



CARACTERIZACIÓN DE
ADOQUINES ELABORADOS A
PARTIR DE PLÁSTICO
RECICLADO

Karen Margarita Arias Rodriguez
Lizbeth Vargas Forero

UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2023

Caracterización de adoquines elaborados a
partir de plástico reciclado

Karen Margarita Arias Rodríguez
Lizbeth Vargas Forero

Trabajo de investigación presentada(o) como requisito para optar al título de: ingeniero
ambiental / Ingeniería Ambiental

Director (a):
M.Sc. Ing. Nayive Nieves Pimiento

UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA AMBIENTAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2023

Contenido

1. Planteamiento del problema	6
1.1. Descripción del problema.....	6
1.2. Delimitación del problema.....	7
2. Justificación	7
3. Marco teórico.....	8
4. Objetivos.....	9
5. Materiales y métodos.....	10
6. Resultados y discusión	14
7. CONCLUSIONES.....	17

Figuras

Figura. 1 Dimensiones adoquín ecológico empleado en las 11 probetas.

Figura. 2 Absorción de humedad

Figura. 3 Resistencia a la abrasión.

Figura. 4 Disposición de las probetas en la máquina Universal de Ensayos.

Figura. 5 Curvas de Esfuerzo - Deformación para las 5 probetas estudiadas.

Tablas

Tabla 1. Cantidad y notación de probetas empleadas por ensayo mecánico realizado

Tabla 2. Relación de materiales y equipos empleados.

Tabla 3. Consolidado de resultados de la prueba del módulo de rotura.

Tabla 4. Consolidado de resultados de la prueba de adsorción de humedad.

Tabla 5. Consolidado de resultados de la prueba de la resistencia a la abrasión.

Resumen

La investigación actual presenta los resultados de la caracterización de adoquines producidos por la empresa Ecoplasticos S.A.S., compuestos por una mezcla de polipropileno con polietileno de alta y baja densidad provenientes de procesos postindustriales y posconsumo. La metodología y análisis de los adoquines se llevaron a cabo siguiendo las Normas Técnicas Colombianas NTC-2017 y NTC-5147. Un total de 11 muestras se sometieron a pruebas de absorción de agua, resistencia a la flexión (módulo de rotura) y resistencia a la abrasión. Los resultados experimentales mostraron un comportamiento similar a los parámetros físicos y mecánicos de la NTC-2017. El promedio de resistencia a la flexión fue de 1,47 +/- 0,16 toneladas (11,08 +/- 0,76 Mpa) sin absorción de agua. Además, se observó el cumplimiento de la NTC-5147 en el ensayo de resistencia a la abrasión. En conclusión, se puede considerar el uso de los adoquines elaborados con plástico reciclado como una alternativa para reducir los contaminantes ambientales derivados de los plásticos.

Abstract

The current research presents the results of the characterization of pavers produced by the company Ecoplasticos S.A.S., composed of a mixture of polypropylene with high and low-density polyethylene from post-industrial and post-consumer processes. The methodology and analysis of the pavers were carried out following the Colombian Technical Standards NTC-2017 and NTC-5147. A total of 11 samples were subjected to tests of water absorption, flexural strength (modulus of rupture), and abrasion resistance. The experimental results showed a behavior similar to the physical and mechanical parameters of NTC-2017. The average flexural strength was 1.47 +/- 0.16 tons (11.08 +/- 0.76 MPa) without water absorption. In addition, compliance with NTC-5147 was observed in the abrasion resistance test. In conclusion, the use of pavers made with recycled plastic can be considered an alternative to reduce environmental pollutants derived from plastics.

Introducción

En el territorio colombiano, se dispone anualmente 11.6 millones de toneladas de residuos sólidos en áreas aprobadas, como rellenos sanitarios y celdas de contingencia, así como en áreas no aprobadas, como vertederos al aire libre. La ciudad de Bogotá produce alrededor de 2.263.624 toneladas de residuos sólidos cada año, seguida de Medellín con 766.912 toneladas anuales, Cali con 609.433 toneladas anuales y Barranquilla con 534.662 toneladas anuales. [1]. Según estas cifras, se puede concluir que las ciudades más pobladas y los centros urbanos son las principales generadoras de residuos sólidos.

Es fundamental aplicar estrategias de economía circular y gestión apropiada de los residuos sólidos producidos en el país, ya que, según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [2], la disposición inadecuada de los residuos sólidos representa una de las causas principales de la

contaminación del aire y agua, lo que podría tener efectos negativos en la salud de las personas. Además, la acumulación de residuos plásticos en los ecosistemas también puede tener un impacto negativo en la biodiversidad. Un informe de la Fundación Ellen MacArthur en 2019 [3] sugirió que, si no se implementan medidas para abordar este problema, para el año 2050 habrá más plásticos que peces en los océanos.

Es fundamental adoptar estrategias sostenibles de manejo de residuos que contemplen la disminución, separación y recuperación. Estas medidas no solo permiten reintroducir materiales en los procesos productivos, sino que también previenen la aparición de consecuencias ambientales y sociales. Según un estudio llevado a cabo por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [4], la implementación de estas técnicas puede disminuir significativamente las consecuencias adversas de una gestión inadecuada de los residuos.

