

Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto con arena-PEAD construido mediante tratamiento térmico y reforzado con fibras metálicas.

José Manuel Duarte Lache

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

M.Sc. Luis Alberto Capacho Silva

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

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2026

Dedicatoria

A Dios primeramente por ser mi guía, darme fortaleza y sabiduría para recorrer este camino. A mi madre Emerida Lache por su amor infinito, por su dedicación y su esfuerzo por sacarme adelante, gracias porque sin su sacrificio esto no hubiera sido posible, infinitamente gracias la amo mucho. También a mi padre Edgar Duarte por su apoyo, cariño y confianza, sus consejos fueron fundamentales a pesar de la distancia, gracias por ser parte de esta bonita etapa.

A mi padre Jose Sabino, faltó muy poco para verme cumplir este sueño, pero sé que desde el cielo me guías y estarás muy orgulloso por todo lo que he logrado. A mi mamá Nelly por ser un pilar fundamental en todos los aspectos de mi vida, gracias por sus consejos, oraciones y por querernos tanto.

A mi tío Yiduar por ser como un padre para mí, por estar siempre cuando lo necesito, por sus regaños y por alegrarme los días cuando no todo salía como se planeaba.

También expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mi hermana Mariana, mi tío Muaricio y mi mamá Chela, por ser acompañamiento y apoyo a lo largo del proceso.

José Manuel Duarte Lache

Agradecimientos

Agradecimiento a la universidad Industrial de Santander y la escuela de ingeniería civil por abrirme sus puertas y poder finalizar esta bonita etapa. Agradecimiento especial a mi director, Ingeniero Luis Alberto Capacho Silva, por su valiosa colaboración y guía durante todo el proyecto, su colaboración fue parte fundamental para lograr concluir con éxito este proceso. Gracias también por la confianza brindada y por permitirme ser su auxiliar durante dos maravillosos años, tiempo en que logramos hacer cosas buenas por la materia y conocer gente increíble, me voy con el recuerdo de aquellos buenos momentos y vistas técnicas realizadas, sin duda de las mejores experiencias vividas en mi instancia en la universidad.

A mis amigos y compañeros de carrera, cada momento compartido dejó gratos recuerdos, risas, aventuras y anécdotas compartidas, todo esto fue de gran ayuda para hacer más llevadero el proceso y disfrutara al máximo cada momento. También a Geral por su gran amistad y cariño brindado, sus consejos me ayudaron a crecer como persona.

También quiero agradecer al personal del laboratorio de caracterización de materiales, en especial a la Mechu y la señora Mariela, gracias a su compañía y ayuda, hicieron más amena la estadía, me voy con dos amigos más para la vida.

José Manuel Duarte Lache

Tabla de Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Polietileno de alta densidad (PEAD)	14
2.2 Adoquín.....	15
2.2.1 NTC-2017. Adoquines de concreto para pavimentos.	16
2.2.2 NTC-5147. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos.	16
2.3 Material compuesto.....	17
2.4 Fibras metálicas	17
2.5 Arenas	18
3. METODOLOGÍA.....	19
3.1 Caracterización de la arena	19
3.2 Caracterización del polietileno de alta densidad PEAD	19
3.3 Verificación dosificación óptima a través de elaboración de probetas cilíndricas	20
3.3.1 Dosificación del material	20
3.3.2 Elaboración de las probetas cilíndricas.....	20
3.3.2.1 Moldeado de probetas	20
3.3.2.2 Compactación y desencofrado	20

3.4 Fabricación de adoquines.....	21
3.4.1 Proyección de la masa del adoquín.....	21
3.4.2 Dosificación del material	21
3.4.3 Moldeado y mezclado.....	22
3.4.4 Desencofrado del adoquín.....	22
3.4.5 Calculo de la densidad del Adoquín.....	22
3.4.6 Fibras metálicas	22
3.4.6.1 Dosificación de las fibras metálicas.....	23
3.5 Ensayo a los adoquines	23
3.5.1 Ensayo a compresión	23
3.5.2 Absorción de agua.....	23
3.5.3 Ensayo a flexo tracción.....	24
3.5.4 Abrasión.....	24
4. RESULTADOS	25
4.1 Caracterización de la arena fina	25
4.1.1 Granulometría	25
4.1.2 Propiedades de la arena fina	25
4.2 Caracterización del PEAD	26
4.2.1 Peso específico.....	26
4.3 Elaboración de probetas cilíndricas y ensayo a compresión.....	26
4.4 Fabricación de los adoquines.....	27
4.4.1 Dosificación del material	27
4.4.2.1 Mezclado y desencofrado del adoquín.....	28

4.4.3 Cálculo densidad del adoquín	28
4.4.4 Fibras metálicas	28
4.4.4.1 Dosificación de las fibras	28
4.4.5 Mezclado y desencofrado	29
4.4.6 Ensayo a compresión	29
4.4.7 Medición de dimensiones y cálculo de densidad del adoquín reforzado	30
4.5 Ensayo de los adoquines	31
4.5.1 Ensayo a compresión	31
4.5.2 Ensayo a absorción	32
4.5.3 Ensayo a flexo tracción	33
4.5.4 Ensayo a abrasión	33
5. CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Requisitos NTC 2017.....	16
Tabla 2 Granulometría de la arena fina.....	25
Tabla 3 Cuadro resumen propiedades de la arena.....	26
Tabla 4 Resultados ensayo a compresión	27
Tabla 5 Dosificación del adoquín reforzado	29
Tabla 6 Ensayo a compresión variando porcentaje de fibras.....	29
Tabla 7 Densidad adoquines reforzados.	30
Tabla 8 Resultados ensayo a compresión adoquines reforzados	31
Tabla 9 Resultados ensayo absorción adoquines reforzados.	32
Tabla 10 Resultados ensayo flexo tracción.....	33

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Mezcla del adoquín.	28
Figura 2 Ensayo a compresión del adoquín reforzado.....	31
Figura 3 Ensayo a absorción del adoquín reforzado.....	32
Figura 4 Ensayo a flexo tracción del adoquín reforzado.	33

Lista de Apéndices

Los apéndices se encuentran adjuntos.

