacción de polimerización por adición del eteno (C_2H_4), en la cual el doble enlace carbono-carbono se rompe y permite la formación de una cadena polimérica de polietileno, compuesta por unidades repetitivas del grupo metileno $-CH_2-CH_2-$ unidas mediante enlaces covalentes simples. Nota: Callister y Rethwisch (2020).

El polietileno de alta densidad reciclado pierde aproximadamente el 20% de sus propiedades comparado con el material virgen, afectando principalmente la densidad, resistencia a la tracción y elongación. Esta reducción se debe al contenido de humedad y contaminantes como residuos de alimentos, tintas, etiquetas y cobre. Sin embargo, mediante la incorporación de aditivos específicos es posible minimizar estos efectos. Bajo condiciones óptimas de procesamiento, se puede utilizar hasta un 25% de material reciclado combinado con resina virgen sin comprometer la calidad del producto final (Khanyi, Tabakov, & Inambao, 2024a, 2024b).

A continuación, en la Tabla 1, se detallan las principales propiedades del PEAD virgen y reprocesado una vez.

Tabla 1.*Propiedades del PEAD virgen y reprocesados.*

Propiedad	PEAD Virgen	PEAD reprocesado una vez
Índice de fluidez g/10 min	0.77	0.79
Densidad Kg/cm ²	0.963	0.961
Módulo de flexión Kg/cm ²	15.396	15.396
Resistencia al impacto Izod Kg.cm/cm	13	9
Resistencia a la tensión a la ruptura Kg/cm ²	155	175
Elongación %	555	613

Nota: Elaboración propia con base en Callister y Rethwisch (2020) y Odian (2004).

El PEAD se distingue por su alta resistencia química, favorable relación resistencia-peso, capacidad de absorción de impactos y facilidad de procesamiento, lo que lo convierte en un material económico, versátil y reciclable. No obstante, también presenta limitaciones, como su susceptibilidad a agentes oxidantes fuertes, menor rigidez en comparación con otros materiales, pérdida de propiedades a temperaturas muy altas o muy bajas, tendencia a deformarse bajo cargas constantes y su carácter no biodegradable, ya que puede degradarse por radiación UV u oxidación, generando microplásticos que afectan negativamente al medio ambiente (Askeland, 1984).

2.2. Adoquín

El adoquín se define como una pieza prefabricada, generalmente de concreto, con formas prismáticas que permiten el encaje de unas con otras para formar una superficie continua. Según la NTC 2017, (ICONTEC, 2018) estas unidades deben poseer características geométricas y mecánicas específicas para conformar pavimentos articulados, destinados a soportar cargas de tránsito mediante la transferencia de esfuerzos entre las piezas a través del sello de arena"

Un adoquín es un elemento de pavimentación macizo, cuya función es transmitir las cargas producidas por el tránsito hacia las capas inferiores del pavimento. Como señala (Rico y Castillo,2006) en su tratado sobre ingeniería de pavimentos, el adoquín se distingue por su capacidad de conformar una capa de rodadura flexible y resistente, cuya estabilidad depende tanto de la resistencia individual de la pieza como del confinamiento lateral y el correcto sellado de sus juntas."

2.2.1. Norma NTC 2017. Adoquines de concreto para pavimentos.

La norma NTC 2017 (ICONTEC, 2018) establece los requisitos de fabricación, propiedades físicas, mecánicas y geométricas que deben cumplir los adoquines de concretos prefabricados para su uso en pavimentos peatonales y vehiculares. A continuación, en la Tabla 2, se detallan las propiedades físicas del adoquín.

Tabla 2.

Propiedades físicas del adoquín

Propiedad	Requisito según la norma NTC 2017
Absorción de agua	$\leq 7\%$ promedio de 5 especímenes $\leq 8\%$ individual
Módulo de rotura (flexión)	$\geq 5,0$ MPa promedio de 5 especímenes $\geq 4,2$ MPa individual
Resistencia a la abrasión (longitud de huella)	≤ 23 mm promedio de 5v especímenes

Nota: Elaboración propia con base en la norma NTC 2017 (ICONTEC, 2018).

La norma NTC 2017 (ICONTEC, 2018), asegura que los adoquines de concreto tengan baja absorción, suficiente resistencia a flexión y abrasión, dimensiones uniformes y buena apariencia, garantizando su desempeño en pavimentos.

2.2.2. Norma NTC 5147. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de los prefabricados de concreto utilizados en pisos y pavimentos, mediante abrasivo de corindón y disco metálico ancho.

Esta norma establece el método de ensayo para medir la resistencia a la abrasión de unidades prefabricadas de concreto (como adoquines, losetas y placas) que se emplean en pisos y pavimentos. La magnitud del desgaste por abrasión se compara con los límites definidos en otras normas como la norma NTC 2017 (ICONTEC, 2018), que establece ≤ 23 mm en adoquines. La norma NTC 5147 (ICONTEC, 2004), no establece valores de aceptación, sino el procedimiento estandarizado para medir la resistencia a la abrasión en prefabricados de concreto (ICONTEC, 2004).

2.3. Material compuesto

En la ciencia de materiales, los materiales compuestos son aquellos que resultan de la unión de dos o más materiales con el fin de obtener propiedades que no presentan por separado. Estos pueden seleccionarse para alcanzar combinaciones especiales de rigidez, resistencia, bajo peso, comportamiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. Aunque se logran características notables, su aplicación práctica está limitada por factores como la complejidad de fabricación y el alto costo (Askeland, 1984).

3. Metodología

Este proyecto fue desarrollado siguiendo una metodología estructurada, la cual se implementará a través de cuatro fases. Cada una de estas fases fue diseñada para asegurar un proceso ordenado, eficiente y orientado a resultados, permitiendo así garantizar el cumplimiento de los objetivos específicos.

Se fabricaron una serie de adoquines con dimensiones estándar de 23x11x5 cm a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio, mediante ensayos a compresión de probetas cilíndricas. Para evaluar su desempeño frente a algunos requisitos de calidad de las normas NTC-2017 (ICONTEC, 2018) y NTC-5147 (ICONTEC, 2004).

3.1. Caracterización de la arena

La arena se caracterizó empleando: granulometría (tamizado), de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (CIVIL ENGINEERING TUTORIALES, 2020). Densidad aparente/real y requisitos de calidad establecidos en el Artículo 500 (Pavimentos de concreto hidráulico) del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022).

La caracterización de la arena se realizó conforme a los lineamientos del Artículo 500, Sección 500.2.1.4 (agregados finos), establecidos en el Manual de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022), dado que en el contexto normativo colombiano no se dispone de una norma específica para agregados destinados a la fabricación de adoquines. Esta es una referencia confiable que garantiza resistencia, durabilidad, granulometría y limpieza en los agregados. La arena proviene de la cantera del río

Chicamocha debido a su accesibilidad y gran desempeño en otros proyectos similares. Todo el proceso de caracterización se puede evidenciar en el registro fotográfico del Apéndice A.

3.1.1. Granulometría

La granulometría se realizó con una serie de tamices establecidos en el Artículo 500, Sección 500.2.1.4 (agregados finos), establecidos en el Manual de Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022), para una muestra de 1000 gramos y se clasificó con el sistema unificado SUCS (CIVIL ENGINEERING TUTORIALES, 2017). Para ello se calcularon el coeficiente de uniformidad utilizando la Ecuación 1 y de curvatura utilizando la Ecuación 2, como se presenta a continuación.

Ecuación 1.

Coeficiente de uniformidad

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Ecuación 2.

Coeficiente de curvatura

$$\text{Coeficiente de curvatura} = \frac{D_{30}^2}{D_{30} \cdot D_{10}}$$

Donde:

D10: Diámetro de las partículas por el cual pasa el 10% del material acumulado.

D60: Diámetro de las partículas por el cual pasa el 60% del material acumulado.

D30: Diámetro de las partículas por el cual pasa el 30% del material acumulado.

Nota: Ecuaciones 1 y 2. Adaptadas de Das, B. M. (2015).

3.1.1.1. Material que pasa el tamiz (No. 200)

La norma aplicable es INV E-214 (INVÍAS, 2013e). Este ensayo determina la cantidad de finos en el agregado, los cuales pueden ser perjudiciales para el adoquín. Se lavó una muestra representativa de arena fina en el tamiz (No 200), posteriormente se secó a una temperatura de 110 ± 5 °C y se pesó. El porcentaje que pasa se calculó mediante la Ecuación 3.

Ecuación 3.

Porcentaje que pasa tamiz No. 200

$$\text{porcentaje que pasa}(\%) = \left(\frac{M_{\text{fino}}}{M_{\text{total}}} \right) * 100$$

Donde:

Mfino: Masa de la muestra fina

Mtotal: Masa de la muestra ensayada

El contenido máximo aceptado es de 3%.

Nota: Ecuación 3. Adaptada de Das, B. M. (2015).

3.1.2. Módulo de finura

El módulo de finura se calculó con la Ecuación 4. Teniendo en cuenta una serie de tamices estandarizados en la NTC 174(2018) (ICONTEC, s.f.); este valor no debe ser menor a 2.3 ni mayor a 3.1 de esta manera se certifica que el material sea resistente, presente buena cohesión y durabilidad.

Ecuación 4.

Módulo de finura

$$MF = \frac{\sum \%RET \text{ acumulado (tamices)}}{100}$$

Donde:

MF: Módulo de finura

Tamices: 3/8” +N4+N8+N16+N30+N50+N100

Nota: Ecuación 4. Adaptada de Das, B. M. (2015).

3.1.3. Requisitos de calidad

3.1.3.1. Durabilidad – ensayo de solidez de sulfatos.

Este ensayo se realizó bajo los lineamientos de la norma INV E-220 (INVÍAS, 2013). Evalúa la resistencia del agregado a la desintegración después de ser sometido al humedecimiento y secado en varios ciclos en una solución de sulfato de sodio o de magnesio.

Se preparó varias muestras representativas del agregado fino retenido en una serie de tamices establecidos por la norma INV E-220 (INVÍAS,2013). La muestra se sumergió en una solución saturada de sulfato de magnesio durante 18 horas, después se secaron las muestras a 110 ± 5 °C durante 24 horas. Este proceso se repitió por cinco ciclos. Para determinar la pérdida de masa se utilizó la Ecuación 5.

Ecuación 5.

Pérdida de masa

$$Pérdida\ de\ masa(\%) = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) * 100$$

Donde:

Minicial: masa inicial de la fracción del material ensayado [g].

Mfinal: masa final de la fracción del material ensayado [g].

La pérdida máxima aceptada para sulfato de sodio de magnesio es de 15%.

Nota: Ecuación 5. Adaptada de la norma INV E-220 (INVÍAS,2013).

3.1.3.2. Limpieza – equivalente de arena

Este ensayo se realizó bajo los lineamientos de la norma INV E-133 (INVÍAS, 2013a). Mide la proporción de arena útil frente a materiales no deseados como por ejemplo las arcillas.

Se colocó una muestra representativa del agregado fino en una probeta graduada con una solución de cloruro de calcio y se agitó fuertemente durante 2 minutos; después se dejó reposar por 20 minutos y se midió la altura de la capa de arena y la capa de arcilla, después del asentamiento. Para calcular el equivalente de arena se utilizó la Ecuación 6.

Ecuación 6.

Equivalente de arena

$$\text{Equivalente de arena}(\%) = \left(\frac{\text{Harena}}{\text{Harcilla}} \right) * 100$$

Donde:

Harena: Altura de la capa de arena [in].

H arcilla: Altura de la capa de arcilla [in].

El equivalente mínimo aceptado es de 60%.

Nota: Ecuación 6. Adaptada de la norma INV E-133 (INVÍAS, 2013a).