A nivel nacional, existen instrumentos normativos de planificación que permiten definir estas estrategias de gestión y economía circular para los residuos generados. Entre ellos se destacan el Decreto 2891/2013 [5] y la Resolución 0754/2014 [6]. Estos instrumentos marcan los lineamientos de separación, almacenamiento, recolección, transporte y aprovechamiento, así como programas de educación en gestión de residuos y estrategias para su aprovechamiento.

A pesar de la existencia de regulaciones en Colombia para recuperar y reutilizar residuos, incluyendo plásticos, solo se logra aprovechar el 17% de ellos [7]. En contraste, países como España y Holanda tienen tasas de recuperación de residuos del 37% y 99%, respectivamente, y otros 27 países de la Unión Europea tienen una tasa promedio cercana al 67% [8]. Se espera que estos porcentajes de recuperación aumenten significativamente con la implementación de prácticas de aprovechamiento en sectores económicos que utilizan plásticos de un solo uso. En Colombia, se estima que el consumo de estos materiales es de 1.250.000 toneladas al año [9], lo que significa que cada persona genera alrededor de 24 kg/año de residuos plásticos [10].

El objetivo del Gobierno Nacional, liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), es convertir los plásticos de un solo uso en reutilizables para 2030 [11]. Para lograr esta meta, es necesario implementar estrategias de economía circular y nuevos proyectos que se centren en el aprovechamiento de residuos sólidos derivados del plástico. Una de estas estrategias puede ser la producción de adoquines y ladrillos a partir de plásticos reciclados. Esta tecnología ha ganado popularidad porque puede reducir significativamente la cantidad de residuos plásticos que terminan en rellenos sanitarios y cuerpos de agua, y ofrece una alternativa ecológica a los adoquines de hormigón convencionales. La elaboración de productos a partir de plásticos reciclados es una tecnología que se ha desarrollado con el objetivo de aprovechar los residuos plásticos y reducir su impacto ambiental [12].

En este contexto, la elaboración de adoquines a partir de plástico reciclado se presenta como una alternativa sostenible que contribuye a la reducción de residuos plásticos y a la conservación del medio ambiente. Además, estos adoquines pueden cumplir con los estándares de calidad y resistencia requeridos en la industria de la construcción, ¿Cómo comprobar esta declaración si las características mencionadas no están respaldadas por una norma específica única y exclusivamente para materiales elaborados a partir de plástico reciclado? Por ende, el objetivo general de este artículo es caracterizar mecánicamente adoquines elaborados a partir de plástico reciclado bajo las Normas Técnicas

Colombiana NTC-2017 y NTC-5147 con el propósito de determinar la capacidad para absorber agua, identificar la resistencia a la flexotracción del adoquín (módulo de ruptura) y evaluar la capacidad de desgaste (resistencia a la abrasión).

1. Planteamiento del problema

La falta de una caracterización completa y exhaustiva de los adoquines elaborados con plástico reciclado limita la evaluación de su calidad, viabilidad como alternativa sostenible en la construcción y su cumplimiento de las normas técnicas aplicables.

1.1. Descripción del problema

La producción de materiales de construcción a partir de materiales reciclados es una estrategia importante para reducir la cantidad de residuos plásticos en el medio ambiente y promover la sostenibilidad en la industria de la construcción. En este contexto, la elaboración de adoquines con plástico reciclado se ha convertido en una alternativa viable y prometedora.

Sin embargo, para garantizar la calidad de estos materiales y su viabilidad como alternativa sostenible en la construcción, es necesario llevar a cabo una caracterización completa de los adoquines elaborados con plástico reciclado. La caracterización de estos materiales implica la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas, y la comparación de estos resultados con las normas técnicas aplicables.

Por lo tanto, el planteamiento del problema de investigación consiste en la caracterización de adoquines elaborados a partir de plástico reciclado, con el objetivo de evaluar su calidad y viabilidad como alternativa sostenible en la construcción. Para lograr este objetivo, se utilizarán diferentes técnicas y metodologías para evaluar la resistencia a la flexión, la absorción de agua, la resistencia a la abrasión y otros parámetros físicos y mecánicos de los adoquines.

Además, se compararán los resultados de estas pruebas con las normas técnicas aplicables, como la Norma Técnica Colombiana NTC-2017 y la NTC-5147, para determinar si los adoquines elaborados con plástico reciclado cumplen con los requisitos de calidad necesarios para su uso en la construcción.

Es importante considerar otros aspectos relevantes para evaluar su viabilidad como alternativa sostenible en la construcción. Estos aspectos pueden incluir la durabilidad a largo plazo, el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida del producto y la viabilidad económica de su producción a gran escala.

