

**Desarrollo de prototipo de adoquín de concreto con adición de Polietileno de Alta Densidad
para pavimentos con bajos volúmenes de tránsito**

Eufredo de Jesús Gámez Tello



Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería
2020

**Desarrollo de prototipo de adoquín de concreto con adición de Polietileno de Alta Densidadⁱⁱ
para pavimentos con bajos volúmenes de tránsito**

Eufredo de Jesús Gámez Tello

Trabajo de grado para optar al título de magíster en ingeniería

Director
Luis Carlos Vives
(PhD/Engineering)

Codirector
Albeiro Diaz Valera
(Magister/Engineering)



Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería
2020

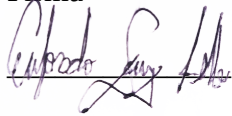
Evaluador 1
Comité de evaluación

Evaluador 2
Comité de evaluación

Evaluador *n*
Comité de evaluación

Yo, *Eufredo de Jesús Gámez Tello*, declaro que este trabajo de grado para optar al título de magíster de la Universidad del Magdalena no ha sido presentado para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad.

Firma

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Eufredo de Jesús Gámez Tello', written over a horizontal line.

Dedicatoria

v

Dedico el presente trabajo de grado a mi madre Lucy Abigail Tello Becerra, por haberme apoyado y alentado en cada etapa de mi vida y amor incondicional. A mis familiares que de una u otra forma me han colaborado en esta etapa.

Agradecimientos

vi

Agradezco al Ing. PhD Luis Carlos Vives y al Ing. Magister Albeiro Díaz Varela, por su guía y ayuda en las diferentes etapas de la tesis de grado.

A la Universidad del Magdalena por permitirme la oportunidad de seguir adelante con mi proyecto de vida.

Ing. Mario Pinzón e Ing. Cristian Campo, por su tiempo, experiencia, conocimiento para la elaboración de adoquines.

A la COMERCIALIZADORA SAMARIA S.A.S. por su colaboración con la infraestructura necesaria para realizar los prototipos y ensayos de adoquines.

Ing. Especialista Oscar Ospino Ayala, por su colaboración, apoyo y conocimientos compartidos para lograr este trabajo.

Ing. Kelly Miranda e Ing. Edgardo Diaz, por su tiempo y colaboración en los diferentes ensayos realizados en la Universidad del Magdalena.

Agradecimiento a mis compañeros mis profesores y compañeros de estudios; por sus consejos, observaciones y conceptos.

Tabla de contenido

1. RESUMEN.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo General.....	2
2.2 Objetivos Específicos.....	2
3. ALCANCE.....	2
4. TIPO DE INVESTIGACIÓN	2
5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	3
5.1 Planteamiento del problema.....	3
5.2 Justificación	4
5.3 Antecedentes	5
5.4 Desarrollo de Patentes.....	9
6. MARCO CONCEPTUAL	10
7. MARCO TEÓRICO.....	12
7.1 Teoría de innovación.....	12
7.2 Teoría construcciones sostenibles.....	13
7.3 Módulo de rotura o flexotracción.	13
7.4 Absorción de agua.....	15
7.5 Apariencia de adoquines.	16
7.6 Dimensiones.....	16
8. MARCO NORMATIVO	16
8.1 Políticas exteriores.....	16
8.2 Normativa Nacional	17
9. MARCO SOCIOECONÓMICO.....	20
10. METODOLOGÍA	21
11. CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO COLOMBIANO EN EL SECTOR DE LA FABRICACIÓN Y/O DISTRIBUCIÓN DE ADOQUINES.....	22
12. MATERIALES EMPLEADOS EN LOS PROTOTIPOS.	24
13. DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y EXPERIMENTOS	27
13.1 Elaboración y ensayos de laboratorio de prototipos de adoquines.	27
13.2 Resultados de laboratorio.....	32
13.3 Análisis estadístico de resultados de laboratorio	37
14. COSTOS Y RENDIMIENTOS.	44
15. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
16. CONCLUSIONES	48
17. RECOMENDACIONES.....	49
18. BIBLIOGRAFÍA	51