Apéndice A. Registro fotográfico caracterización de la arena fina.

Apéndice B. Caracterización del PEAD.

Apéndice C. Elaboración de probetas cilíndricas y ensayos a compresión.

Apéndice D. Fabricación de adoquines.

Apéndice E. Fibras metálicas

Apéndice F. Resultado ensayo a abrasión UPB.

Resumen

Título: Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto con arena-PEAD construido mediante tratamiento térmico y reforzado con fibras metálicas. *

Autor: José Manuel Duarte Lache **

Palabras Clave: Arena, PEAD, fibras metálicas, adoquín, material compuesto, tratamiento térmico.

El polietileno de alta densidad (PEAD) es uno de los plásticos más comunes debido a sus propiedades fisicoquímicas y su bajo costo de producción. Sus múltiples usos y aplicaciones han impulsado un crecimiento exponencial en su producción, lo que representa un impacto negativo en el medio ambiente, dado que su periodo de degradación se extiende por varios años. Frente a esta problemática, se plantea una alternativa de uso del PEAD, donde este proyecto de investigación presenta la fabricación de un adoquín compuesto por arena- PEAD reciclado y reforzado con fibras metálicas, proceso realizado a través de tratamiento térmico, donde el objetivo es desarrollar una dosificación óptima que permita maximizar su resistencia a la compresión. El proyecto se desarrolló en las siguientes fases: revisión bibliográfica, caracterización de la arena a través del artículo 500 del INVIAS, peso específico del PEAD, verificación de dosificación óptima a través de probetas cilíndricas, realización del adoquín compuesto (23x11x6 cm) verificando su densidad, dosificación óptima de fibras metálicas, fabricación del adoquín reforzado con fibras metálicas, ejecución de ensayos de flexo tracción, abrasión y absorción verificando su cumplimiento frente a las normas técnicas colombianas NTC 2017 y NTC 5147.

* Trabajo de Grado

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

Abstract

Title: Manufacture of a prototype sand-HDPE composite paving stone produced through heat treatment and reinforced with metal fibers *

Author: José Manuel Duarte Lache **

Key Words: Sand, HDPE, metal fibers, paving stones, composite material, heat treatment.

High-density polyethylene (HDPE) is one of the most common plastics due to its physicochemical properties and low production cost. Its many uses and applications have driven exponential growth in its production, which has a negative impact on the environment, given that it takes several years to degrade. In response to this problem, an alternative use for HDPE is proposed. This research project presents the manufacture of a paving stone composed of sand and recycled HDPE, reinforced with metal fibers, through a heat treatment process. The objective is to develop an optimal mix ratio that maximizes the paving stone's compressive strength. The project was carried out in the following phases: literature review, characterization of the sand in accordance with INVIAS Article 500, determination of the specific gravity of HDPE, verification of the optimal dosage using cylindrical test specimens, fabrication of the composite paving stone (23x11x6 cm) and verification of its density, determination of the optimal metal fiber dosage, manufacturing of the metal fiber-reinforced paving block, and conducting flexural tensile, abrasion, and water absorption tests to verify compliance with Colombian technical standards NTC 2017 and NTC 5147.

* Degree Work

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

Introducción

Cada año se producen más de 430 millones de toneladas de plástico, de las cuales gran parte son productos de vida corta que pronto se convierten en residuos que contaminan el medio ambiente. Aunque el plástico es un material asequible, duradero y flexible, su desecho alcanza niveles alarmantes: más de 280 millones de toneladas de estos productos acaban en la basura anualmente, con un 46% en vertederos y un 22% mal gestionado, que, al no biodegradarse, puede tardar cientos de años en descomponerse (UNEP, 2023).

En Colombia se generan anualmente 700500 toneladas de envases y empaques plásticos, de las cuales solo el 30% es reciclado; a nivel global, el 75% del plástico producido se ha convertido en residuos, terminando la mayoría en el medio ambiente, incluidos los océanos(WWF, 2024).

El presente trabajo constituye la continuación del proyecto titulado “Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto por ARENA-PEAD mediante tratamiento térmico” desarrollado por Juan Sneyder Niño y Karen Vanessa Torres Gómez, en la Universidad Industrial de Santander, (Torres G. & Niño M., 2025). Dicho estudio proporcionó las bases conceptuales y experimentales para esta investigación, al abordar la utilización de polímeros reciclados como sustitutos parciales de agregados minerales y establecer los parámetros iniciales del proceso térmico aplicado en la conformación de adoquines compuestos.

Por ello, el presente proyecto de investigación pretende incorporar este material, mezclarlo con arena y reforzarlo con fibras metálicas, para fabricar un adoquín en el que el plástico funcione como material ligante. Se espera que esta alternativa contribuya al aprovechamiento de residuos plásticos y represente una opción con potencial aplicación en el sector de la construcción.

Para la caracterización de los adoquines elaborados con PEAD reciclado, se utilizarán como referencia las normas técnicas colombianas NTC 2017 (ICONTEC, 2017) y NTC 5147 (ICONTEC, 2024). Dado que en Colombia no existe una normativa específica para este tipo de material, la NTC 2017 establece los criterios técnicos de resistencia a la compresión, flexo-tracción y absorción, mientras que la NTC 5147 define los procedimientos para evaluar la resistencia a la abrasión.