La durabilidad de los adoquines es un factor crucial a considerar, ya que los materiales utilizados en la construcción deben ser capaces de soportar las condiciones ambientales y las cargas a las que estarán expuestos durante su vida útil. Por lo tanto, se pueden realizar pruebas de envejecimiento acelerado para evaluar cómo los adoquines elaborados con plástico reciclado resisten la exposición

a condiciones climáticas adversas, cambios de temperatura y otros factores que pueden afectar su integridad estructural con el tiempo.

Asimismo, es importante evaluar el impacto ambiental de los adoquines de plástico reciclado en comparación con los adoquines convencionales fabricados con materiales no reciclados. Se pueden realizar análisis de ciclo de vida para determinar la cantidad de energía y recursos utilizados en la producción de cada tipo de adoquín, así como las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes asociados. Estos análisis pueden ayudar a identificar las ventajas ambientales de los adoquines de plástico reciclado y su contribución a la reducción de la huella ecológica de la industria de la construcción.

Es fundamental considerar la viabilidad económica de la producción de adoquines de plástico reciclado a gran escala. Esto implica evaluar los costos de producción, la disponibilidad y el costo de los materiales reciclados, así como el costo de implementar tecnologías y procesos de fabricación adecuados. Estos aspectos económicos son clave para determinar la viabilidad comercial de los adoquines de plástico reciclado y su competitividad en el mercado de materiales de construcción.

1.2. Delimitación del problema

El presente estudio se enfocará en la caracterización física y mecánica de los adoquines elaborados exclusivamente con plástico reciclado, excluyendo otros materiales o combinaciones, con el objetivo de evaluar su calidad y viabilidad como alternativa sostenible en la construcción. Se limitará a la evaluación de propiedades como resistencia a la flexión, absorción de agua y resistencia a la abrasión, así como a la comparación de los resultados obtenidos con las normas técnicas colombianas NTC-2017 y NTC-5147 para determinar el cumplimiento de los requisitos de calidad necesarios.

2. Justificación

La producción de materiales de construcción a partir de materiales reciclados es una estrategia importante para reducir la cantidad de residuos plásticos en el medio ambiente y promover la sostenibilidad en la industria de la construcción. En este contexto, la elaboración de adoquines con plástico reciclado se ha convertido en una alternativa viable y prometedora.

Sin embargo, para garantizar la calidad de estos materiales y su viabilidad como alternativa sostenible en la construcción, es necesario llevar a cabo una caracterización completa de los adoquines elaborados con plástico reciclado. La caracterización de estos materiales implica la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas, y la comparación de estos resultados con las normas técnicas aplicables.

Por lo tanto, el planteamiento del problema de investigación consiste en la caracterización de adoquines elaborados a partir de plástico reciclado, con el objetivo de evaluar su calidad y viabilidad como alternativa sostenible en la construcción. Para lograr este objetivo, se utilizarán diferentes técnicas y metodologías para evaluar la resistencia a la flexión, la absorción de agua, la resistencia a la abrasión y otros parámetros físicos y mecánicos de los adoquines.

Además, se compararán los resultados de estas pruebas con las normas técnicas aplicables, como la Norma Técnica Colombiana NTC-2017 y la NTC-5147, para determinar si los adoquines elaborados con plástico reciclado cumplen con los requisitos de calidad necesarios para su uso en la construcción.

3. Marco teórico

En el contexto actual de promoción de prácticas sostenibles a nivel global, se ha incrementado la importancia de emplear materiales reciclados en la construcción [13]. Entre las alternativas de materiales reciclados, los plásticos reciclados han cobrado mayor relevancia debido a su fácil obtención y las múltiples formas en que se pueden transformar [14].

En este sentido, los adoquines de plástico reciclado se han posicionado como una alternativa interesante en la construcción de vías peatonales, calles y plazas. Estos adoquines están fabricados a partir de residuos de plástico como botellas, envases y bolsas, los cuales son triturados y compactados en moldes [15].

Además de la sostenibilidad ambiental que ofrecen los adoquines de plástico reciclado, su utilización también tiene beneficios económicos, ya que su producción es más económica que la de los adoquines convencionales de hormigón [16]. Asimismo, al tener una vida útil prolongada y resistir la degradación ambiental, su mantenimiento es mínimo, lo que representa una ventaja adicional [17].

En la actualidad, diversos países han implementado la utilización de adoquines de plástico reciclado en la construcción de vías peatonales y calles, como Australia, Alemania, Holanda y Estados Unidos. En representación de América Latina, el país que le ha apostado por la implementación de adoquines de plástico reciclado en la construcción es Brasil [18].

Durante la última década, se ha incrementado un cambio hacia la sostenibilidad y el uso de materiales reciclados en sus proyectos. Los adoquines de plástico reciclado se han presentado como una opción atractiva y sostenible en comparación con los adoquines convencionales de hormigón [16]. Se han llevado a cabo múltiples investigaciones el mundo con el propósito de evaluar el rendimiento de los adoquines hechos de plástico reciclado en distintos contextos. Por ejemplo, un estudio llevado a cabo en Australia [20] evaluó la resistencia a la flexotracción, la absorción de agua y la durabilidad de los adoquines de plástico reciclado, y los resultados indicaron que estos tienen una alta resistencia a la compresión y una baja absorción de agua, lo que los hace aptos para ser utilizados en áreas con alta humedad.