3.1.3.3. Contenido de terrones de arcillas y partículas deleznales

Este ensayo se realizó bajo los lineamientos de la norma INV E-211 (INVÍAS, 2013c). Evalúa la presencia de partículas que puedan desintegrarse con facilidad. Se sumergió en agua destilada una muestra representativa de arena fina del material que quedó del ensayo “pasa 200” (INV E- 126).[27]; por 24 horas. Después cada partícula se aprieta entre los dedos intentando desintegrar las deleznales, se tamiza (tamiz N50) y se pesa la muestra resultante. Para calcular el porcentaje de partícula deleznales se utiliza la Ecuación 7.

Ecuación 7.

Porcentaje de terrones de arcillas y partículas deleznales

$$P (\%) = \left(\frac{M_{deleznable}}{M_{total}} \right) * 100$$

Donde:

P: Porcentaje de terrones de arcillas y partículas deleznales.

Mdeleznable: Masa deleznable de la muestra ensayada [g].

Mtotal: Masa total de la muestra ensayada [g].

El contenido máximo aceptable es de 3%.

Nota: Ecuación 7. Adaptada de la norma INV E-211 (INVÍAS, 2013c).

3.1.3.4. Color más oscuro permisible.

La norma por la cual se rige es INV E-212 (INVÍAS, 2013f). Este ensayo permite detectar las impurezas orgánicas presentes en el agregado fino que pueden afectar la resistencia y calidad de la mezcla. Se mezcla el agregado fino en una solución de hidróxido de sodio y se deja por 24 horas; se compara el color de la solución resultante con un color estándar. El criterio de aceptación es un color resultante más claro que el color estándar.

3.1.4. Peso específico y absorción de la arena fina.

Este ensayo fue realizado bajo los lineamientos de la norma INV E 128-13, método B (INVÍAS, 2013g). Una absorción baja indica una estructura interna densa y con pocos poros, lo cual favorece la durabilidad del material y permite una dosificación adecuada.

Para el procedimiento, se utilizó una muestra considerable de agregado fino en condición de saturado superficialmente seco (S.S.S.), un picnómetro y una balanza con precisión de 0.05 g.

Se realizaron los siguientes pesajes: masa del picnómetro más agua hasta la marca de aire, masa de la muestra, masa de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca de aire, y masa de la muestra seca al horno. Se calculó la gravedad específica con la Ecuación 8, mientras que para la absorción de agua se utilizó la Ecuación 9.

Ecuación 8.

Gravedad específica aparente S.S.S

$$\text{Gravedad específica aparente S.S.S} = \frac{B}{(A - C + C)}$$

Ecuación 9.

Porcentaje de absorción

$$\% \text{ de absorción} = \frac{(B - D) * 100}{C}$$

Donde:

B: Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire.

A: Peso del frasco + agua hasta la marca en el aire.

C: Peso de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca en el aire.

E: Peso de la muestra secada al horno.

Nota: Ecuaciones 8 y 9. Adaptadas de la norma INV E 128-13, método B (INVÍAS, 2013g).

3.1.5. Ensayo de peso unitario de la arena fina.

Este ensayo se realizó bajo los lineamientos de la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019). Para este procedimiento se utilizó una muestra considerable de agregado fino en condición S.S.S y un molde metálico que contiene un vidrio calibrado. El volumen de este se calculó con base en la

diferencia de masa del molde metálico con vidrio y el molde metálico con vidrio más agua. Este cálculo se realizó con la Ecuación 10.

Ecuación 10.

Volumen del molde

$$\text{Volumen del molde} = \frac{P2 - P1}{1000}$$

Donde:

P2: Peso del molde más vidrio [g].

P2: Peso del molde más vidrio más agua [g].

1000: Convertidor de unidades.

Nota: Ecuación 10. Adaptada de la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).

Una vez con el volumen, se llenó el molde con material, primero con el agregado suelto y después con el agregado compactado; se hicieron los pesajes correspondientes, lo cual permitió calcular el peso en ambas condiciones, para el peso unitario del agregado S.S.S. suelto con la Ecuación 11 y para el peso unitario del agregado S.S.S. compactado con la Ecuación 12.

Ecuación 11.

Peso unitario del agregado S.S.S. Suelto

$$\text{Peso unitario del agregado s.s.s suelto} = \frac{Pc - Pm}{V}$$

Ecuación 12.

Peso unitario del agregado S.S.S compactado

$$\text{Peso unitario del agregado s.s.s compactado} = \frac{Ps - Pm}{V}$$

Donde:

P_m: Peso del molde [g].

P_c: Peso del molde+ material saturado superficialmente seco compactado [g].

P_s: Peso del molde +material saturado superficialmente seco suelto [g].

V: Volumen del molde [dcm³].

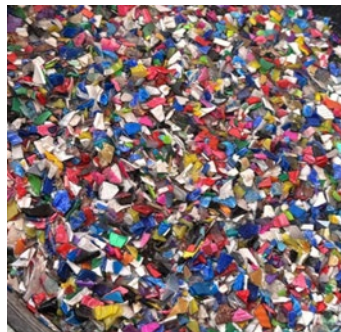
Nota: Ecuaciones 11 y 12. Adaptadas de la norma NTC 92 (ICONTEC, 2019).

3.2. Caracterización del polietileno alta densidad (PEAD).

Para este proyecto, el PEAD fue adquirido en la empresa Replasander Ltda. (Replasander LTDA, s.f.), la cual lo entrega triturado con un tamaño aproximadamente de 5 mm, como se muestra en la Figura 2. No se hizo granulometría, ya que se concluyó que el tamaño es indiferente debido a que el PEAD se funde completamente actuando como material cementante.

Figura 2.

PEAD triturado.



Nota: Elaboración propia.

3.2.1. *Peso específico del PEAD*

Este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la norma INV E 128-13 método B (INVÍAS, 2013g). Reemplazando la arena por el PEAD; esto es necesario para determinar el volumen de

PEAD que debe contener cada probeta y así determinar las cantidades necesarias para la mezcla de diseño.

Para el procedimiento, se utilizó una muestra pequeña del plástico en condición de saturado superficialmente seco (S.S.S.) (secado con una toalla), un picnómetro y una balanza con precisión de 0.01 g. Se realizaron los siguientes pesajes: masa del picnómetro más agua hasta la marca de aire, masa de la muestra, masa de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca de aire, y masa de la muestra seca al horno a 110 ± 5 °C, se calcula la gravedad específica con la Ecuación 13. Anexo B.

Ecuación 13.

Gravedad específica aparente S.S.S

$$\text{Gravedad específica aparente S.S.S} = \frac{B}{(A - C + C)}$$

Donde:

B: Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire [g].

A: Peso del frasco + agua hasta la marca en el aire [g].

C: Peso de la muestra en el frasco y agua agregada hasta la marca en el aire [g].

E: Peso de la muestra secada al horno [g].

Nota: Ecuación 13. Adaptada de la norma INV E 128-13 método B (INVÍAS, 2013g).

3.2.2. Fluencia del PEAD.

Para evidenciar la temperatura de fluencia, se preparó una muestra de 10 gramos de PEAD en un recipiente de aluminio. Esta se introdujo en un horno tipo mufla calibrado previamente a una temperatura inicial de 130°C con ayuda de un termómetro; la temperatura se incrementó en intervalos de 10°C cada 10 minutos, observando y anotando el comportamiento del material. El

ensayo se detuvo en el momento en que el plástico empezó a degradarse y emitir gases. Apéndice B.

3.3. Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto

Para esta etapa del proyecto, fue esencial determinar el volumen promedio de tres moldes cilíndricos el cual se utilizó para el diseño de la mezcla.

3.3.1. Cálculo del volumen de los moldes.

Para determinar el volumen de los moldes cilíndricos, se midió el diámetro siguiendo el protocolo descrito en el Apéndice C. para el cálculo, se utilizó la Ecuación 14.

Ecuación 14.

Volumen promedio de los moldes

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D_{pro}}{2}\right)^2 * h_{pro}$$

Donde:

V: volumen promedio de los moldes [cm³].

D_{pro}: diámetro promedio de los tres moldes [cm].

h_{pro}: altura promedio de los tres moldes [cm].

Nota: Ecuación 14. Adaptada del libro Stewart, J. (2013).

Por razones prácticas para los cálculos se utilizó una altura inicial del molde mayor a la altura final de las probetas, ya que posteriormente se compactó la mezcla con ayuda un pistón y un gato hidráulico modificado, buscando alcanzar la relación 2:1 (altura/diámetro).

3.3.2. Dosificación de materiales.

La dosificación de arena y PEAD se determinó considerando el volumen del molde a llenar y el peso específico suelto (Υ) de cada material. Se optó por utilizar el volumen sin compactar para asegurar que la mezcla inicial ocupara la capacidad del recipiente antes de cualquier proceso de consolidación con el fin de garantizar que la mezcla se ajustara a la capacidad del molde y que la proporción reflejara las características reales de los componentes. Se calculó la masa del material con la Ecuación 15.

Ecuación 15.

Masa de cada material

$$m = V * \Upsilon$$

Donde:

m: Masa [g].

V: Volumen del molde [cm³].

Υ : Peso específico de cada material [g/cm³].

Nota: Ecuación 15. Adaptada del libro Stewart, J. (2013).

La proporción volumétrica de PEAD y arena se definió en incrementos del 5%, comenzando con una mezcla de 10% de PEAD y 90% de arena, hasta llegar a la dosificación óptima que garantizara el mejor desempeño del material.

Para el cálculo de la masa del PEAD se empleó la Ecuación 16 y para el cálculo de la masa de la arena la Ecuación 17.

Ecuación 16.*Masa del PEAD*

$$m_{PEAD} = V * Y_{PEAD} * P_{PEAD}$$

Donde:

m(PEAD): Masa del PEAD [g].**V:** volumen del molde [cm³].**Y_{PEAD}:** Peso específico del PEAD [g/cm³]**P(PEAD):** Proporción volumétrica del PEAD [%]**Ecuación 17.***Masa de la arena*

$$m_{arena} = V * Y_{arena} * P_{arena}$$

Donde:

V: Volumen del molde [cm³]**Y_{arena}:** Peso específico de la arena [g/cm³]**P_{arena}:** Proporción volumétrica de la arena [%]

Nota: La Ecuación 16 y 17 masa de los materiales. Fuente. Elaboración propia basadas del libro Stewart, J. (2013).

3.3.3. Elaboración de las probetas**3.3.3.1. Moldeado de probetas**

Se fabricaron tres probetas por dosificación; la masa total de cada material (arena y PEAD) se dividió en 4 porciones para garantizar una mezcla homogénea en capas sucesivas. El molde fue previamente engrasado para evitar que el material se adhiriera a sus paredes. Se depositó en el horno

acondicionado a la temperatura modelo para que, al momento de depositar la primera capa, el material se fusionara rápidamente.

Cada capa se introdujo al molde, dentro del horno tipo mufla a una temperatura controlada durante 15 minutos, con intervalos de 5 minutos en los que se retiraba el molde para mezclar el material y asegurar la fusión parcial del PEAD con la arena. Con ayuda de un termómetro se aseguró que cada capa estuviera a la temperatura modelo u óptima. Apéndice B.

3.3.3.2. Compactación

Una vez colocadas las cuatro capas en el molde, se aplicó un proceso de compactación utilizando un gato hidráulico adaptado. Colocando un dispositivo tipo pistón en la parte superior del molde para conseguir la altura deseada. Como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Compactación de las probetas



En la imagen se observa el proceso de compactación de las probetas, realizado con ayuda de un pistón y un gato hidráulico. Nota: Elaboración propia.