Para dar respuesta al problema planteado, se empleó un enfoque experimental, mediante el cual se desarrollaron adoquines con una dosificación óptima de arena, PEAD y fibras metálicas, dando como resultado la maximización de la resistencia a la compresión, cumpliendo con la normativa en parámetros como flexo-tracción, absorción y abrasión. La finalidad del proyecto es buscar una alternativa de uso de los residuos plásticos para contribuir en parte a la descontaminación de nuestro medio ambiente.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar una dosificación adecuada para la fabricación de un adoquín compuesto de arena y PEAD (mediante tratamiento térmico) y reforzado con fibras metálicas, evaluando su desempeño frente a los requisitos de calidad establecidos en las normas NTC-2017 y NTC-5147.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer la dosificación adecuada de un adoquín compuesto de arena, PEAD reciclado y fibras metálicas para maximizar su resistencia a la compresión.

- Evaluar los adoquines compuestos de arena, PEAD reciclado y fibras metálicas con las normas técnicas colombianas NTC-2017 y NTC-5147, en aspectos como flexotracción, absorción y abrasión.

2. Marco teórico

El PEAD es un material destacado por su alto potencial de aprovechamiento, ya que puede ser reciclado en múltiples ocasiones sin perder sus propiedades fundamentales. Frente al modelo tradicional de "usar y desechar", la economía circular promueve la reutilización y el reciclaje de materiales, en este proceso el PEAD se destaca como el material de mayor viabilidad para este propósito, debido a su estabilidad química y mecánica tras sucesivos ciclos de procesamiento. En este caso será implementado como material cementante en la fabricación de un adoquín compuesto de arena y fibras metálicas, generando así una alternativa de uso en el sector de la construcción, frente al impacto ambiental generado en la fabricación de adoquines tradicionales.

2.1 Polietileno de alta densidad (PEAD)

El PEAD es el polímero sintético de mayor producción en el mundo. Tiene la característica de ser incoloro, inodoro, no ser tóxico y se obtiene a baja presión. Este polímero pertenece a la clase de cadena lineal no ramificada y es menos dúctil que el polietileno de baja densidad, aunque es más fuerte, más duro y cuatro veces menos permeable. Por su composición física y química es sumamente resistente a los golpes y a productos químicos. El PEAD, cuando se recicla, tiene una calidad bastante regular y el proceso de reciclaje es mecánico. Solo se puede reutilizar por procesos de extrusión y cuando su presentación es en grandes piezas se utiliza el moldeo por prensado (Quiminet, 2011).

En Colombia, varias empresas se dedican al reciclaje de PEAD, aunque históricamente el Polietileno Tereftalato (más conocido por sus siglas en español “PET”) ha tenido más protagonismo. Sin embargo, el aprovechamiento del PEAD, especialmente proveniente de las tapas de botellas, es una práctica creciente. Estas tapas pueden ser recolectadas y transformadas en nuevos productos como tuberías, envases no alimentarios y mobiliario urbano (Sierra J., 2016).

El PEAD es el plástico técnico con mayor potencial de reciclaje, gracias a características que facilitan su proceso de recuperación. A diferencia de otros plásticos, el PEAD no contiene cloro, lo que hace un reciclaje más simple y económico, además sus propiedades mecánicas se mantienen estables tras múltiples ciclos de reprocesamiento, sin degradarse significativamente. Su baja densidad (0,94–0,96 g/cm³) posibilita separarlo fácilmente de otros plásticos como el PVC o el PET mediante flotación en agua, sin necesidad de reactivos químicos. A esto se suma su relevancia ambiental y económica: dado que la producción de 1 kg de PEAD virgen requiere 1,75 kg de petróleo, cada kilogramo reciclado representa un ahorro directo de este recurso no renovable (Techduto Solutions, n.d.).

2.2 Adoquín

Los adoquines son elementos compactos prefabricados elaborados a partir de concreto, que es un conglomerado fabricado artificialmente compuesto por agua, cemento, agregados (gruesos y finos) y en algunos casos, aditivos que mejoran sus propiedades físicas y mecánicas. Los adoquines se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones que abarcan desde el ámbito residencial hasta el comercial e industrial. Su versatilidad permite su implementación en calles, zonas residenciales, centros comerciales, áreas peatonales e incluso en vías de tráfico pesado, como puertos (Calvache H., 2024).

En el siglo XXI, se ha aumentado el uso de materiales reciclados, como agregados obtenidos de residuos de construcción y demolición, en la fabricación de estos elementos. Esta práctica no solo disminuye la dependencia de recursos naturales, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado con los desechos de construcción (Calvache H., 2024).

2.2.1 NTC-2017. Adoquines de concreto para pavimentos.

Esta norma establece los requisitos de fabricación para adoquines de concreto, abarcando aspectos como parámetros físicos, dimensiones, tolerancias, absorción de agua, apariencia, muestreo y procedimientos de ensayo.

Tabla 1
Requisitos NTC 2017

Propiedades	Individual	Promedio de 5 especímenes
Absorción de agua	< 8%	< 7%
Módulo de rotura	≥ 4.2 MPa	≥ 5 MPa
Resistencia a la abrasión		≤ 23 mm

2.2.2 NTC-5147. Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos.

Esta norma establece procedimientos para la medición, en laboratorio, del desgaste de materiales para pisos y pavimentos (resistencia a la abrasión), utilizando un disco ancho metálico y un material abrasivo (arena), bajo condiciones normalizadas.