En Europa, se realizó un estudio por Kucharska [21] para comparar la resistencia mecánica y durabilidad de los adoquines de plástico reciclado con los adoquines convencionales de hormigón,

y se encontró que los adoquines de plástico reciclado tienen una alta resistencia mecánica y durabilidad comparable a los adoquines de hormigón. Asimismo, un estudio por D. Singh [22] comparó la resistencia y durabilidad de los adoquines de plástico reciclado con los adoquines de concreto convencionales, y se concluyó que los adoquines de plástico reciclado es una opción factible para su uso en aplicaciones de pavimentación debido a su igual resistencia y durabilidad que los adoquines de concreto.

A pesar de que en Colombia existen pocas iniciativas de utilización de materiales reciclados en la construcción, se realizó una investigación por Sarmiento [23] para evaluar la resistencia mecánica y permeabilidad de los adoquines de plástico reciclado en comparación con los adoquines de hormigón, y se encontró que los adoquines de plástico reciclado tienen una resistencia mecánica similar a los adoquines de hormigón y una permeabilidad comparable en condiciones de laboratorio.

Estos estudios sugieren que los adoquines de plástico reciclado son una opción rentable y sostenible en comparación con los adoquines de concreto convencionales, debido a su menor costo de producción y menor impacto ambiental.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Caracterizar los adoquines elaborados a partir de plástico reciclado, siguiendo las Normas Técnicas Colombianas NTC-2017 y NTC-5147, con el fin de evaluar su calidad y viabilidad como alternativa sostenible en la construcción.

4.2 bObjetivos Específicos

Realizar pruebas de absorción de agua en los adoquines, para evaluar su capacidad de resistencia a la humedad y su durabilidad.

Determinar la resistencia a la flexotracción de los adoquines media de ruptura, para evaluar su capacidad para soportar cargas y deformaciones.

Evaluar la capacidad de desgaste de los adoquines mediante pruebas de resistencia a la abrasión, para evaluar su resistencia a la erosión y desgaste.

Comparar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas con los parámetros establecidos en las Normas Técnicas NTC-2017 y NTC-5147, para determinar si los adoquines elaborados con plástico reciclado cumplen con los requisitos de calidad necesarios para su uso en la construcción.

5. Materiales y métodos

La caracterización fue realizada con los adoquines suministrados por la empresa Ecoplasticos S.A.S., que se fundó en 1999 en Cali con el objetivo de reutilizar los desechos plásticos. La empresa cuenta con tres líneas de producción y transformación: industrial, agrícola y urbana. Para la elaboración de los adoquines, se utiliza una combinación de polipropileno y polietileno de alta densidad, recolectados en un 60% como material post-industrial y en un 40% como material post-consumo. Desde 1999, ECOPLASTICOS ha transformado alrededor de 9,600,000 kg de material. [24].

Para caracterizar los adoquines, se utilizaron las normas técnicas colombianas NTC-2017 y NTC 5147, que son ampliamente utilizadas en Colombia para evaluar los adoquines de concreto para pavimentos y la capacidad de los materiales empleados en suelos y revestimientos para resistir la abrasión. Como no existe una norma específica para evaluar las características de los adoquines elaborados con plástico reciclado en Colombia, estas normas se utilizan para establecer los requisitos técnicos y las propiedades que deben cumplir los adoquines de plástico reciclado.

La NTC-2017 es una norma que establece los requerimientos técnicos para la elaboración y el control de calidad de adoquines de concreto destinados para pavimentos, que incluyen las especificaciones de los materiales y las propiedades físicas y mecánicas que deben cumplir. Cuando se evalúan adoquines de plástico reciclado, la NTC-2017 puede utilizarse como punto de referencia para definir los criterios técnicos y de calidad que deben cumplirse en términos de su resistencia mecánica, capacidad de carga y durabilidad [25].

Por otro lado, la norma NTC 5147 establece el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de los materiales utilizados en pisos y pavimentos. Al utilizar esta norma como referencia, es posible evaluar la resistencia a la abrasión de los adoquines de plástico reciclado y compararlos con otros materiales utilizados en pavimentos y pisos [26].

Muestra

Los especímenes utilizados fueron elaborados a partir de adoquines compuestos por una mezcla de polipropileno con polietileno de alta y baja densidad, provenientes de procesos post industriales y de post consumo llevados a cabo por la empresa Ecoplasticos S.A.S. En la figura 1 se relacionan las dimensiones de los adoquines empleados en las 11 probetas.

Dimensiones Adoquín

Largo = 31.0 cm, Ancho = 14.5 cm y espesor = 4.8 cm

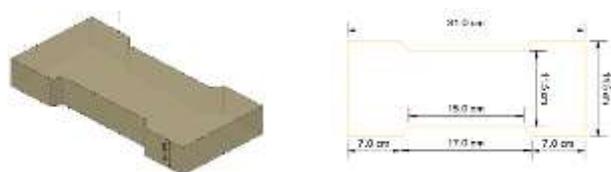


Figura. 1 Dimensiones adoquín ecológico empleado en las 11 probetas.