3.3.3.3. Desencofrado y toma de mediciones.

Una vez finalizado el proceso de compactación, se esperó durante un periodo de 20 minutos con el fin de garantizar el enfriamiento y estabilización térmica del material; posteriormente, se procedió a retirar el anillo superior y el pistón del molde. Para desmoldarlo, se empleó el gato

hidráulico; finalmente, se registró la masa de cada probeta y se realizaron las mediciones de altura y diámetro, conforme al protocolo de caracterización dimensional establecido en el Anexo D.

3.3.4. Ensayo de compresión.

Cada probeta fue sometida a ensayo de compresión con el objetivo de identificar la dosificación con mayor resistencia. Se decidió realizar los ensayos en la “prensa convencional”, seleccionada por su facilidad de uso y disponibilidad frente a la máquina universal electromagnética MTS-Exceed y en la máquina de compresión digital KONTROL MULTILOADER. Esta decisión se sustentó en que, al comparar previamente los resultados con una dosificación de 15% de PEAD en las tres máquinas, se comprobó la confiabilidad y consistencia de los valores registrados, lo que permitió adoptar la prensa como equipo principal de ensayo de probetas.

Antes del ensayo se verificó la limpieza y la alineación de las caras de las probetas, garantizando un contacto uniforme con las platinas de carga y así evitar excentricidades. El ensayo se realizó bajo control de carga continua hasta alcanzar la rotura de la probeta. Apéndice B.

Los datos obtenidos corresponden a la fuerza máxima soportada por cada muestra expresada en kilonewtons (kN). Para interpretar los resultados, fue necesario convertir la fuerza máxima en esfuerzo (σ), de acuerdo con la Ecuación 18.

Ecuación 18.

Esfuerzo de las probetas

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

σ : Esfuerzo de las probetas aplicado [MPa]

F: Carga máxima aplicada[N]

A: Área de la sección transversal de la probeta [mm²]

El área se calculó en función del diámetro promedio de cada probeta utilizando la ecuación 19.

Ecuación 19.

Área de la sección transversal de las probetas

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donde:

A: Área de la sección transversal de las probetas [mm²]

D: es el diámetro promedio de las probetas [mm]

Nota: Ecuación 18 y 19. Adaptadas de Hibbeler, R. C. (2017).

3.4. Dosificación óptima.

Se empleó una técnica de optimización por barrido paramétrico (variación sistemática de porcentajes), se identificó la dosificación con mayor resistencia mecánica. Con el fin de validar estadísticamente este punto óptimo experimental, se ensayaron tres probetas adicionales para confirmar la reproducibilidad de los resultados y reforzar la validez de la resistencia alcanzada; se procedió a realizar un análisis estadístico de los resultados (media aritmética; Ecuación 20, desviación estándar; Ecuación 21 y coeficiente de variación; Ecuación 22) con el fin de evaluar la dispersión y consistencia de los valores registrados.

Ecuación 20.*Media aritmética*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_i^n x_i$$

Donde:

 \bar{x} : Media aritmética de los resultados [MPa]**n**: Número de probetas ensayadas**xi**: Valor de la resistencia obtenida en la probeta i [MPa]**Ecuación 21.***Desviación estándar*

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

S: Desviación estándar [MPa]**n**: Número de probetas ensayadas**xi**: Resistencia individual de cada probeta [MPa] \bar{x} : Media aritmética [MPa]**Ecuación 22.***Coefficiente de variación*

$$CV = \left(\frac{S}{\bar{x}} \right) * 100$$

Donde:

CV: Coeficiente de variación [%]

S: Desviación estándar [MPa]

\bar{x} : Media aritmética [MPa]

Nota: Las Ecuaciones 20, 21 y 22: validación estadística. Fuente. Adaptadas de Devore, J. L. (2016).

Un CV bajo indica que los valores están ubicados cerca de la media, mientras que un CV alto refleja mayor dispersión.

3.4.1. Probetas elaboradas con variación de temperatura

Todas las probetas fueron elaboradas inicialmente bajo una temperatura considerada óptima (220°C), garantizando condiciones homogéneas de mezcla. Posteriormente, una vez realizadas las pruebas de resistencia a la compresión y determinada la dosificación seleccionada, correspondiente a la mezcla que presentó el mayor desempeño mecánico, se completó el estudio con la fabricación de nuevas probetas con la misma dosificación, pero variando la temperatura de moldeo: se elaboraron con un incremento de ± 10 °C respecto a la temperatura de referencia.

Estas probetas adicionales fueron ensayadas con el fin de evaluar si la resistencia mecánica se mantenía constante o presentaba variaciones significativas en función de la modificación térmica aplicada.

3.5. Fabricación de los adoquines.

Con base en los resultados experimentales y en las mediciones efectuadas sobre las probetas cilíndricas correspondientes a la dosificación óptima de arena y PEAD, se determinó la densidad promedio de las muestras. Este parámetro se estableció como referencia para el proceso

de fabricación de los adoquines, con el propósito de garantizar una densidad homogénea en los adoquines producidos y, de este modo, asegurar la reproducibilidad y equivalencia de sus propiedades mecánicas respecto a las probetas ensayadas. Para ello se emplearon las Ecuación 23 y la Ecuación 24.

Ecuación 23.

Volumen de la probeta

$$\text{volumen de la probeta} = \frac{\pi * D_{prom}^2}{4} * h_{prom}$$

Donde:

D_{prom}: Diámetro promedio de las probetas [mm]

h_{prom}: altura promedio de las probetas [mm]

Ecuación 24.

Densidad del material

$$\text{Densidad de la probeta} = \frac{\text{masa de la probeta}}{\text{volumen de la probeta}}$$

Nota: Ecuaciones 23 y 24. Adaptadas de Hibbeler, R. C. (2017).

3.5.1. Proyección de la masa para el adoquín

El adoquín proyectado para fabricar presenta dimensiones de 23x11x5 cm, lo que corresponde a un volumen de 1265 cm³ como se aprecia en la ecuación 25.

Ecuación 25.

Volumen del adoquín

$$\text{Volumen del adoquín} = 23 * 11 * 5 = 1265 \text{cm}^3$$

Nota: Ecuación 25. Adaptadas de Hibbeler, R. C. (2017).

La masa objetivo se obtuvo al multiplicar el volumen del adoquín por la densidad promedio determinada en las probetas, utilizando la Ecuación 26.

Ecuación 26.

Masa del adoquín

$$Masa\ del\ adoquin = \rho * V_{Adoquin}$$

Donde:

ρ : densidad promedio de las probetas

Vadoquín: volumen proyectado del adoquín

Nota: Ecuación 26. Adaptadas de Hibbeler, R. C. (2017).

Se determinó que la pérdida de material en las probetas durante el proceso de mezclado era de aproximadamente 2%; por lo tanto, se tuvo en cuenta este porcentaje adicional en el cálculo de la masa objetivo para así garantizar la reproducibilidad y equivalencia en la densidad buscada.

3.5.2. Dosificación del material

La masa correspondiente a cada componente en la elaboración de los adoquines se calculó a partir de la proporción previamente definida en las probetas, ajustando las cantidades en función del peso total requerido para cada molde. De esta manera, se garantizó que la mezcla mantuviera la misma relación de materiales, aunque el proceso de compactación fuera distinto, asegurando coherencia en la dosificación y comparabilidad en los resultados obtenidos. Para el cálculo de la masa objetivo de arena y PEAD se utilizaron las Ecuaciones 27 y 28 respectivamente.

Ecuación 27.

Masa de PEAD objetivo

$$M_{PEAD} = M_{TOTAL} * P_{PEAD}$$

Ecuación 28.

Masa de arena objetivo

$$M_{ARENA} = M_{TOTAL} * P_{ARENA}$$

Donde:

M(PEAD): Masa de PEAD objetivo [g]

P(PEAD): Porcentaje en peso de PEAD [%]

Parena: Porcentaje en peso de arena [%]

Marena: Masa de arena objetivo [g]

Nota: La Ecuación 27 y 28 masa de los materiales. Fuente. Elaboración propia basadas en Stewart, J. (2013).

Finalmente, la mezcla total se dividió en tres partes iguales para facilitar el proceso de moldeo.

3.5.2.1. Moldeado, compactación y mezclado.

EL molde previamente engrasado se depositó en el horno ya acondicionado a la temperatura objetivo para que, al depositar la primera capa de material, se fusionara rápidamente.

Cada capa introducida en el molde se mezcló con intervalos de 5 minutos en los que se retiraba el molde del horno para mezclar el material y asegurar la fusión parcial del PEAD con la

arena. Después de aproximadamente 15 minutos transcurridos, se depositó la siguiente capa de material y se repitió el proceso hasta finalizar con el depósito de todo el material. Finalmente, se introdujo una tapa metálica en el molde y, con la ayuda de una prensa de banco, se aplicó fuerza a compresión hasta alcanzar la altura dimensional para la cual fue diseñado el molde.

Todo este proceso se puede evidenciar en el registro fotográfico del Anexo F.

3.5.2.2. Desencofrado del adoquín.

Se dejó un tiempo prudente de aproximadamente 25 minutos, en los cuales el material alcanzó el enfriamiento y la estabilización térmica. Se procedió al desmolde con mucho cuidado, ya que en algunos casos pequeñas cantidades de PEAD, al fundirse, quedaban adheridas a las paredes laterales del molde y causaban que el adoquín quedara con muescas o se rompiera al momento del desencofrado.

3.5.3. Medición de dimensiones y cálculo de densidad del Adoquín.

Se le realizó toma de medidas dimensionales a cada espécimen y se procedió a calcular la densidad promedio de los adoquines con el fin de comprobar su equivalencia con el promedio de las probetas. Ecuación 28. Comprobado así el análisis planteado.

Ecuación 29.

Densidad promedio del adoquín

$$\text{Densidad del adoquín} = \frac{\text{masa de la adoquín}}{\text{volumen del adoquín}}$$

Nota: Ecuación 29. Adaptadas de Hibbeler, R. C. (2017).

3.6. Ensayos a los adoquines.

Para la fase final del proyecto, los adoquines fueron sometidos a ciertos ensayos buscando cumplir con los requisitos de calidad del Artículo 510 establecidos en el Manual de Especificaciones para pavimentos de adoquines del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022) y normas técnicas empleadas para estos ensayos. Este procedimiento se puede apreciar en el registro fotográfico del Anexo F.

3.6.1. Ensayo a compresión.

Este ensayo se realizó en la máquina universal MTS Exceed, siguiendo la metodología descrita en la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2018). Los especímenes se colocaron centrados en la platina de carga y se aplicó un esfuerzo axial a una velocidad constante hasta la falla, registrando la carga máxima (kN) Como se observa en la Figura 4. Para calcular la resistencia a la compresión (MPa), se utilizó la Ecuación 18.

Figura 4

Ensayo a compresión de los adoquines



La imagen muestra la disposición empleada para la realización del ensayo de compresión en la MTS. Nota: Elaboración propia.

3.6.2. Ensayo a flexo tracción.

Se ejecutó conforme a los lineamientos estipulados en la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2018). Los adoquines fueron sumergidos en agua por 24 horas antes del ensayo; las piezas se deben ensayar en estado SSS (Saturado Superficialmente Seco). Se utilizó el método de carga en tres puntos en la máquina universal MTS. Ver Figura 5. Determinando la carga de rotura a una velocidad constante y calculando la resistencia a la flexión mediante la Ecuación 30.

Ecuación 30.

Resistencia a flexo tracción

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde

σ_f : Esfuerzo de rotura por flexión [MPa].

P: Carga de rotura [N].

L: Luz entre apoyos [mm].

b: Ancho de la viga/probeta [mm].

d: Altura (espesor) de la sección [mm].

Nota: Ecuación 30. Adaptada de Norma Técnica Colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2018).