El ensayo consiste en someter un espécimen a desgaste por medio de la abrasión ejercida, bajo condiciones controladas, por un flujo de arena que pasa tangencialmente por entre dicha superficie y la cara lateral de un disco metálico, que ejerce presión contra ella. Esto genera una

huella, con la forma de la superficie curva del disco metálico, cuya longitud resultante es inversamente proporcional a la resistencia al desgaste por abrasión, que posee el espécimen.

2.3 Material compuesto

Un material compuesto es aquel constituido por dos o más componentes cuyas propiedades son superiores a las que tienen cada uno por separado, permaneciendo todos perfectamente identificables en la masa del elemento. Casi todos los denominados compuestos están constituidos por dos fases: una, sustentante o matriz, y otra, reforzante, que está inmersa o firmemente adherida a la primera (Olivares Santiago et al., 2003).

La fase matriz del compuesto suele ser la más tenaz, aunque también la menos resistente y dura, en el presente caso, la matriz es la arena. La fase reforzante suele ser, por el contrario, la de mayor resistencia y con más alto módulo elástico, pero también la de mayor fragilidad, para este caso el PEAD.

La combinación y compensación de dureza y blandura, fragilidad y tenacidad en los compuestos bien diseñados hace que estos materiales tengan muchas aplicaciones y respondan a muy variadas exigencias constructivas. En definitiva, se puede decir que la fibra aporta rigidez y resistencia, y que la matriz, al ser flexible y poco resistente, aglomera las fibras, les da forma y transmite los esfuerzos entre fibras (Olivares Santiago et al., 2003).

2.4 Fibras metálicas

Son elementos lineales de longitud y sección cortas que se añaden a la matriz del PEAD para mejorar algunas de sus propiedades. Las fibras pueden tener diferentes formas, como rectas, onduladas, dentadas, rizadas, con extremos en forma de gancho o planos. Las más comunes son las fibras rectas y las de extremos en forma de gancho. Es importante destacar que la geometría de la fibra influye significativamente en la adhesión fibra-matriz y, por lo tanto, en la respuesta

mecánica del adoquín. Las propiedades geométricas más relevantes de las fibras metálicas son su longitud y su esbeltez. La esbeltez, definida como la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra, influye directamente en su eficiencia mecánica dentro del material compuesto (Mena-Alonso et al., 2024).

Hacia la década de los 70 se comenzó a sugerir la adición de pequeñas fibras de diferentes materiales para modificar el comportamiento del concreto desde el punto de vista mecánico. Desde esta fecha se han evaluado diferentes materiales como el acero, las fibras naturales, de vidrio, polímeros, polyester, encontrándose que las más empleadas internacionalmente debido a las propiedades encontradas son las fibras de acero con alto contenido de carbono y las fibras sintéticas como polipropileno, polyester, polietileno, o mezcla de materiales sintéticos (Vergara G., 2009).

2.5 Arenas

La arena que se va a emplear proviene de la cantera del río Chicamocha, seleccionada por su accesibilidad y por demostrar un comportamiento favorable. Su caracterización se realiza a través de una serie de ensayos que permiten evaluar la calidad del material, entre los cuales se destacan los siguientes:

El ensayo de peso específico y absorción INV E-128 (INVIAS, 2013) permite determinar la densidad del material y su capacidad de retener agua en su estructura interna, parámetro directamente relacionado con la durabilidad y la compatibilidad de la arena en mezclas con PEAD reciclado y fibras metálicas. Por su parte, el ensayo de peso unitario (ICONTEC, 2019) permite conocer el comportamiento del material en estado suelto y compactado, información necesaria para establecer una dosificación confiable y un adecuado control volumétrico en el diseño de las mezclas.

Estos parámetros técnicos son fundamentales para determinar si un agregado es apto para la elaboración de adoquines compuestos, ya que una granulometría controlada, una baja presencia de finos y una reducida absorción constituyen condiciones favorables para garantizar la calidad y confiabilidad del material.

3. Metodología

Este proyecto de investigación se ejecutó en tres etapas: comprobación y fabricación de un adoquín compuesto de arena y PEAD; dosificación y fabricación de adoquines reforzados con fibras metálicas, con el fin de maximizar su resistencia a la compresión; y, por último, ejecución de ensayos para evaluar su desempeño frente a las normas técnicas colombianas NTC 2017 y NTC 5147, en aspectos como flexo-tracción, absorción y abrasión. Cada una de estas etapas se describe en detalle con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos específicos.

3.1 Caracterización de la arena

La arena utilizada para este proyecto proviene de la cantera del río Chicamocha, donde su caracterización se realizó bajo los lineamientos del artículo 500 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2013a), empleando ensayos de granulometría, peso específico, peso unitario, % de absorción, y ensayos de densidad aparente/real. El registro fotográfico de la caracterización se evidencia en el apéndice A.

3.2 Caracterización del polietileno de alta densidad PEAD

El Polietileno de alta densidad (PEAD) utilizado en el proyecto fue adquirido en la empresa Replasander Ltda., material que se encuentra triturado y posee un tamaño aproximado de 5mm, realizando el ensayo de peso específico conforme a los lineamientos establecidos en la norma INV E 128-13, método B, como se evidencia en el apéndice B.