Descripción del diseño experimental

Para la caracterización mecánica de los adoquines plásticos, se realizaron pruebas por quintuplicado en el estudio del módulo de rotura y por triplicado para los análisis de humedad y abrasión. En la tabla 1 se detallan las notaciones empleadas para cada uno de los ensayos y el detalle de las 11 probetas usadas, lo anterior en función de cada uno de los ensayos objeto de estudio. Los ensayos se desarrollaron en el laboratorio de la Universidad ECCI y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede tecnológica Bogotá-Colombia.

Tabla 1. Cantidad y notación de probetas empleadas por ensayo mecánico realizado

ENSAYO	PROBETAS	
	#	NOTACIÓN
Módulo Rotura (NTC-2017)	1	PROB-1-MR
	2	PROB-2-MR
	3	PROB-3-MR
	4	PROB-4-MR
	5	PROB-5-MR
Absorción Humedad – (NTC-2017)	1	PROB-1-AH
	2	PROB-2-AH
	3	PROB-3-AH
Abrasión - (NTC-5147)	1	PROB-1-AB
	2	PROB-2-AB
	3	PROB-3-AB

Se utiliza el ensayo de absorción de humedad para calcular la habilidad de un material para retener agua, lo que puede afectar su durabilidad, resistencia y otras propiedades físicas y químicas. En este ensayo, una muestra del material se sumerge en agua durante un tiempo específico y se mide la cantidad de agua absorbida. Después de secar la muestra, se pesa nuevamente para determinar el cambio de peso. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron tres adoquines de plástico con un peso aproximado de 1.4 kg, los cuales se sumergieron en agua durante 24 horas. Luego, se pesaron los especímenes para determinar su masa inmersa en agua.

A continuación, en la figura 2 se observan las probetas sumergidas en agua.



Figura. 2 Absorción de humedad

La resistencia a la abrasión es una medida de la capacidad de un material para resistir el desgaste generado por la fricción. Para llevar a cabo el ensayo, se utiliza un equipo especializado que somete una muestra del material a una fuerza de fricción controlada. La muestra se frota contra una superficie de prueba con un material abrasivo, como arena, papel de lija o un disco metálico ancho, mientras se mide la pérdida de masa del material o la profundidad de la huella o marca causada por la abrasión [29].

Para evaluar la resistencia a la abrasión de los adoquines de plástico reciclado, se sometieron tres especímenes a desgaste en condiciones controladas. Se utilizó un disco giratorio a una velocidad de 75 revoluciones por minuto durante un minuto, según lo establecido por la norma NTC 5147. Se empleó arena de cuarzo angulosa para ejercer presión sobre los especímenes, los cuales presentaron desgaste en un tiempo de dos minutos.

A continuación, en la figura 3 se observan las probetas sometidas a desgaste:



Figura.3 Resistencia a la abrasión.

El ensayo de flexo tracción, es una técnica empleada para evaluar la rigidez y la resistencia de un material ante cargas de flexión. Durante este proceso, se somete una muestra del material a una carga controlada de flexión mediante un dispositivo de prueba especializado, como una máquina universal de ensayos, mientras se registran la carga y la deflexión.

El valor del módulo de rotura se obtiene a partir de la relación entre la carga máxima y la deflexión en el punto de rotura de la muestra. Este valor indica la resistencia del material a la rotura bajo cargas de flexión y permite determinar su idoneidad para aplicaciones que requieren resistencia a la flexión, como vigas, puentes, columnas y otros elementos estructurales.

Para realizar el ensayo, se utilizan especímenes de las mismas dimensiones y pesos, que se someten a una carga a flexión hasta llegar a la rotura de la probeta. De esta manera, se establece la capacidad del material para soportar cargas o fuerzas aplicadas.

En la figura 4 se observan las probetas sometidas a cargas máximas hasta llegar a la rotura.



Figura. 4 Disposición de las probetas en la máquina Universal de Ensayos.

Toma de datos.

La toma de datos se obtuvo bajo los procedimientos y protocolos del laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el laboratorio de la Universidad ECCI, Bogotá, Colombia.

Análisis de información y recursos utilizados.

El análisis de la información de los ensayos efectuados para la caracterización de las propiedades mecánicas de los adoquines, se llevó a cabo de acuerdo con las Normas Técnicas Colombianas NTC-2017 [25] y NTC-5147 [26]. En las ecuaciones 1 a 3 se presentan las formulaciones empleadas para las pruebas de: Modulo de rotura (1), Absorción de Humedad (2) y Abrasión (3).

$$M_r = \frac{[3 C_{max}(l_i - 20)]}{[(a_r + a_i) e_r^2]} \quad (1)$$

Donde:

M_r = Modulo de Rotura (Mpa o N/mm²)

C_{max} = Carga Máxima de rotura (N)

l_i = Longitud del rectángulo inscrito (mm)

a_r = Ancho real de la probeta (mm)

a_i = Ancho del rectángulo inscrito en la probeta (mm)

e_r = Espesor real de la probeta (mm)

$$Aa\% = \left[\frac{M_H - M_s}{M_s} \right] * 100 \quad (2)$$

Donde:

Aa% = Porcentaje de Adsorción de Humedad

M_H = Masa saturada (humedad) de la probeta (g)

M_s = Masa seca de la probeta (g)

$$lh = AB + (20.0 - Fc) \quad (3)$$

Donde:

lh = Longitud de la huella resultante (mm).