Figura 5

Ensayo a flexo tracción de los adoquines



La imagen muestra la disposición empleada para la realización del ensayo de compresión en la MTS. Nota: Elaboración propia.

3.6.3. Absorción de agua.

El procedimiento empleado para este ensayo se hizo bajo los lineamientos de la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2018). Tras el proceso de desmolde, los adoquines fueron pesados en estado caliente utilizando una balanza con una precisión de 1 g. Una vez se enfriaron, fueron sumergidos durante 24 h en un tanque con agua dentro de un cuarto con temperatura controlada. Ver Figura 6.

Luego de este periodo de saturación, se deben secar con un paño, para obtener la masa saturada del espécimen. Para calcular la absorción se utilizó la Ecuación 31.

Ecuación 31.

Absorción de agua de los adoquines

$$\% \text{absorción de agua} = \frac{M_{SAT} - M_{SEC}}{M_{SEC}}$$

Donde:

M_{SAT} : Masa saturada [g]

M_{SEC} : Masa seca [g]

Nota: Ecuación 30. Adaptada de la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 (ICONTEC, 2018)

Figura 6

Ensayo absorción de agua de los adoquines



La imagen muestra la disposición empleada para la realización del ensayo de absorción.

Nota: Elaboración propia.

3.6.4. Ensayo de desgaste o abrasión.

Para evaluar la resistencia a la abrasión de los adoquines, se empleó el procedimiento descrito en la Norma Técnica Colombiana NTC 5147 (ICONTEC, 2004), el cual establece las condiciones para determinar la pérdida de espesor por desgaste bajo la acción de un disco abrasivo. Sin embargo, debido a la ausencia del equipo requerido en el laboratorio de la universidad, las pruebas debieron ser enviadas a un laboratorio externo acreditado, garantizando que el ensayo se

realizara conforme a los lineamientos normativos y bajo condiciones controladas, con el fin de obtener resultados confiables y comparables.

4.Resultados

4.1. Caracterización de la arena

4.1.1. Granulometría.

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS, (CIVIL ENGINEERING TUTORIALES, 2020), el agregado fino proveniente del río Chicamocha se clasifica como pobremente gradado (SP), ya que el porcentaje de finos es inferior al 5%, el coeficiente de curvatura menor a 1 (0.71) y el coeficiente de uniformidad menor a 6 (3.89). En la Tabla 3 se detalla la composición granulométrica de la arena fina utilizada. Asimismo, en la Figura 7 se ilustra la curva granulométrica resultante, permitiendo contrastar la distribución de partículas del material frente a los límites normativos establecidos.

Tabla 3.

Granulometría de la arena.

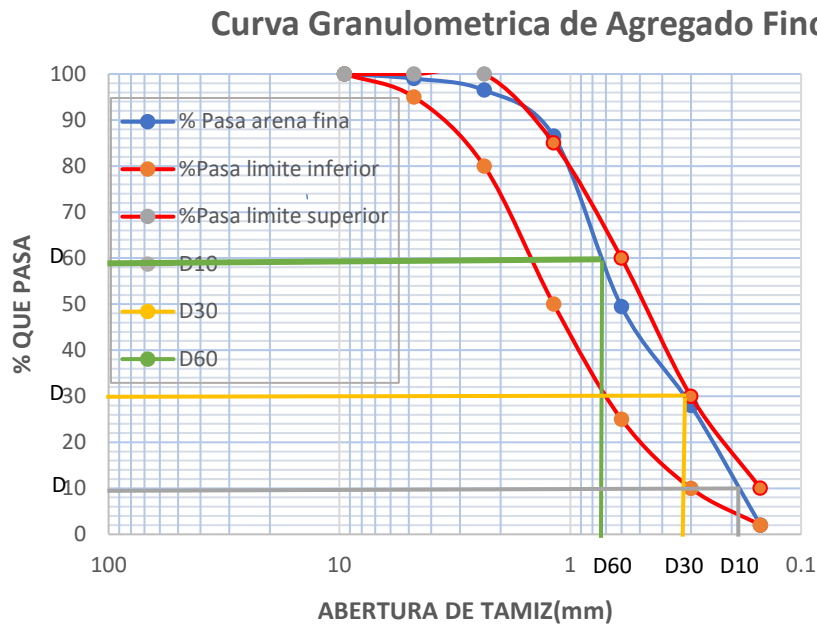
Tamiz NTC 32	Unidad(mm)	Peso del suelo retenido (g)	% Retenido parcial	% Retenido acumulado	% pasa	% Pasa Normativa
3/8				0	100	100
No 4	4.75	10	1	1	99	95
No 8	2.36	25	2.5	3.5	96.5	80
No 16	1.18	100	10	13.5	86.5	50
No 30	0.6	370	37	50.5	49.5	25
No 50	0.3	215	21.5	72	28	10
No 100	0.15	260	26	98	2	2
Fondo		20	2	100	0	0
Total		1000	100			

Gravas=0.1% Arenas=97% Finos=2%

Nota: Los valores Gravas (0.1%), Arenas (97%) y Finos (2%) definen la proporción de cada fracción granulométrica dentro de la muestra total ensayada. Nota: Elaboración propia.

Figura 7

Granulometría de la arena fina



Nota: Elaboración propia.

En la figura se muestra la granulometría de la arena fina, con comparación frente a los límites granulométricos establecidos en el Artículo 500 (INVIAS,2017).

4.1.1.1. Material que pasa el tamiz No 200.

Se obtuvo un resultado aceptable (2.17%), en la Tabla 500.2 del Artículo 500 (Pavimentos de concreto hidráulico) del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022) lo que indica que el material

no presenta cantidad excesiva de finos; por tanto, no compromete la trabajabilidad y resistencia del producto final (adoquín). En la Tabla 4 se presentan los resultados.

Tabla 4.

Resultados ensayo pasa No 200.

Masa inicial (g)	Masa final después de lavar y secar	% que pasa
600	587	2.17

Nota: Elaboración propia.

4.1.2. Módulo de finura

El módulo de finura obtenido fue de 3.3, un poco por encima de lo establecido en el Artículo 500 (Pavimentos de concreto hidráulico) del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022); en este proyecto no representa una limitación, ya que al trabajar con PEAD como ligante se busca más el desempeño real de la mezcla que el cumplimiento estricto del rango granulométrico.

4.1.3. Requisitos de calidad

4.1.3.1. Durabilidad- Ensayo de solidez de sulfatos.

De las fracciones granulométricas analizadas se observa una creciente pérdida de masa con la disminución del tamaño de partícula. Esto indica que las partículas más finas son más susceptibles a la acción del sulfato de magnesio.

La pérdida total fue de 9.25%, valor que se encuentra dentro de los criterios de aceptación (15%) de la norma INV.-E 220 (INVÍAS, 2013), para sulfato de magnesio. Lo que sugiere que el agregado fino posee buena resistencia a la desintegración por acción de químicos. En la Tabla 5 se presentan los resultados del ensayo.

Tabla 5.*Resultados ensayo INV E-220.*

Tamaño tamiz	Unidad (mm)	Masa de las fracciones antes del ensayo(g)	Masa de las fracciones después del ensayo(g)	Pérdida ponderada (%)
No 4	4.75			
No 8	2.36	100	100	0
No 16	1.18	100	91.5	8.5
No 30	0.6	100	88.5	11.5
No 50	0.3	100	89	11
No 100	0.15			
				9.25

Nota: Elaboración propia.

4.1.3.2. Limpieza- Ensayo equivalente de arena.

En la tabla 3 se presenta el valor promedio registrado durante las dos fases del ensayo. Se observa que el resultado, 68%, está por encima del criterio mínimo de aceptación (60%.) de la norma INV. E-133(INVÍAS, 2013a). En la Tabla 6 se presentan los resultados del ensayo.

Tabla 6.*Resultados ensayo equivalente de arena.*

Ensayo 1		Ensayo 2	
H arena(in)	2.6	H arena(in)	2.7
H arcilla(in)	3.8	H arcilla(in)	4
% Eq =	69	%Eq =	67
%Eq arena =		68%	

Nota: Elaboración propia.

4.1.3.3. Ensayo contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable.

A partir del ensayo de partículas deleznable, se registró una masa inicial de 30 g y una masa final de 29.52 g, lo que evidencia una ligera pérdida de material durante el proceso. El contenido de partículas deleznable obtenido fue de 1.6 %, indicando un bajo grado de desintegración del material analizado.

El resultado (3%), se encuentra en los límites permisibles en la Tabla 500.2 (Requisitos del agrado fino para pavimentos de concreto hidráulico) del Artículo 500 (Pavimentos de concreto hidráulico) del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022).

4.1.3.4. Ensayo color más oscuro permisible.

En la figura 8. Se evidencia que el agregado fino presenta niveles aceptables de materia orgánica en el Artículo 500 (Pavimentos de concreto hidráulico) del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022). El color del agua es igual al nivel 1 de la placa. Esto la hace apta para la elaboración del producto final (adoquín).

Figura 8

Ensayo materia orgánica



La imagen muestra el procedimiento de determinación de materia orgánica en la muestra de arena, utilizando un comparador colorimétrico de referencia. Nota: elaboración propia.

4.1.4. *Peso específico y absorción de la arena del agregado fino.*

Como resultado de este ensayo se obtuvo una gravedad específica de (2.69) y una absorción de (0.73); esto indica una densidad típica de agregados utilizados en construcción y una absorción menor a 7.5%. Esto lo hace un material apto para el proceso de fabricación del adoquín. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Peso específico y absorción de la arena

Peso del frasco+agua hasta la marca de aire. (g)	653
Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire. (g)	500
Peso de la muestra. Frasco y agua agregada hasta la marca de, en el aire. (g)	963
Peso de la muestra secada al horno. (g)	493
Gravedad específica real.	2.69
Gravedad específica aparente.	2.59
Gravedad específica aparente S.S.S.	2.63
% de absorción	0.73

Nota: Elaboración propia.

4.1.5. *Peso unitario de la arena.*

Este ensayo arrojó un valor de 1,4 kg/m³ correspondiente al peso por unidad de volumen; este es fundamental para el diseño de la mezcla de arena y PEAD, ya que permite calcular la cantidad de material necesario para obtener una densidad adecuada. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.*Peso unitario de la arena.*

Peso del molde vacío + vidrio(g)	4020
Peso del molde + vidrio + agua(g)	6844
Volumen del molde (dcm ³)	2.824
Peso del molde vacío(g)	2552
Peso del molde + material S.S.S compactado(g)	7090
Peso del molde + material S.S.S suelto(g)	6515
Peso unitario del agregado S.S.S compactado (Ka/m ³)	1.6
Peso unitario del agregado S.S.S suelto (Ka/m ³)	1.4

Nota: Elaboración propia.

4.2. Caracterización del (PEAD).**4.2.1. Peso específico.**

El PEAD fue caracterizado en términos del peso específico, obteniendo un valor de (0.93), el cual se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para este material (MECYPLASTEC Engineering Plastics, s.f.). Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9.*Peso específico del PEAD.*

Peso del frasco+agua hasta la marca de aire. (g)	653
Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire. (g)	50
Peso de la muestra. Frasco y agua agregada hasta la marca de, en el aire. (g)	649
Peso de la muestra secada al horno. (g)	49.2
Gravedad específica real.	0.93
Gravedad específica aparente.	0.94
Gravedad específica aparente S.S.S.	0.95
% de absorción	

Nota: Elaboración propia.

4.2.2. Fluencia

La temperatura de fusión del PEAD determinada en esta prueba fue de 220 °C, se descubrió que con esta los materiales se mezclaban de manera rápida y homogénea sin que el PEAD se degrade. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.

Fluencia del PEAD.