3.3 Verificación dosificación óptima a través de elaboración de probetas cilíndricas

3.3.1 Dosificación del material

A partir del volumen de los moldes se determinó la cantidad total de material necesario para cada probeta. Como punto de partida, se tomó la dosificación óptima reportada previamente, correspondiente a 75% arena y 25% PEAD (Torres G. & Niño M., 2025), a partir de la cual se varió el contenido de PEAD en intervalos del 3%, con el fin de verificar su resistencia. De esta forma, se evaluaron tres dosificaciones: la primera con 22% de PEAD y 78% de arena; la segunda con 25% PEAD y 75% arena, y la tercera con 28% de PEAD y 72% de arena. Se realiza la fabricación de las probetas cilíndricas con el fin de determinar la resistencia máxima y su respectiva densidad para con ello realizar la dosificación de los adoquines.

3.3.2 Elaboración de las probetas cilíndricas

3.3.2.1 Moldeado de probetas

Se fabricaron tres probetas cilíndricas por cada dosificación, para los cuales el material se dividió en tres fracciones iguales, para garantizar así un correcto proceso de mezclado. El molde se engrasa y se somete a un proceso de calentamiento previo, para posteriormente aplicar cada capa, retirando el molde cada 5 minutos con el fin de mezclar el material y asegurar la correcta fusión entre el PEAD y la arena.

3.3.2.2 Compactación y desencofrado

Una vez colocadas las tres capas y verificada la correcta fusión de los materiales, se retira el molde y se procede a compactar mediante la prensa hidráulica, empleando un pistón con escala graduada que permite controlar previamente el nivel de presión ejercido, garantizando así la altura deseada en las probetas. Al finalizar el proceso de compactación, se retira el molde y se deja enfriar durante aproximadamente 30 minutos, para luego desencofrar con la ayuda del gato hidráulico.

Por último, estas probetas fueron sometidas al ensayo de compresión, a través de la prensa convencional, presente en las instalaciones de la universidad. Todo el proceso de fabricación se puede evidenciar en el apéndice C.

3.4 Fabricación de adoquines

El registro fotográfico de la fabricación y desencofrado de los adoquines se evidencia en el apéndice D.

3.4.1 Proyección de la masa del adoquín.

Se realizó una revisión bibliográfica de la norma NTC 2017, donde determina que el espesor estándar de los adoquines debe ser mayor o igual a 40 mm para uso peatonal y mayor o igual a 60 mm para uso vehicular. Por ende, el adoquín a fabricar presenta dimensiones de 23x11x6 cm, con un volumen total de 1518 cm³.

Para la obtención de la masa objetivo se calculó mediante la ecuación 1 y se determinó un porcentaje de pérdida de 7%, donde será útil para garantizar la equivalencia en la densidad deseada.

Ecuación 1

Masa del adoquín.

$$\text{Masa del adoquín} = \rho * V_{\text{adoquín}}$$

Donde:

P: densidad promedio de las probetas

Vadoquín: Volumen proyectado del adoquín.

3.4.2 Dosificación del material

La densidad obtenida en las probetas cilíndricas se empleó como referencia para establecer la dosificación del material destinado a la fabricación de los adoquines, donde la masa correspondiente a cada componente se calculó a través de la relación porcentual, garantizando que la mezcla mantuviera la misma relación de cantidades.

3.4.3 Moldeado y mezclado.

El molde es previamente engrasado y colocado en el horno a temperatura óptima para que, al depositar la primera capa del material, se logre una buena adherencia y este se fusionara rápidamente. El proceso se realizó en tres capas de igual cantidad de material, donde cada 5 minutos se retira el molde para mezclar, garantizando una mezcla homogénea. Cada capa tuvo una duración de 30 minutos, tiempo suficiente para garantizar la correcta fusión del PEAD y la arena. Finalmente se retira el molde y se coloca su respectiva tapa para confinar el material. Con la ayuda de una prensa de banco, se aplica presión hasta que la tapa llegue a su tope, en el cual el adoquín tendrá las dimensiones deseadas.

3.4.4 Desencofrado del adoquín.

Se deja un tiempo aproximado de 40 minutos, para que el material alcance su estabilización y posterior enfriamiento, y luego proceder a desmoldar el adoquín teniendo cuidado para no generar fisuras.

3.4.5 Calculo de la densidad del Adoquín.

Este se realiza con el fin de comprobar su equivalencia con el promedio de la densidad optima de las probetas cilíndricas. Luego fueron sometidos al ensayo de compresión, para determinar la carga soportada por cada uno de ellos.

3.4.6 Fibras metálicas

Las fibras utilizadas para este refuerzo fueron obtenidas a partir de un cable acerado presente en el laboratorio, estas fibras fueron cortadas a través de la trazadora de metales, donde su longitud aproximada fue 5 cm. Las fibras fueron controladas y mezcladas con cada capa de material, colocándolas de forma horizontal a lo largo de cada capa. Al momento de realizar la

mezcla, estas se fueron reacomodando y distribuyendo de forma homogénea, ya que tendían a entrelazarse entre sí, proceso que se evidencia en el apéndice E.

3.4.6.1 Dosificación de las fibras metálicas

Se realizó una compensación en volumen respecto a la arena, iniciando el proceso con 0.5% e incrementando gradualmente este valor hasta obtener la mayor resistencia a la compresión posible, evitando que las fibras se apelmacen. Para ello, se calculó la masa de arena a compensar según el porcentaje de fibra definido, y a partir de esta se determinó el volumen ocupado por la arena, lo cual permitió establecer la masa correspondiente de fibras metálicas requerida, en función de su densidad. De esta forma, se determinó que el 1.5% era el porcentaje óptimo de fibras.