AB = Longitud de la huella medida (mm).

Fc = Factor de Calibración

La determinación de la Carga máxima de rotura (C_{max}), se hizo con base en las curvas de esfuerzo deformación resultantes del ensayo de compresión.

Frente a la relación de materiales y equipos en la tabla 2 se presenta el detalle de los mismos.

Tabla 2. Relación de materiales y equipos empleados.

Equipo/Material	Registro Fotográfico	
Maquina Universal de ensayos UH-50ª Shimadazu.		
Maquina Universal de Ensayos de Abrasión o Desgaste.		
Calibrador y Herramientas menores.		

6. Resultados y discusión

Se presentan los resultados y discusión en los numerales subsecuentes y teniendo en cuenta los ensayos realizados.

Módulo de rotura.

La ecuación (1) se utilizó para calcular el módulo de rotura a partir de los datos obtenidos de la carga máxima de rotura (C_{max}) de las cinco (5) probetas evaluadas. Luego, se realizó un análisis estadístico de los datos para determinar el valor promedio del módulo de rotura de los adoquines de plástico reciclado. Los resultados se presentan en la Tabla 3 y la Figura 5.

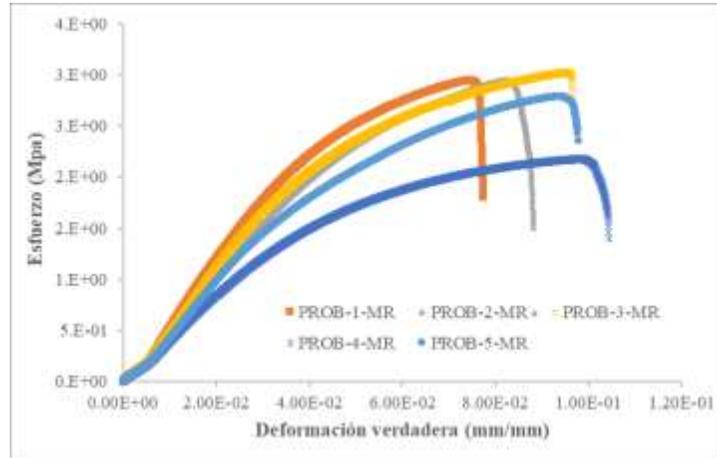


Figura. 5 Curvas de Esfuerzo - Deformación para las 5 probetas estudiadas.

Tabla 3. Consolidado de resultados de la prueba del módulo de rotura.

Notación Probeta	Resistencia a la flexotracción		Esfuerzo Maximo Curva E vs D		Carga máxima de rotura		Modulo Rotura	
	Re	Unidad	E	Unidad	Cmax	Unidad	Mr	Unidad
PROB-1-MR	1,561	Tonf	2,94,E+00	Mpa	1,53,E+04	N	11,50346	Mpa
PROB-2-MR	1,562	Tonf	2,95,E+00	Mpa	1,53,E+04	N	11,51083	Mpa
PROB-3-MR	1,6025	Tonf	3,02,E+00	Mpa	1,57,E+04	N	11,80929	Mpa
PROB-4-MR	1,1535	Tonf	2,18,E+00	Mpa	1,13,E+04	N	9,671654	Mpa
PROB-5-MR	1,4815	Tonf	2,79,E+00	Mpa	1,45,E+04	N	10,9176	Mpa
Promedio	1,47,E+00	Tonf	2,78,E+00	Mpa	1,44,E+04	N	11,08257	Mpa
Desviacion Estandar	1,64,E-01	Tonf	3,10,E-01	Mpa	1,61,E+03	N	0,76244	Mpa

Se obtuvo una resistencia promedio de 11.0826 Mpa para las cinco probetas, lo cual indica que la resistencia a la flexotracción de los adoquines con plástico reciclado es superior al promedio establecido por la NTC 2017 para adoquines de concreto, que es de 5,0 Mpa. Por lo tanto, los adoquines con plástico reciclado son adecuados para aplicaciones de pavimentación que no requieren una gran resistencia estructural, como áreas peatonales y zonas de baja afluencia de vehículos.

Adsorción de humedad.

El cálculo de la adsorción de humedad se realizó con base en la ecuación (2) y aunque se presentaron los resultados en porcentaje de adsorción para cada una de las tres (3) probetas estudiadas, no se observó adsorción de humedad debido a la naturaleza del material utilizado. En la tabla 4 se puede apreciar los resultados.