Temperatura	Tiempo(min)	observaciones	¿ablandamiento?
130	5	no ha iniciado la fluidez	no
140	5	no ha iniciado la fluidez	no
150	5	no ha iniciado la fluidez	no
160	5	ligero derretimiento	no
170	5	se empieza a derretir lentamente	si
180	5	continúa derritiéndose lentamente	si
190	5	continúa derritiéndose lentamente	si
200	5	significativo derretimiento	si
210	5	empieza a emitir un poco de humo	si
220	5	se derrite por completo y presenta buena fluidez	si
230	5	empieza a degradarse el plástico	si

La tabla muestra el comportamiento del PEAD frente a diferentes temperaturas, indicando el inicio del ablandamiento, la aparición de fluidez y el punto de degradación del material. Nota: Elaboración propia.

4.3. Elaboración y ensayo de las probetas de material compuesto.

En la Figura 9, se muestra el proceso de elaboración de las probetas, que incluyó la preparación de los moldes, el llenado y compactación del material, y finalmente el desmoldeo para obtener las muestras cilíndricas.

Figura 9*Proceso de elaboración de probetas*

Nota: Elaboración propia.

4.3.1. Volumen promedio de los moldes

El valor resultante de volumen de los moldes que se usó para los cálculos de la dosificación fue de 292.6 cm³. Los resultados del ensayo se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.*Volumen promedio de los moldes*

Díámetro prom (mm)	50.52
Altura prom (cm)	14.6
Volumen (cm ³)	292.6

Nota: Elaboración propia.

4.3.2. Dosificación de los materiales.

La dosificación estuvo basada en función del volumen del molde y el peso específico determinados para la arena y el (PEAD). Con base en esto se calculó la masa de cada material en diferentes dosificaciones de proporción volumétrica.

El proceso de dosificación comenzó con una mezcla de 10 % de PEAD y 90 % de arena, aumentando el contenido de PEAD en intervalos del 5 %. A cada una de estas mezclas se les realizaron ensayos de compresión, cuyos resultados se mostrarán más adelante. En un inicio, se observó que al incrementar la proporción de PEAD también aumentaba la resistencia, hasta alcanzar su punto máximo con la dosificación de 25 % de PEAD y 75 % de arena. Sin embargo, al llegar al 30 % de PEAD, la resistencia disminuyó en comparación con la mezcla anterior. Para comprobar este comportamiento, se fabricaron probetas adicionales con un 27,5 % de PEAD, confirmando que no superaban en resistencia a la dosificación del 25 %. Con esto se estableció que la dosificación idónea para el estudio correspondía a 25 % de PEAD y 75 % de arena. Anexo D. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12.

Masa de material por cada dosificación.

PEAD (%)	Arena (%)	Masa de PEAD(g)	Masa arena(g)
10	90	27.51	368.76
15	85	41.27	348.27
20	80	55.02	327.78
25	75	68.78	307.3
27.5	72.5	75.65	297.05
30	70	82.53	286.81

La tabla presenta la dosificación de materiales empleada en la elaboración de las mezclas, expresada en términos porcentuales y en masa de cada componente (PEAD y arena). Nota: Elaboración propia.

4.3.3. Elaboración de las probetas

4.3.3.1. Moldeado

El material total se fraccionó en 4 porciones iguales, como se muestran en la Tabla 13, lo que facilitó el proceso de mezclado y moldeado sin generar pérdidas importantes, salvo una pequeña cantidad que quedó adherida a la barra de mezclado en la última capa. Para asegurar un buen comportamiento del material, el molde se calentó durante 15 minutos, de modo que la primera capa alcanzara la temperatura óptima de 220°C para la reacción, evitando al mismo tiempo que se derritiera la grasa utilizada como desmoldante.

Tabla 13.

Material fraccionado

PEAD (%)	Arena (%)	Masa de PEAD por capa (g)	masa de arena por capa(g)
10	90	6.88	92.19
15	85	10.32	87.07
20	80	13.76	81.95
25	75	17.19	76.82
27.5	72.5	18.91	74.26
30	70	20.63	71.70

La tabla presenta el fraccionamiento de material utilizado en cada dosificación, mostrando la masa de PEAD y de arena correspondiente a cada capa. Nota: Elaboración propia.

4.3.3.2. Compactación

Para lograr que la mezcla quedara uniforme y no se pegara en la base, se trabajó en cuatro ciclos de calentamiento de 15 minutos cada uno, lo que permitió que el material alcanzara una consistencia firme y fácil de manipular. Con ayuda de un taladro se vibró la muestra para sacar el

aire atrapado y evitar poros. El pistón ya contaba con un corte de referencia implementado en proyectos anteriores, lo que facilitó controlar la altura de compactación. Asimismo, se cuidó que el pistón ingresara de forma recta en el material y, para proteger el gato hidráulico del calor, se colocó un bloque de madera entre la probeta y el sistema a presión. Anexo D.

4.3.3.3. Desencofrado y toma de mediciones

Desde el inicio se aplicó una capa de grasa resistente a altas temperaturas que resultó esencial para poder desencofrar con mayor facilidad. Para retirar el molde, con el gato hidráulico, lo que permitió ejercer la fuerza suficiente para separarlo sin dañar la muestra. Aun así, quedó claro que en futuros trabajos este paso podría hacerse más sencillo si se emplea un material deslizante que no se mezcle con el compuesto.

4.3.4. Ensayo de compresión.

Al inicio se llevó a cabo una comparación entre las tres máquinas disponibles en el Laboratorio de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (UIS), para ensayos de compresión. La idea era asegurar que las tres ofrecieran respuestas mecánicas similares y, a partir de allí, elegir la más adecuada para el proyecto. En un primer momento se pensó en usar la máquina de compresión digital, pero fue necesario descartarla, ya que las probetas mostraron una resistencia considerable y, con el aumento de la dosificación, se esperaba que esta resistencia creciera aún más, superando la capacidad de dicha máquina. También se evaluó la máquina universal MTS-Exceed, pero no pudo utilizarse porque en ese momento estaba en uso y, además, su manejo resultaba más complejo. Finalmente, la mejor opción fue la prensa convencional, no solo porque ofrecía facilidad de operación, sino también porque arrojaba resultados de resistencia

comparables a los obtenidos con las otras máquinas. Con la desventaja de no obtener gráficos de esfuerzo vs. deformación. Anexo E. El ensayo realizado se presenta en la Figura 10.

Figura 10

Ensayo a compresión de las probetas



En la figura se observa la disposición de las probetas el ensayo de compresión realizado en la MTS y en la prensa convencional, correspondiente a la dosificación del 15 % de PEAD. Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 14, se presenta la comparación de resultados obtenidos en tres equipos de ensayo de compresión, considerando la dosificación del 15 %, donde se observan ligeras variaciones en la fuerza máxima alcanzada y el esfuerzo calculado.

Tabla 14.

Tabla comparativa en las tres máquinas (dosificación del 15%)

Equipo de ensayo	fuerza máxima F (kN)	área transversal A (mm ²)	Esfuerzo (MPa)
Prensa convencional	22.5	1968.28	11.43
Máquina universal electromagnética Exceded	MTS- 23.5	2001.26	11.74
Máquina de compresión digital KONTROL MULTILoader	24.35	2022.9	12.01

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 15, se muestran los resultados de compresión de la mezcla, lo que permite apreciar cómo respondieron las probetas y comparar el desempeño de esta dosificación con las demás.

Tabla 15.

Resultados de ensayo a compresión por dosificación.

Probeta	Dosificación (%PEAD)	Fuerza Max (kN)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (MPa)
1	15	22.5	1968.28	11.43	11.94
2		23.5	2001.24	11.74	
3		25.6	2022.91	12.66	
1	20	29.8	2002.1	14.88	16.23
2		34.2	2021.58	16.92	
3		33.8	2001.38	16.89	
1	25	41.1	2038.28	20.16	19.30
2		37.3	2031.82	18.36	
3		39.8	2055.19	19.37	
1	27,5	34.4	2020.72	17.02	16.87
2		35.9	2022.11	17.75	
3		32.1	2026.23	15.84	
1	30	36.9	1957.02	18.86	18.26
2		36.1	2014.41	17.92	
3		36.2	2011.96	17.99	

Nota: Elaboración propia.

4.4. Dosificación óptima.

La dosificación que alcanzó la mayor resistencia mecánica en los esfuerzos promedio fue la correspondiente al 25% de PEAD. En la Tabla 16 se presenta los resultados, se fabricaron seis probetas adicionales con el objetivo de corroborar dicho comportamiento, obteniéndose valores similares que confirmaron que esta dosificación es la que ofrece la mejor resistencia mecánica.

Tabla 16.*Dosificación óptima*

Probeta	Dosificación (%PEAD)	Fuerza Max (kN)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (MPa)
1		41.1	2038	20.16	
2	25	37.3	2032	18.36	19.3
3		39.8	2055	19.37	
4		41.6	2010	20.7	
5	25	37.4	2033	18.4	19.41
6		38.6	2019	19.12	

Nota: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de compresión de las seis probetas, se obtuvo una resistencia promedio de 19.35 MPa. La dispersión de los datos fue baja, con una desviación estándar cercana a 0.94 MPa y un coeficiente de variación de 4.57%, lo que significa que las muestras se comportaron de manera bastante uniforme. En otras palabras, las diferencias entre probetas fueron mínimas, lo cual refleja un proceso de fabricación estable y resultados confiables en términos de resistencia mecánica. Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17.*Análisis estadístico*

Probeta	Esfuerzo (Mpa)	Media	S	s2	CV (%)
1	20.16				
2	18.36				
3	19.37	19.35	0.94	0.884	4.569
4	20.7				
5	18.4				
6	19.12				

Nota: Elaboración propia.

4.4.1. Probetas realizadas con variación de temperatura

Las probetas elaboradas con un incremento de +10 °C respecto a la temperatura adoptada (220 °C) debieron ser descartadas, ya que el termoplástico sobrepasó ampliamente su punto de fusión, iniciando un proceso de degradación que generó fuertes olores potencialmente perjudiciales para la salud. En contraste, las probetas fabricadas con una disminución de -10 °C respecto a la temperatura adoptada (220 °C) presentaron dificultades en la fusión de los materiales, lo que hizo más lento y complejo el proceso de mezclado, ocasionando un mayor desperdicio de material. El tiempo promedio de elaboración se incrementó de 1 hora y 45 minutos a aproximadamente 4 horas, y además estas probetas mostraron una resistencia mecánica inferior. En la Figura 11 se muestra la degradación del termoplástico.

Figura 11

Degradación del termoplástico



La figura muestra la degradación del PEAD durante el ensayo, evidenciada por la emisión de humo como resultado de la exposición a altas temperaturas. Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 18, se presentan los resultados del ensayo a compresión de las probetas elaboradas con una reducción de 10 °C, respecto a la temperatura de fabricación seleccionada como óptima. Se evidencia una disminución en la respuesta mecánica en comparación con las probetas fabricadas a la temperatura de referencia.

Tabla 18.

Ensayo de probetas con reducción de temperatura

Probeta	Temperatura (°C)	Dosificación (%PEAD)	Fuerza Max (kN)	Área (mm ²)	Esfuerzo (MPa)	Promedio esfuerzo (MPa)
t1	210	25	32.7	2028.23	16.12	
t2	210	25	36.6	2048.47	17.87	16.61
t3	210	25	31.9	2012.4	15.85	

Nota: Elaboración propia.

4.5. Fabricación de los adoquines.

Se sacaron la densidad de las probetas que presentaron mejor desempeño mecánico para así poder igualar estas propiedades al adoquín. Como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19.

Fabricación de adoquines.