3.5 Ensayo a los adoquines

Para esta fase, los adoquines fueron sometidos a diferentes ensayos establecidos por la NTC 2017 y NTC 5147, entre los cuales encontramos:

3.5.1 Ensayo a compresión

Este ensayo fue realizado con la prensa convencional, que consiste en someter cada espécimen a un esfuerzo axial aplicado a carga constante de 5 mm/min hasta generar su falla, registrando la carga máxima soportada en kN. Con este valor, se determinó la resistencia a la compresión en MPa.

3.5.2 Absorción de agua.

Una vez fabricados, los adoquines fueron pesados en caliente y posteriormente dejados enfriar. A continuación, se sumergieron en una pileta con agua durante 24 horas, dentro de un ambiente con temperatura controlada. Finalmente, se secó su superficie para obtener la masa saturada de cada espécimen.

Ecuación 2

Absorción de agua

$$\% \text{ Absorción de agua} = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}}$$

Donde:

M_{sat}: Masa saturada

M_{sec}: Masa seca

3.5.3 Ensayo a flexo tracción

Previo a la ejecución del ensayo, los adoquines permanecieron sumergidos en agua durante 24 horas, con el fin de garantizar que las piezas se encontraran en estado saturado superficialmente seco (SSS) al momento de la prueba. El ensayo se realizó mediante el método de carga en tres puntos, para lo cual el adoquín se dispuso sobre dos apoyos separados a una distancia L, aplicando la carga de forma centrada y perpendicular a la superficie mediante la máquina universal, registrando la carga de rotura. Con este valor se calculó la resistencia a la flexión mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 3.

Resistencia a la tracción por flexión.

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

Donde:

P: Carga de rotura (N). **L**: Luz entre apoyos mm.

b: Ancho de la viga/probeta mm.

d: Altura (espesor) de la sección mm.

3.5.4 Abrasión

Para este ensayo se siguió los parámetros establecidos en la NTC 5147, donde permite calcular el desgaste, medido como pérdida de espesor, provocado por la acción de un disco abrasivo. Debido a que las instalaciones de la universidad no poseen los equipos necesarios para

realizar el ensayo, el adoquín es enviado al laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana, laboratorio que se encuentra acreditado, garantizando la confiabilidad de los resultados. El costo del ensayo por unidad fue de \$165.000 COP, asumido por el autor de la presente investigación.

4. Resultados

4.1 Caracterización de la arena fina

4.1.1 Granulometría

Para el respectivo proceso se utilizó la tamizadora mecánica, donde los resultados obtenidos en se evidencian a continuación:

Tabla 2
Granulometría de la arena fina

Malla No.	Peso del suelo retenido (g)	% Retenido parcial.	% Retenido acumulado (g).	% pasa	% Pasa según Art. 500	
No. 4	3.4	0.34	0.34	99.66	95	100
8	46	4.6	4.94	95.04	80	100
16	101.2	10.12	15.06	84.94	80	85
30	253.7	25.37	40.43	59.57	25	60
50	412.8	41.28	81.71	18.29	10	30
100	140.5	14.05	95.76	4.24	2	10
Fondo	42.4	4.24	100	0	0	0
Total	1000					
		Gravas: 0.34%	Arenas: 95.42%	Finos: 4.24%		

4.1.2 Propiedades de la arena fina

A continuación, se presenta la caracterización de la arena.

Tabla 3*Cuadro resumen propiedades de la arena.*

Propiedad	Resultado
Gravedad específica	2.66
Absorción	0.238%
Peso unitario del agregado S.S.S compactado	1.57 (Ka/m ³)
Peso unitario del agregado S.S.S suelto	1.46 (Ka/m ³)

4.2 Caracterización del PEAD

4.2.1 Peso específico

Para este ensayo se obtuvo como resultado un valor de gravedad específica de 0.93, el cual se encuentra dentro del rango reportado en la literatura para este material (0.93–0.97).

4.3 Elaboración de probetas cilíndricas y ensayo a compresión.

Una vez realizada las probetas conforme a lo establecido en la metodología, se realizó el ensayo a compresión en la prensa convencional. Los resultados obtenidos indican que la dosificación con mayor resistencia mecánica corresponde al 25% de PEAD, la cual fue empelada para la fabricación del adoquín.

Tabla 4
Resultados ensayo a compresión

Probeta	Dosificación (%PEAD)	Área (mm ²)	Fuerza (kN)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo promedio
1		1932.2	44.7	23.13	
2	22	1916.6	39.2	20.45	22.12
3		1908.9	43.5	22.79	
1		1940.8	44.8	23.08	
2	25	2008.5	43.3	21.56	22.89
3		1963.5	47.2	24.04	
1		1908.9	38.1	19.96	
2	28	1924.4	44.1	22.92	20.48
3		1897.3	35.2	18.55	

4.4 Fabricación de los adoquines.

La dosificación que presento la mejor resistencia a la compresión fue 25 %PEAD y 75% arena, con densidad promedio de 1.851 g/cm³, valor que se tomó como referencia para la fabricación del adoquín.

4.4.1 Dosificación del material

A partir de la densidad de las probetas (1.851 g/cm³), se determinó el peso teórico que debe alcanzar el adoquín, donde el resultado arrojado es 2810 g y se determinó un porcentaje de pérdida de 7%, para un total de 3010 gramos, correspondiente a una fracción de 18.28% de PEAD (550 g) y 81.72% de arena (2460 g).

4.4.2.1 Mezclado y desencofrado del adoquín

El material se dividió en tres capas iguales, para asegurar una correcta distribución del material. El proceso de mezclado, la compactación y el desencofrado se realizó de acuerdo con lo descrito anteriormente en la metodología.

Figura 1

Mezcla del adoquín.