Parametro	Unidad	Notacion Probeta			Estadisticas	
		PROB-1-MR	PROB-2-MR	PROB-3-MR	Promedio	Desviacion Estandar
Masa saturada (humedad) de la probeta	g	1,4	1,7	1,5	1,53	0,12
Masa seca de la probeta	g	1,4	1,7	1,5	1,53	0,12
Porcentaje de Adsorción de Humedad	%	0	0	0	0	0

Tabla 4. Consolidado de resultados de la prueba de adsorción de humedad.

La falta de adsorción de agua en los adoquines de plástico reciclado se debe a su naturaleza hidrofóbica. Los plásticos son materiales no polares que no tienen la capacidad de atraer moléculas de agua [30]. Esto significa que no absorberán la humedad del aire, lo que evita que se presenten problemas de deformación o deterioro en los adoquines de plástico reciclado. Los adoquines suelen estar diseñados para ser permeables al agua, lo que significa que cualquier agua que caiga sobre ellos se drenará rápidamente.

Abrasión (desgaste)

El cálculo de la resistencia a la abrasión se realizó con base en la ecuación (3) y los resultados obtenidos de la longitud de la huella resultante, para cada una de las tres (3) probetas estudiadas. Posteriormente, se analizaron los datos y se determinó el valor promedio de desgaste de los adoquines plásticos. En la Tabla 5 se presentan los resultados.

Parametro	Unidad	Notacion Probeta			Estadisticas	
		PROB-1-MR	PROB-2-MR	PROB-3-MR	Promedio	Desviacion Estandar
Longitud de la huella medida	mm	160	170	170	167	4,7
Factor de Calibración	--	19,6	19,6	19,6	19,6	0,0000
Longitud de la huella resultante	mm	160,4	170,4	170,4	167	4,7
Diferencia entre medidas	mm	0,4	0,4	0,4	0,4	0

Tabla 5. Consolidado de resultados de la prueba de la resistencia a la abrasión.

La huella es aceptada para cada uno de los especímenes teniendo en cuenta la diferencia entre medidas y el factor de calibración, obteniendo como resultado un valor de 0,4mm, la norma NTC 5147 establece un valor máximo de 1mm para la profundidad de la huella después de la prueba de abrasión, por lo que el valor obtenido de 0,4mm indica que el material ha pasado la prueba satisfactoriamente y cumple con los requisitos establecidos por la norma.

7. CONCLUSIONES

Los adoquines de plástico reciclado representan una opción prometedora para su uso en pavimentos y vías peatonales debido a sus numerosas ventajas, tales como su bajo peso, fácil instalación y costos accesibles. Además, los resultados de las pruebas indican que estos adoquines no absorben humedad y su módulo de ruptura es superior al de los adoquines convencionales. También se ha encontrado que los adoquines de plástico reciclado tienen una buena resistencia al desgaste, lo que sugiere que son una opción durable y resistente para su uso en aplicaciones de pavimentación. En conjunto, estos hallazgos sugieren que los adoquines de plástico reciclado son una alternativa viable y eficiente para su uso en proyectos de construcción urbana e infraestructura vial.

Es importante destacar que aún se requieren más investigaciones y pruebas para evaluar otros aspectos del uso de adoquines de plástico reciclado, como su microscopía electrónica y su comportamiento en diferentes condiciones climáticas. Es fundamental asegurarse de que el proceso de producción de los adoquines de plástico reciclado se realice de manera responsable y sostenible, es decir, que se asegure que los materiales utilizados sean 100% reciclados.

En Colombia, aún no existe una normativa específica que permita identificar las características y condiciones de un adoquín fabricado a partir de plástico reciclado. Sin embargo, diversas iniciativas, como la empresa Eco Plásticos, han obtenido grandes resultados en la fabricación de estos productos. Al realizar ensayos y comparar los resultados con las especificaciones de la NTC 2017 y 5147 para adoquines de concreto, se ha podido establecer que los adoquines de plástico reciclado cumplen con los mismos estándares de calidad que los adoquines convencionales. Además, se ha observado que los valores de resistencia a la compresión y a la flexión de los adoquines de plástico reciclado son mucho más altos que los valores convencionales. Por lo tanto, se puede concluir que los adoquines de plástico reciclado no solo cumplen con los requisitos de calidad establecidos, sino que también presentan características superiores a las de los adoquines convencionales.

Es importante destacar que estas iniciativas son un gran paso hacia la construcción sostenible y la economía circular, ya que se promueve el reciclaje de plásticos y la creación de productos resistentes y duraderos. A pesar de lo anterior, es importante continuar avanzando en la elaboración y adopción de una regulación precisa y detallada que facilite el control de la fabricación y aplicación de los adoquines elaborados con plástico reciclado en el país colombiano.