Probeta	Dosificación (%PEAD)	Volumen (cm ³)	Densidad [g/cm ³]	Densidad promedio [g/cm ³]
1		204.92	1.833	
2		203.6	1.865	
3	25	203.61	1.856	1.857
4		198.1	1.877	
5		202.42	1.844	
6		204.04	1.868	

Nota: Elaboración propia.

4.5.1. *Proyección de la masa para el adoquín*

El adoquín diseñado presenta dimensiones de $23 \times 11 \times 5$ cm (dimensiones del molde), lo que corresponde a un volumen de 1265 cm^3 . Considerando que la densidad objetivo para el material es de 1.857 g/cm^3 , se determinó que el peso teórico que debe alcanzar cada adoquín es de aproximadamente 2350 g. Sin embargo, al contemplar una pérdida aproximada del 2% de material durante el proceso de mezclado, se adicionó esta porción al cálculo inicial, obteniéndose un peso final de referencia cercano a 2400 g por unidad, valor que se adoptó para asegurar la reproducibilidad de las propiedades físicas y mecánicas del adoquín.

4.5.2. *Dosificación del material*

La dosificación seleccionada para los adoquines se mantuvo proporcional en función del peso y cantidad de material utilizado en las probetas seleccionadas como óptimas (25% PEAD), de acuerdo con la Tabla 15. La composición de estas probetas fue de 68.78 g de PEAD y 307.3 g de arena, para una masa total de 376 g. A partir de esta proporción se realizó el escalado de la mezcla, para alcanzar la masa objetivo de los adoquines, garantizando así la reproducibilidad de las propiedades, como se presenta en la Tabla 20.

Tabla 20.

Dosificación del material para el adoquín.

Componente	Masa probeta(g)	fracción (%)	Masa adoquín(g)
PEAD	68.78	18.29	439.02
Arena	307.3	81.73	1961.49
Total	376	100	2400

Nota: Elaboración propia.

4.5.2.1. Moldeado, compactación y mezclado

El material se divide en tres fracciones iguales de 146.3 g de PEAD Y 653.6 g de arena; de esta manera, la mezcla se pudo realizar de forma homogénea y sin desperdiciar demasiado material. Anexo F. La compactación se realizó de acuerdo con la metodología de este proyecto, como se puede apreciar en la Figura 12.

Figura 12

Compactación del adoquín



La figura muestra el proceso de compactación de los adoquines empleando una prensa de banco.

Nota: Elaboración propia.

4.5.2.2. Desencofrado del adoquín

Después de 25 minutos, el adoquín se desmoldeó fácilmente; sin embargo, hubo casos en los que el material quedaba adherido a las paredes laterales o a la base y se producía la ruptura de este.

En la Figura 13 se aprecia el proceso para la fabricación del adoquín.

Figura 13*Proceso inicial y resultado final de los adoquines*

Nota: Elaboración propia.

4.5.3. Medición de dimensiones y cálculos de densidad del adoquín.

Se calculó la densidad promedio de los adoquines. Ver Tabla 21. Con el fin de comprobar que fuera la misma que la de las probetas.

Tabla 21.*Medición de dimensiones y cálculos de densidad del adoquín.*

Muestra	Masa(g)	Densidad(g/cm ³)	Densidad promedio(g/cm ³)
A1	2346.9	1.855	
A2	2316.4	1.831	
A3	2333.4	1.845	
A4	2344.3	1.853	
A5	2386.6	1.887	
A6	2366.9	1.871	1.853
A7	2330.8	1.843	
A8	2334.1	1.845	
A9	2324.1	1.837	
A10	2349.3	1.857	
A11	2350	1.858	

Nota: Elaboración propia

Se tomaron 11 adoquines y se determinó la densidad con un valor objetivo de 1.857 g/cm³. Todas las mediciones se encuentran dentro del rango $\pm 2\%$ del objetivo. La media muestral es 1.8529 g/cm³ con un intervalo de confianza de (IC 95%: 1.8423–1.8635 g/cm³) y el coeficiente de variación es 0.85%. Con base en estos resultados, y considerando la baja dispersión y la ausencia de valores fuera de $\pm 2\%$, se adoptó $\pm 2\%$ como criterio de aceptación para la densidad en este proceso. El criterio de aceptación de $\pm 2\%$ en la densidad se adoptó porque todas las muestras se mantuvieron dentro de este rango, mostrando uniformidad y baja dispersión en los resultados.

4.6. Ensayos a los adoquines.

4.6.1. Ensayo a compresión

Durante los ensayos de compresión realizados en la máquina MTS, fue aplicada una tasa de deformación constante de 5 mm/min sobre los 5 especímenes escogidos, tal como lo exige el Artículo 510 establecidos en el Manual de Especificaciones para pavimentos de adoquines del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022), lo que permitió obtener resultados confiables sobre el comportamiento mecánico de las probetas. Los valores de resistencia se muestran en la Tabla 22, estos están dentro de lo esperado.

Tabla 22.

Resultados del ensayo a compresión

Adoquín	Carga axial (KN)	Resistencia compresión (MPa)	Resistencia promedio (MPa)
A1	481.55	19.0338	
A2	478.99	18.9324	
A3	475.84	18.8079	18.9911
A4	480.65	18.998	
A5	485.34	19.1834	

Nota: Elaboración propia.

La resistencia promedio obtenida en las probetas fue de 19.35 MPa, mientras que la de los cinco adoquines ensayados en la máquina MTS es de 18.99 MPa (diferencia de 0.36 MPa; 1.9%). Estos resultados no muestran una diferencia significativa; por lo tanto, los resultados pueden considerarse consistentes.

Tabla 23.

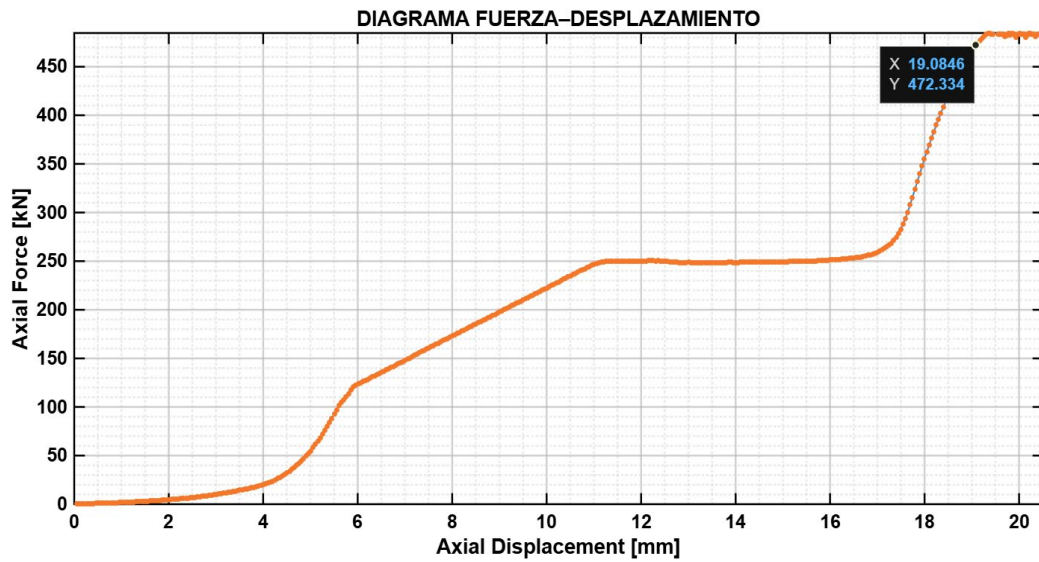
Comparación con los requisitos de calidad del artículo 510-13 de INVÍAS.

Aspecto	Requisito de INVÍAS (Art. 510-13) para adoquines de concreto
Resistencia a compresión mínima promedio (5 elementos)	50 MPa
Resistencia individual mínima valor obtenido	55 MPa 18.99 Mpa
Cumplimiento	NO-CUMPLE

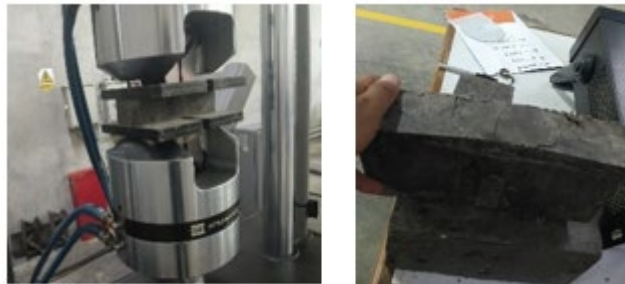
Nota: Elaboración propia

Al comparar los resultados obtenidos con los adoquines compuestos de Arena + PEAD con los requisitos de calidad del artículo Artículo 510 establecidos en el Manual de Especificaciones para pavimentos de adoquines del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022) se observa que la resistencia obtenida (18.99 MPa) queda muy por debajo del mínimo exigido de 50 MPa. En la Figura 14 se presenta la gráfica fuerza vs. Desplazamiento para uno de los especimen (A5). Y en la Figura 15 se muestra el procedimiento para realizar el ensayo a compresion.

. En la grafica de fuerza vs. desplazamiento se identifica el punto de falla a compresión del adoquín A5, el cual se presentó con una fuerza máxima de 485,34 kN y un desplazamiento correspondiente de 19,51 mm

Figura 14*Diagrama fuerza- desplazamiento ensayo adoquín (A5)*

Nota: Elaboración Propia.

Figura 15*Ensayo a compresión*

Nota: Elaboración Propia.

4.6.2. Ensayo de absorción.

El ensayo de absorción de agua, fue realizado conforme a la NTC 2017 (ICONTEC, 2018), los adoquines compuestos de arena y PEAD presentaron un valor promedio de 0.643%. Estos

resultados se encuentran significativamente por debajo del límite máximo de 7% establecido en el Artículo 510 establecidos en el Manual de Especificaciones para pavimentos de adoquines del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022).

Estos valores evidencian un buen desempeño frente a la absorción de agua, indicador de alta durabilidad y resistencia al ingreso de humedad, superando ampliamente los requisitos normativos. Los resultados del ensayo de absorción se presentan en la Tabla 24. Y en la Figura 16 se muestra el procedimiento para realizar el ensayo de absorción.

Tabla 24.

Resultado del ensayo de absorción de agua.

Adoquín	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Absorción (%)
6	2366.9	2382.4	0.655
7	2330.8	2348.9	0.777
8	2334.1	2340.6	0.278
9	2324.8	2331.2	0.275
11	2350	2378.9	1.23
Promedio	–	–	0.643

Nota: Elaboración propia

Figura 16

Ensayo de absorción de agua



Nota: Elaboración propia

4.6.3. Ensayo a flexo tracción

Se realizaron ensayos de módulo de rotura conforme a NTC 2017 (ICONTEC, 2018), Se utilizó el mismo lote del ensayo de absorción como lo dispone la norma; el promedio registrado fue de 5.79 MPa. Este promedio está por encima de los requisitos establecidos en las especificaciones del Artículo 510 establecidos en el Manual de Especificaciones para pavimentos de adoquines del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS, 2022), por lo que los especímenes cumplen el criterio de resistencia.

. Los resultados del ensayo a flexo tracción se presentan en la Tabla 25. Y en la Figura 18 se muestra el procedimiento para realizar el ensayo a flexotraccion.

Tabla 25.

Resultado ensayo a flexo tracción.