4.4.3 Cálculo densidad del adoquín

Se realizaron tres adoquines, a los cuales se les realizó el cálculo de densidad, obteniendo un valor promedio de 1.845 g/cm^3 , valor muy cercano a la densidad obtenida de las probetas (1.851 g/cm^3), lo que indica que se mantienen sus propiedades, por lo cual se procede a realizar el ensayo a compresión. El primer adoquín registró una carga de 399.2 kN , equivalente a un esfuerzo de 28.93 MPa ; el segundo, una carga de 403.8 kN , equivalente a 29.26 MPa ; y el tercero, una carga de 443.7 kN , equivalente a 32.15 MPa , obteniéndose un esfuerzo promedio de 30.11 MPa .

4.4.4 Fibras metálicas

4.4.4.1 Dosificación de las fibras

La densidad de las fibras es de 4.5 g/cm^3 , Para esta dosificación se inició con 0.5% de fibra, para conocer este valor en equivalencia de arena se multiplica el valor total de arena por 0.5% , para luego calcular el volumen ocupado por esa fracción de arena y por último se multiplica

ese volumen por la densidad de las fibras, obteniendo la masa de fibras a incorporar. Este proceso se repitió para 1% y 1.5%, ya que al llegar al 2% la cantidad de fibras era muy alta, impidiendo mezclar bien los materiales por lo que se descartó su implementación.

Tabla 5*Dosificación del adoquín reforzado*

Componente	0.5%	1%	1.5%
PEAD (g)	550	550	550
Arena (g)	2447.7	2435.4	2423.1
Fibras (g)	37.89	75.82	113.7

4.4.5 Mezclado y desencofrado

El proceso de mezclado se llevó a cabo a través de tres capas de igual cantidad de material, donde ya iba incorporadas las fibras metálicas. El proceso de mezclado y desencofrado se realizó conforme fue descrito en la metodología.

4.4.6 Ensayo a compresión

Se realiza el ensayo a compresión a los tres adoquines fabricados variando la cantidad de fibras como se muestra a continuación;

Tabla 6*Ensayo a compresión variando porcentaje de fibras*

Contenido de fibras (%)	Dimensiones (cm)	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
0.5	23x11x6	427	30.94
1	23x11x6	452.8	32.81
1.5	23x11x6	488	35.36

A partir de los resultados obtenidos se evidencia que la dosificación de 1.5% de fibras alcanza la resistencia máxima, por lo cual se justifica su elección.

4.4.7 Medición de dimensiones y cálculo de densidad del adoquín reforzado

Por consiguiente, se realizó la fabricación de nueve adoquines con el fin de comprobar su densidad y realizar los diferentes ensayos.

Tabla 7

Densidad adoquines reforzados.

Muestra	Masa (g)	Densidad (g/cm ³)	Densidad promedio (g/cm ³)
A1	2801	1.845	
A2	2819	1.857	
A3	2825	1.861	
A4	2814	1.854	
A5	2791	1.839	1.868
A6	2867	1.889	
A7	2869	1.890	
A8	2872	1.892	
A9	2866	1.888	

A partir de los nueve adoquines la densidad promedio obtenida fue de 1.868 g/cm³, valor cercano a la densidad objetivo, lo que indica un buen criterio de aceptación al estar en el rango de $\pm 2\%$ mostrando una excelente uniformidad.

4.5 Ensayo de los adoquines

4.5.1 Ensayo a compresión

Para la realización del ensayo se aplicó carga constante de 5 mm/min, utilizando la máquina de compresión convencional sobre los 5 adoquines, obteniendo un promedio de resistencia de 36.61 MPa.

Tabla 8

Resultados ensayo a compresión adoquines reforzados

Adoquín	Carga Axial (kN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia promedio (MPa)
A1	488	35.36	36.61
A2	497.4	36.04	
A3	544.2	39.43	
A4	492.7	35.7	
A5	503.8	36.51	

Al partir de los resultados se realiza la comprobación con los parámetros establecidos por el artículo 510-13 del INVIAS, donde establece una resistencia mínima de 50 MPa, por lo que no se cumple con este requisito; sin embargo, los valores obtenidos se encuentran cercanos al límite normativo exigido.

Figura 2

Ensayo a compresión del adoquín reforzado.



4.5.2 Ensayo a absorción

Los cinco adoquines fabricados fueron dejados en saturación durante 24 horas, conforme a lo establecido en la NTC 2017, para la realización de su ensayo.

Tabla 9

Resultados ensayo absorción adoquines reforzados.

Adoquín	Masa seca (g)	Masa saturada (g)	Absorción (%)
A3	2825	2848.7	0.839
A5	2791	2824	1.182
A6	2867	2885.7	0.652
A7	2869	2890	0.732
A9	2866	2886.2	0.705
Promedio			0.822

Los resultados obtenidos en el ensayo de absorción evidencian que los adoquines compuestos de PEAD, arena y fibras metálicas cumplen ampliamente con la normativa vigente, al registrar un valor promedio de 0.822%, muy por debajo del límite máximo de 7% establecido por la NTC 2017.

Figura 3

Ensayo a absorción del adoquín reforzado.



4.5.3 Ensayo a flexo tracción

Para el ensayo de flexo-tracción se emplearon tres adoquines, los cuales fueron previamente saturados durante 24 horas, tal como lo dispone la NTC 2017. El resultado obtenido fue de 5.59 MPa valor que cumple con los requisitos establecidos por la NTC 2017, donde establecen un mínimo individual de 4.2 MPa.

Tabla 10

Resultados ensayo flexo tracción.

Adoquín	Fuerza axial (kN)	Módulo de rotura (MPa)
A6	7.39	5.32
A7	7.29	5.25
A9	8.61	6.20
Promedio		5.59

Figura 4

Ensayo a flexo tracción del adoquín reforzado.