Referencias

- [1] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) y Departamento Nacional de Planeación (DNP), “Informe nacional de disposición final de residuos sólidos 2020,” Republica de Colombia, pp. 3, 2021.
- [2] Organización Mundial de la Salud. (2016). Gestión de residuos sólidos en situaciones de emergencia. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259972/9789243565390-eng.pdf;jsessionid=FC2A2A3067FFA28BC77E838A150F930D?sequence=1>
- [3] Ellen MacArthur Foundation. (2019). The new plastics economy: Rethinking the future of plastics. https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/NPEC-Hybrid_English_22-11-17_Digital.pdf
- [4] Banco Interamericano de Desarrollo. (2018). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Gestión-de-Residuos-Sólidos-Urbanos-en-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- [5] Presidencia de la República de Colombia. (2013, diciembre 11). Decreto 2891 de 2013, Por el cual se reglamenta la gestión integral de residuos sólidos generados en la actividad agropecuaria y se dictan otras disposiciones. http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_2891_2013.html
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014, julio 16). Resolución 0754 de 2014, Por la cual se establecen los criterios y procedimientos para la clasificación y manejo de los residuos peligrosos generados en la atención en salud. https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/resoluciones/Resoluci%C3%B3n_754_de_2014.pdf
- [7] Asociación Nacional de Empresarios de Colombia. (2018). Recuperación y aprovechamiento de residuos en Colombia. <https://www.andi.com.co/Uploads/DocumentosAndi/ASOCIADOS-GERENCIA-AMBIENTAL/informe-final-bid-residuos-sol-dos.pdf>
- [8] Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea. (2018). Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32018L0851>
- [9] Departamento Nacional de Estadísticas (DANE), “Cuentas ambientales y económicas de flujos de materias de residuos sólidos”. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Pt-Cuenta-Residuos-2016p.pdf, 2018.
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), “Colombia aspira a que en 2030 el 100 % de los plásticos de un solo uso del mercado sean reutilizables o compostables”, República de Colombia, [En línea] 2023. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/colombia-aspira-a->

que-en-2030-el-100-de-los-plasticos-de-un-solo-uso-del-mercado-sean-reutilizables-o-compostables/,2023.

- [11] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Estrategia Nacional para la Gestión Ambiental de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) en Colombia,” 2018.
- [12] C. Heidrich and M. Vavrik, “Recycling of plastic waste: Screening for brominated flame retardants (BFRs),” *Waste Management*, vol. 28, no. 12, pp. 2763–2769, 2008.
- [13] Dondi, G., Vigliotti, M., & Raimondo, M. (2016). *Recycling waste materials in geopolymer concrete*. Springer.
- [14] Osman, M. A., & Shalaby, S. M. (2007). Utilization of recycled plastic bags in concrete paver blocks. *Waste Management*, 27(2), 204-214.
- [15] Shah, D. A., & Rana, D. A. (2013). Reuse of plastic waste in paver blocks. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3(3), 142-146.
- [16] Poon, C. S., & Chan, D. (2010). Feasibility study of using recycled plastic for road construction. *Waste Management*, 30(3), 503-510.
- [17] Rahman, M. A., Mannan, M. A., & Uddin, M. K. (2010). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Journal of Environmental Science and Natural Resources*, 3(2), 213-222.
- [18] Dondi, G., Vigliotti, M., & Raimondo, M. (2016). *Recycling waste materials in geopolymer concrete*. Springer.
- [19] Osman, M. A., & Shalaby, S. M. (2007). Utilization of recycled plastic bags in concrete paver blocks. *Waste Management*, 27(2), 204-214.
- [20] Kucharska, Ž. (2016). The use of recycled plastic in concrete paving block. *Procedia Engineering*, 151, 308-314.
- [21] Singh, D. (2014). Comparative study of conventional paving blocks and plastic paving blocks. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(7), 1-6.
- [22] Sarmiento, J. J., Cotes, J. M., & Reyes, D. (2018). Characterization of permeable pavement made with recycled plastic. *DYNA*, 85(205), 220-228.
- [23] Sarmiento, J., et al., "Evaluation of Mechanical Resistance and Permeability of Recycled Plastic Pavers in Comparison to Concrete Pavers," *Journal of Sustainable Development*, vol. 6, no. 1, pp. 43-50, 2018.
- [24] Ecoplasticos S.A.S. (2021). Quiénes somos. Recuperado de <https://www.ecoplasticos.com/quienes-somos/>
- [25] ICONTEC. (2017). NTC 2017: Adoquines de concreto para pavimentos - Requisitos técnicos. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [26] ICONTEC. (2003). NTC 5147: Materiales utilizados en pisos y pavimentos - Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
- [27] Kokta, B. V., & Daneault, C. (2012). Water Absorption and Water Vapor Transmission Properties of Natural Fibers and Their Composites. In *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites* (pp. 157-168). CRC Press.

- [28] Baley, C. (2015). Moisture Absorption and Desorption of Natural Fiber Composites. In Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites (pp. 171-193). Woodhead Publishing.
- [29] ASTM D570-98. (2010). Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM International.
- [30] Melo, L., & Hernandez, J. (2020). Estudio de la falta de adsorción de humedad en adoquines de plástico reciclado. Revista de Materiales Compuestos, 10(2), 50-56.