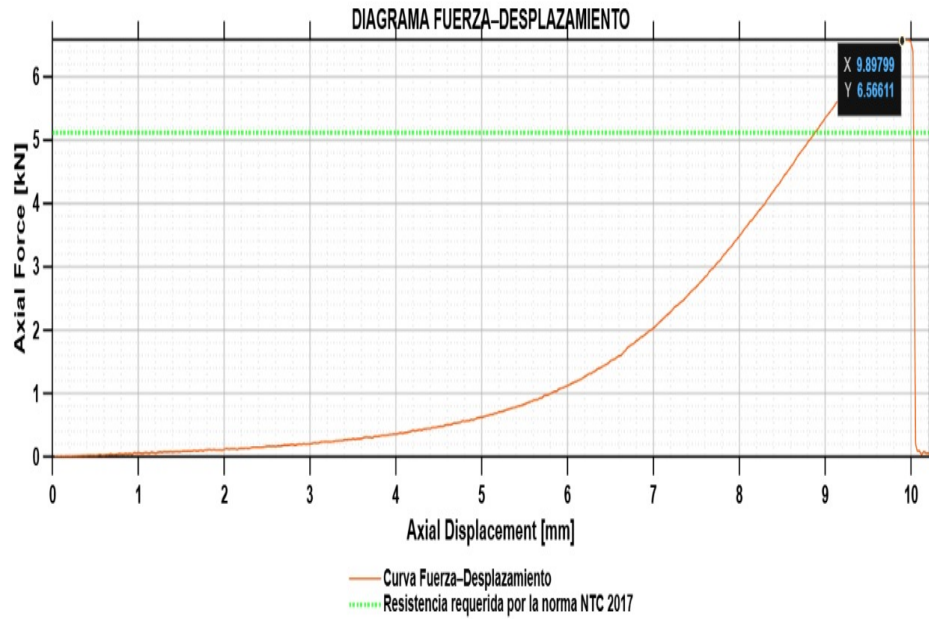
Adoquín	Fuerza axial(kN)	Módulo de rotura (MPa)
A6	6.58	6.46
A7	5.83	5.72
A8	6.14	6.03
A9	5.13	5.03
A11	5.82	5.71
PROMEDIO		5.79

Nota: Elaboración propia

En la Figura 17 se presenta la grafica de fuerza–desplazamiento del ensayo de flexotracción del adoquín (A6); se observa una fuerza máxima de 6,56 kN y un desplazamiento correspondiente de 9,89mm.

Figura 17

Diagrama, fuerza–desplazamiento ensayo a flexo-tracción del adoquín (A6)



Nota: Elaboraciom propia.

Figura 18

Ensayo a flexo tracción



Nota: Elaboración propia

4.6.4. Ensayo de abrasión

El ensayo de abrasión a los adoquines se llevó a cabo en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) (Universidad Pontificia Bolivariana, s.f.) siguiendo lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 5147 (ICONTEC, 2004), la cual define cómo evaluar la resistencia al desgaste. Para este ensayo fue necesario fabricar tres nuevos especímenes. En la Tabla 26 se presentan los valores registrados de factor de calibración, longitudes de huella medidas y corregidas, obteniendo un promedio de 17 mm y en la Figura 19 se presenta el ensayo realizado por la UPB. Este resultado refleja el comportamiento del material frente al desgaste superficial y permite verificar que los adoquines cumplen con los criterios de calidad exigidos por la NTC 2017 (ICONTEC, 2018), Apéndice G.

Tabla 26.

Resultado ensayo abrasión.

No	muestra	Factor de calibración(fc)	de Longitud huella(ab)	de Longitud corregida (lh)	promedio (lh)
1	Adoquín	19.85	18.7	19	
2	Adoquín	19.85	18.63	19	17
3	Adoquín	19.85	14.59	15	

Nota: Elaboración propia adoptado del informe presentado por la UPB.

Figura 19

Ensayo de abrasión.



Las figuras muestran el equipo empleado en el ensayo de abrasión según la NTC 2017 y la forma de medición realizada sobre un adoquín. Nota: Elaboración propia.

5. Estimación beneficio ambientales del uso del PEAD

5.1. Parámetros para la estimación ambiental

Masa del adoquín objetivo: aproximadamente 2 400 g, correspondiente a un diseño de $23 \times 11 \times 5$ cm y una densidad objetivo de 1.857 g/cm^3 .

Fracción en masa por adoquín: de acuerdo con la dosificación seleccionada, cada unidad contiene ≈ 439 g de PEAD y $\approx 1 961$ g de arena.

Cobertura superficial: cada adoquín cubre un área de 0.0253 m^2 ($0.23 \text{ m} \times 0.11 \text{ m}$), lo que equivale a ≈ 39.5 adoquines por m^2 de pavimento.

Incorporación de PEAD reciclado: al multiplicar la masa de PEAD por la cantidad de adoquines por metro cuadrado, se obtiene un valor de ≈ 17.34 kg de PEAD por m^2 de pavimento.

Interpretación ambiental: la aplicación del prototipo permite desviar y valorizar cerca de 17 kg de PEAD reciclado por cada m² de superficie construida. A una escala de 100 m², esto representa la revalorización de aproximadamente 1.73 toneladas de PEAD, contribuyendo directamente a la reducción de residuos plásticos y su incorporación en infraestructura urbana.

6. Conclusiones

La dosificación con 25 % de PEAD y 75 % de arena, consolidada a ~220 °C, fue la que mostró el mejor desempeño, alcanzando una resistencia promedio de 19.35 MPa, con un coeficiente de variación de ($CV \approx 4.57\%$) y confirmando su reproducibilidad al trasladarse a los adoquines, que registraron 18.99 MPa en cinco especímenes, con una diferencia de apenas 1.9 % respecto a las probetas. Además, las densidades de once adoquines se mantuvieron dentro de un margen de $\pm 2\%$ del valor objetivo, con una dispersión mínima ($CV \approx 0.85\%$), lo que demuestra que el proceso de fabricación fue estable y permitió obtener piezas uniformes en peso, dimensiones y resistencia.

En la evaluación normativa, el prototipo arena-PEAD obtuvo una resistencia a compresión promedio de 18.99 MPa, valor que no cumple con la exigencia del INVÍAS (art. 510-13), que establece un mínimo de 50 MPa para adoquines de concreto en categoría vehicular. Sin embargo, en flexo-tracción sí alcanzó los requisitos de la NTC 2017, con un promedio de 5.79 MPa (mínimo individual 4.2 MPa), superando el umbral de 5.0 MPa. En cuanto a la absorción de agua, presentó un valor muy bajo (0.643 %), cumpliendo holgadamente el límite del 7 % exigido. Finalmente, en el ensayo de abrasión (NTC 5147 como método, límite NTC 2017 ≤ 23 mm), el prototipo mostró

una longitud corregida promedio de 17 mm, lo que confirma también el cumplimiento de esta condición.

El proceso debe trabajarse muy cerca de 220 °C, ya que a temperaturas más altas (+10 °C) el PEAD empieza a degradarse, mientras que a temperaturas más bajas (-10 °C) la fusión no es suficiente, lo que reduce la resistencia del adoquín y retrasa la producción. Por eso, es clave mantener un control cuidadoso de la temperatura y del tiempo en el horno para asegurar piezas de buena calidad y un proceso eficiente.

La estimación de beneficios ambientales demuestra que la fabricación de adoquines con inclusión del 25 % de PEAD permite la recuperación de 17 kg de plástico por cada metro cuadrado de cobertura superficial del pavimento, lo que a una escala de 100 m² equivale a 1.73 toneladas de residuos plásticos desviados de la disposición final. Este resultado evidencia el potencial del material como una estrategia efectiva de gestión de residuos, al transformar un desecho de difícil aprovechamiento en un insumo útil para infraestructura urbana.

Referencias bibliográficas

- Arango-Londoño, J. (2020). Los adoquines como alternativa para la pavimentación urbana: Propiedades, ventajas y retos en su implementación. *Revista de Ingeniería Civil*, 18 (2), 45–56. <https://revistadeingenieriacivil.com/articulo/adoquines-pavimentacion-urbana-2020>
- Askeland, DR (1984). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México: CENGAGE Aprendizaje.
- Cárdenas, M., & Restrepo, P. (2023). La investigación en ciencias aplicadas como apoyo al desarrollo social. *Unaciencia*, 15 (1), 44–55. <https://revistas.unac.edu.co/ojs/index.php/unaciencia/article/view/617>
- eHow en español. (2024). Tipos de adoquines. https://www.ehowenespanol.com/tipos-adoquines-info_205481/
- Gómez García, LH (2021). El reciclaje de PET, PEAD, PEBD, PS y PP en estibas plásticas como modelo de negocio. *Boletín de la Universidad de Karaganda. Serie de Pedagogía*, 104 (4), 101–107. <https://doi.org/10.31489/2021Ped4/101-107>
- González Véliz, LE (2019). *Determinación de los parámetros para la caracterización óptica y mecánica de la película de polietileno de alta y baja densidad con materia prima virgen y con materia reciclada* [Tesis de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio UCE. <https://www.dspace.uce.edu.ec/bitstreams/c5c34ace-7781-4554-b508-6427ee68edd6/download>
- Guzmán, M. y Murillo, EA (2014). Funcionalización de polietileno de baja densidad con anhídrido maleico en estado fundido. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 24 (2), 162–169. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.034>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *NTC 2017: Adoquines de concreto – Requisitos y métodos de ensayo*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *NTC 5147: Adoquines de concreto – Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a la abrasión*. ICONTEC.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras (Resolución 4561 de 29 de noviembre de 2022; Artículo 500 – Pa*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (sf). *NTC 174: Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto*. ICONTEC.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2007). *INV E-220-07: Sanidad de los a*. Bogotá: INVÍAS.

- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-1*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-126-13*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-211-13: Determinación de los terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-214-13: Determinación de la cantidad*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-212-13: Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS). (2013). *INV E-128-13: Determinación de*. Bogotá: INVÍAS.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *NTC 92: Ingeniería civil y arquitectura — Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas*. Bogotá: ICONTEC.
- Khanyi, N., Tabakov, P. e Inambao, F. (2024). Propiedades mecánicas y térmicas del polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado: Una revisión. *Revista de Polímeros y Medio Ambiente*, 32 (1), 115–130. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02789-6>
- Palmay, P., et al. (2021). Estudio cinético de la evaluación térmica del polietileno de alta densidad (HDPE) posconsumo a diferentes tasas de calentamiento. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 11 (1), 61–68. <https://doi.org/10.29166/revfig.v11i1.3132>
- Ramírez, E., & López, A. (2022). Innovación tecnológica aplicada en la educación superior. *Revista de innovaciones de alta tecnología*, 4 (2), 33–42. <https://revista.uct.edu.pe/index.php/hightech/article/view/560>
- Ríos, J. S. (2024). *Caracterización granulométrica y mineralógica de dos tipos de arenas: Comparación entre una arena proveniente de fuente de peña y otra de origen aluvial* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Biblioteca Digital UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstreams/72cb8d12-246c-40b8-a39f-beee54b6b27d/download>
- Santos, J. y Zurita, E. (2022). Evaluación de la sustitución parcial de arena por plásticos reciclados (PET, PP y PEAD) en la fabricación de adoquines. *Revista de Materiales de Construcción Sostenible*, 5 (2), 89–102. <https://revistamaterialessostenibles.org/articulo/arena-plasticos-2022>
- TUTORIALES DE INGENIERÍA CIVIL. (2020, 21 de julio). *Granulometría del suelo, curvas granulométricas* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=1tgYT7nG3N0>

Universidad de Chile. (2021). Análisis de la influencia de las redes sociales en la educación superior. *Repositorios Latinoamericanos*.
<https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/8700541>

Universidad César Vallejo. (2019). Factores que inciden en el rendimiento académico en estudiantes universitarios. *Repositorio UCV*.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/26903>

Devore, J. L. (2016). Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias. Cengage Learning.

Hibbeler, R. C. (2017). *Mecánica de materiales*. Pearson Educación.

Apéndices

Apéndice A.

Registro fotográfico para la caracterización de la arena fina.