4.5.4 Ensayo a abrasión

Se realizó el ensayo conforme a la NTC 5147, el cual fue desarrollado por la Universidad Pontificia, donde el adoquín obtuvo una longitud de huella corregida de 16 mm, resultado que

cumple con los parámetros descritos en la NTC 2017, donde establece una longitud de huella corregida menor a 23 mm. El registro completo del ensayo se presenta en el apéndice F.

5. Conclusiones

Se fabricaron adoquines reforzados con fibras metálicas empleando una compensación de 1.5% en función del peso total de la arena, lo que resultó en una dosificación de 2423 g de arena, 550 g PEAD y 117.3 g de fibras. Si bien la incorporación de este refuerzo permitió incrementar la resistencia a la compresión, alcanzando un valor promedio de 36.31 MPa, dicho valor continúa siendo inferior al límite mínimo de 50 MPa establecido por el artículo 510-13 del INVIAS.

Los resultados obtenidos en el ensayo de flexo-tracción cumplen con los requisitos mínimos establecidos por la NTC 2017, al alcanzar un valor de 5.59 MPa, superior al mínimo individual de 4.2 MPa exigido por la norma. Así mismo, se obtuvo un porcentaje de absorción promedio de 0.822%, valor que cumple satisfactoriamente con lo establecido por la normativa, la cual determina un máximo permisible de 7%. Finalmente, en el ensayo de abrasión se obtuvo una longitud corregida promedio de 16 mm, cumpliendo con lo dispuesto por la NTC 2017, que establece un límite máximo de 23 mm.

Al comparar los resultados obtenidos con los del proyecto anterior (Torres G. & Niño M., 2025), se evidencia una mejora significativa en el desempeño mecánico del material. La resistencia a la compresión reportada en dicho estudio fue de 18.99 MPa, mientras que en la presente investigación el adoquín sin reforzar alcanzó 30.11 MPa y el adoquín reforzado con fibras metálicas llegó a 36.31 MPa, valor que supera ampliamente la referencia y equivale casi al doble de la resistencia obtenida en el estudio previo. Dicha mejora se atribuye a los ajustes

implementados en el proceso de fabricación, incluyendo factores como la temperatura, proceso de mezclado y el incremento del espesor a 6 cm.

Adicionalmente, se realizó una revisión bibliográfica de la norma NTC 3829, titulada “Adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano”, la cual establece los valores de resistencia a la compresión según el tipo de adoquín. Para el tipo II, la norma exige una resistencia individual mínima de 33 MPa y un promedio de 38 MPa para un conjunto de cinco adoquines. Para tipo III 17,2 y 20,7 MPa respectivamente. Al comparar estos valores con los resultados obtenidos, el adoquín reforzado cumple con dicho requisito, por lo que su uso resulta adecuado para tránsito vehicular ocasional y áreas mixtas peatonales-vehiculares, dado que presenta una resistencia intermedia-baja.

Referencias Bibliográficas

- Calvache H., D. A. (2024). *Fabricación de adoquines provenientes de “desechos” de losas de Transmilenio*. <https://repositorio.unal.edu.co/items/9919d9de-7d85-4bee-ad05-fd6237818cb9>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2017). *NTC 2017: Adoquines de concreto para pavimentos*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *NTC 92: Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados*.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2024). *NTC 5147: Métodos de ensayo para la determinación de la resistencia a la abrasión*.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013a). *Art 500-13 Pavimentos de concreto hidraulico*.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2013b). *INV E- 128: Determinación de la gravedad específica de las partículas solidas de los suelos*.
- Mena-Alonso, Á., C. González, D., Mínguez, J., & A. Vicente, M. (2024). Mechanical behavior of high-strength steel fiber-reinforced concrete. In *Fiber-Reinforced Composites - Recent Advances, New Perspectives and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1004302>
- Olivares Santiago, M., Galán Marín, C., & Roa Fernández, J. (2003). Los composites. Características y aplicaciones en la edificación. *Informes de La Construcción*, 54(484), 45–62. <https://doi.org/10.3989/ic.2003.v54.i484.568>
- Quiminet. (2011). *Ventajas y aplicaciones del polietileno de alta densidad (HDPE)*. <https://www.quiminet.com/articulos/ventajas-y-aplicaciones-del-polietileno-de-alta-densidad-hdpe-2577371.htm>

- Sierra J., J. A. (2016). *Usos y aplicaciones del plástico PEAD reciclado en la fabricación de elementos estructurales para construcción de vivienda en Colombia*.
https://redcol.minciencias.gov.co/Record/ESCUELAIG2_1e8695c08e0bc1b439b8cce962a8e6e3
- Techduto Solutions. (n.d.). *Reciclaje del PEAD*. Retrieved July 5, 2026, from
<https://techduto.com.br/es/recurso/reciclagem-pead/>
- Torres G., K. V., & Niño M., J. S. (2025). *Fabricación de un prototipo de adoquín compuesto por arena-PEAD mediante tratamiento térmico*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- UNEP. (2023). *Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos*.
<https://www.wwf.org.co/?389650/plasticos-de-un-solo-uso-prohibidos-Colombia>
- Vergara G., D. O. (2009). *Eficiencia en la transferencia de cargas en juntas transversales de pavimento rígido reforzado con fibras metálicas*.
<https://repositorio.unal.edu.co/items/850f8edc-0434-47f7-bb33-4afc0fd773c5>
- WWF. (2024). *Un paso clave en la lucha contra la contaminación por plásticos de un solo uso en Colombia*.