Ensayo de pérdidas en solidez con sulfatos (INV E-220): En la Figura 1 se presenta el registro fotográfico del procedimiento para determinar la resistencia de la arena frente a una solución de sulfato de magnesio.

Figura 1.

Muestras después del primer ciclo de inmersión en solución de agua con sulfato de magnesio.



Nota: Elaboración propia.

Ensayo de equivalente de arena (INV E-133): En la Figura 2 se presenta el registro fotográfico del procedimiento utilizado para medir la proporción relativa de arena frente a materiales finos y arcillosos.

Figura 2.

Ensayo equivalentes de arena.



Nota: Elaboración propia.

Ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznable (INV E-211): En la Figura 3 se presenta el registro fotográfico de la separación y cuantificación de partículas frágiles presentes en la arena.

Figura 3.

Anexo ensayo de terrones de arcilla y partículas deleznable.



Nota: Elaboración propia

Ensayo de material que pasa el tamiz de 75 μm (INV E-14): En la Figura 4 se presenta el registro fotográfico del proceso de tamizado para determinar la fracción de finos que atraviesa el tamiz No. 200.

Figura 4.

Anexo lavado de la muestra en el tamiz (200).

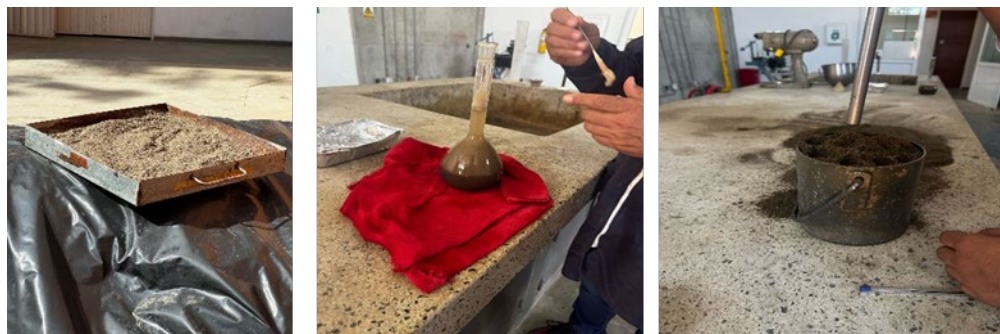


Nota: Elaboración propia.

Ensayo peso específico, absorción de agua (INV. E 128-13) y de peso unitario (NTC 92. En la Figura 1 se presenta el registro fotográfico de la muestra en estado saturado superficialmente seco (S.S.S) y procedimiento para dichos ensayos.

Figura 5.

Anexo ensayo peso específico, absorción y peso unitario.



Nota: Elaboración propia.

Apéndice B.

Caracterización del PEAD

En la Figura 6 se presenta el registro fotográfico del Ensayo del peso específico y fluencia del PEAD. Con ayuda de un termómetro se verificaba la temperatura del PEAD.

Figura 6.

Anexo caracterización (PEAD).



Nota: Elaboración propia.

Apéndice C.

Medición del molde

Con ayuda de un calibrador digital se tomaron las medidas de diámetro interno del molde, tanto superiores como inferiores en cada uno de los cuatro ejes. Estos datos se pasan a Excel y se promedian. En la Figura 1 se presenta el registro fotográfico de la toma de medidas.

Figura 7.

Anexo Toma de medidas del molde.



Nota: Elaboración propia.

Apéndice D.

Elaboración de probetas

9.1. Elaboración de probetas.

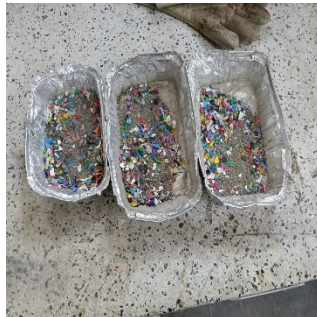
9.1.1. Dosificación y moldeado

Dosificación del material

En la Figura 8 se presenta el registro fotográfico de la dosificación del material

Figura 8.

Dosificación del material.



Nota: Elaboración propia.

Moldeado de las probetas.

EL molde es engrasado previo a ingresar al horno para que el material no se adhiera a sus paredes.

Se deposita en el horno por un tiempo estimado de 15 minutos. En la Figura 9 se presenta el registro fotográfico del moldeo de las probetas.

Figura 9.

Moldeado de las probetas.



Nota: Elaboración propia.

Mezclado y compactación de las probetas.

Después de agregar al molde, el material se mezcla a intervalos de 5 minutos para garantizar homogeneidad durante 15 minutos antes de agregar la siguiente capa de muestro; este proceso se realiza hasta disponer el total de material. Una vez mezclado se introduce el pistón en la parte superior del molde y con ayuda del gato hidráulico se procede a compactar hasta alcanzar una altura aproximada de 10.2 cm. En la Figura 10 se presenta el registro fotográfico del mezclado y la compactación de las probetas.

Figura 10.

Anexo de mezclado y compactación de probetas.



Nota: Elaboración propia.

Desenfrado y toma de mediciones.

Una vez compactada se espera 20 minutos para que la probeta se enfríe y alcance a estabilizarse. Se retira del gato y se desprende la base. Con la ayuda de una base de diámetro 2 pulgadas se desmolda en el gato hidráulico. En la Figura 11 se presenta el registro fotográfico del desenfrado de las probetas.

Figura 11.

Anexo desencofrado de las probetas.



Nota: Elaboración propia.

Toma de mediciones de las probetas.

La probeta se protegió con papel vinipel para evitar deformaciones durante el manejo. Luego, con ayuda de una guía circular, se marcaron cuatro ejes en la cara superior y ocho en los costados, lo que permitió realizar mediciones de diámetro en la parte superior, media y base con un calibrador digital, así como la altura en cada uno de los costados. Finalmente, los valores obtenidos se registraron en una hoja de Excel y se calcularon los promedios correspondientes. En la Figura 12 se presenta el registro fotográfico la toma de mediciones de las probetas.

Figura 12.

Anexo toma de mediciones de las probetas



Nota: Elaboración propia.

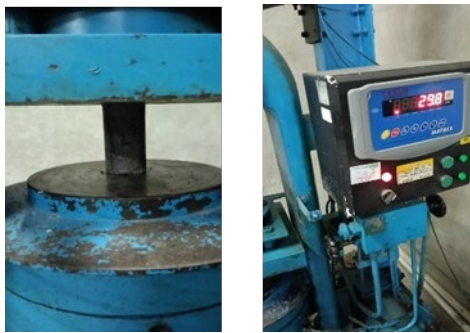
Apéndice E.***Ensayo a compresión***

Ensayo a compresión

Los ensayos se realizaron en la prensa convencional. En la Figura 13 se presenta el registro fotográfico del ensayo a compresión de probetas y en la Figura 14 se presenta el registro fotográfico del resultado final de las probetas.

Figura 13.

Anexo ensayo a compresión de probetas.



Nota: Elaboración propia.

Figura 14.

Anexo resultado final de las probetas.



Nota: elaboración propia

Apéndice F.

Fabricación de los adoquines

Fabricación de los adoquines.

Moldeado y mezclado.

El molde se engrasa y depósito en el horno por 15 minutos a una temperatura de 220°C para que al momento de depositar la primera capa de material estos se fusionen rápidamente.

La mezcla al igual que en las probetas se hizo en intervalos de 5 minutos hasta que la mezcla estuviera totalmente homogénea (aproximadamente 20 minutos), hasta depositar el total del material. En la Figura 15 se presenta el registro fotográfico del moldeado y mezcla.

Figura 15.

Anexo moldeado y mezcla.



Nota: Elaboración propia.

Compactación y Desencofrado de los adoquines.

Se coloca la tapa metálica del molde y se prensa hasta que encaje para dar forma al adoquín. finalmente se espera por 20 minutos hasta que los materiales se estabilicen y se procede a desencofrar con precaución para no romper la muestra. En la Figura 16 se presenta el registro fotográfico de la compactación y desencofrado del adoquín.

Figura 16.

Anexo compactación y desencofrado del adoquín.



Nota: Elaboración propia


Apéndice G.

Ensayo a abrasión de los adoquines.

En la Figura 17 se presenta los datos obtenidos del ensayo de abrasión realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana.

Figura 17.

Resultados del ensayo a abrasión realizado en la Universidad Pontificia Bolivariana.

REPORTE DE ENSAYO																																											
 <p>Universidad Pontificia Bolivariana SECCIONAL BUCARAMANGA</p> <p>Km 7 vía Piedecuesta</p>	OBRA:		CONTROL DE CALIDAD		FECHA DE INFORME:																																						
	SOLICITADO POR:		JUAN SNEYDER NIÑO MORENO		FECHA DE ENSAYO:																																						
	MUESTRAS:		3		N° DE ENSAYOS:																																						
		3				CALCULÓ:																																					
						Tnlgo. Edwin Alexander Rangel Ardila																																					
MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE MATERIALES, PARA PISOS Y PAVIMENTOS, MEDIANTE ARENA Y DISCO METÁLICO ANCHO (NTC 5147)			DESCRIPCIÓN:			OPERADOR:																																					
			ADOQUIN			Tec. Ruben Dario Bonilla																																					
Codigo Informe:		RES-25-047		INFORME N°:		21																																					
						PÁGINAS: 1 de 1																																					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N°</th> <th rowspan="2">MUESTRA</th> <th colspan="2">DIMENSIONES</th> <th rowspan="2">FACTOR DE CALIBRACIÓN (Fc)</th> <th rowspan="2">LONGITUD DE HUELLA (AB)</th> <th rowspan="2">LONGITUD CORREGIDA (h)</th> </tr> <tr> <th>LARGO (mm)</th> <th>ANCHO (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">ADOQUIN</td> <td style="text-align: center;">230,00</td> <td style="text-align: center;">110,00</td> <td style="text-align: center;">19,85</td> <td style="text-align: center;">18,70</td> <td style="text-align: center;">19</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">ADOQUIN</td> <td style="text-align: center;">230,00</td> <td style="text-align: center;">112,00</td> <td style="text-align: center;">19,85</td> <td style="text-align: center;">18,63</td> <td style="text-align: center;">19</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">ADOQUIN</td> <td style="text-align: center;">230,00</td> <td style="text-align: center;">112,00</td> <td style="text-align: center;">19,85</td> <td style="text-align: center;">14,59</td> <td style="text-align: center;">15</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: right;">PROMEDIO</td> <td style="text-align: center;">17</td> </tr> </tbody> </table>							N°	MUESTRA	DIMENSIONES		FACTOR DE CALIBRACIÓN (Fc)	LONGITUD DE HUELLA (AB)	LONGITUD CORREGIDA (h)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	1	ADOQUIN	230,00	110,00	19,85	18,70	19	2	ADOQUIN	230,00	112,00	19,85	18,63	19	3	ADOQUIN	230,00	112,00	19,85	14,59	15	PROMEDIO						17
N°	MUESTRA	DIMENSIONES		FACTOR DE CALIBRACIÓN (Fc)	LONGITUD DE HUELLA (AB)	LONGITUD CORREGIDA (h)																																					
		LARGO (mm)	ANCHO (mm)																																								
1	ADOQUIN	230,00	110,00	19,85	18,70	19																																					
2	ADOQUIN	230,00	112,00	19,85	18,63	19																																					
3	ADOQUIN	230,00	112,00	19,85	14,59	15																																					
PROMEDIO						17																																					
OBSERVACIONES:																																											
LOS RESULTADOS SON VÁLIDOS ÚNICAMENTE PARA LAS MUESTRAS ENSAYADAS																																											
SE PROHIBE LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DEL PRESENTE INFORME																																											
FIN DEL REPORTE																																											

Nota: Universidad Pontificia Bolivariana.