Tabla 1: Propiedades básicas del Polietileno de alta densidad (PEAD o P.E.H.D.).....	9
Tabla 2. Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su composición).	23
Tabla 3. Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su funcionalidad).....	24
Tabla 4. Adoquines comercializados en el mercado colombiano (Según su forma).	24
Tabla 5. Granulometría de arena blanca empleada en los diferentes prototipos de adoquines	25
Tabla 6. Granulometría de arena amarilla, empleada en los diferentes prototipos de adoquines.	26
Tabla 7: Granulometría de grava natural para adoquines.	26
Tabla 8. Prototipos de adoquines elaborados.....	27
Tabla 9. Dosificación de materiales empleados en los prototipos de adoquines.	28
Tabla 10. Resultados de prototipos de adoquines.....	33
Tabla 11. Continuación de resultados prototipos de adoquines.....	34
Tabla 12 Pruebas de Normalidad para Módulo de rotura o MR (MPa).....	37
Tabla 13. Pruebas de Normalidad para Densidad (Kg/m ³)	37
Tabla 14. Prueba de normalidad para absorción de aguas (%Aa)	37
Tabla 15. Prueba mediana de Mood para MR.	38
Tabla 16. Prueba de la Mediana de Mood para Mh (g) por Adoquines.....	39
Tabla 17. Prueba de la Mediana de Mood para Ms (g) por Adoquines	39
Tabla 18. Prueba de la Mediana de Mood para Densidad (Kg/m ³) por Adoquines	40
Tabla 19. Prueba de la Mediana de Mood para % Aa por Adoquines.....	40
Tabla 20. Costo de producción y unidades producidas por ½ M ³	45

Lista de gráficos

Gráfico 1. Resultados ensayo de Densidad (Kg/m ³) de módulo rotura (MPa) promedio.....	35
Gráfico 2. Resultados ensayo Densidad (Kg/m ³) promedio.	35
Gráfico 3. Resultados de porcentaje de absorción de agua (%Aa) promedio.....	36

Lista de figuras

Ilustración 1: Representación del ensayo de flexotracción. NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento	23
Ilustración 2: Representación de longitudes requeridas en el ensayo de flexotracción.	24
Ilustración 3: Metodología empleada.....	30
Ilustración 4. Colores disponibles en los centros de reciclado del Polietileno de alta Densidad reciclado.	34
Ilustración 5: Elaboración de prototipos de adoquines con PEAD.....	38
Ilustración 6: Mezcladora DOMAT 450 con sus respectivas tolvas para dosificación de material	38
Ilustración 7: Curado de adoquines.....	39
Ilustración 8. Evaluación de apariencia de los diferentes prototipos de adoquines.....	39
Ilustración 9. Ensayo para cálculo de la masa sumergida.....	40
Ilustración 10. Peso seco de adoquín.	40

Ilustración 11. Maquina Universal modelo UH- F1000kNX sometiendo un adoquín a ensayo de flexotracción.....	41
Ilustración 12: Interior de adoquín con adición de Polietileno de alta Densidad, la rotura del elemento se realiza de forma recta.....	41
Ilustración 13. Gráficos de cajas y vigotas para MR.	50
Ilustración 14. Gráfico de cajas y bigotes para densidad (Kg/m ³).....	51
Ilustración 15. Gráfico de caja y bigotes para porcentaje de absorción de agua (%Aa).....	51
Ilustración 18. Histograma de frecuencia de porcentaje de absorción de agua (%Aa).....	53

1. RESUMEN

El presente trabajo de grado tiene como fin el diseño de un prototipo de adoquín empleando en su mezclado Polietileno de Alta Densidad (PEAD), con el objetivo de emplear menos recursos naturales en su fabricación y poderlo transformar en producto sustentable.

Para obtener los objetivos propuestos, inicialmente se realiza un estudio previo en el mercado colombiano en búsqueda de productos iguales o similares que incluyan algún tipo de material reciclado para su uso comercial. Luego, se realizan diferentes prototipos de adoquines con diferentes porcentajes de PEAD que será el reemplazo de la arena en las mezclas empleadas para elaborar los mismos. Posteriormente, se procederá a realizar los ensayos de laboratorios para obtener resultados de las diferentes propiedades que incluyen la resistencia a la flexo-compresión, absorción de agua, apariencia, masa seca y masa húmeda. Las pruebas se realizan teniendo en cuenta la Norma técnica Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos; que es la normativa vigente para los adoquines de concreto en Colombia.

A partir de los resultados obtenidos en laboratorio se determina, cuáles de los prototipos de adoquines cumplen con los requerimientos técnicos, comparado con los adoquines estándar, igualmente se determina la viabilidad económica de los adoquines modificados con Polietileno de Alta Densidad para el sector de la construcción como alternativa al adoquín comercializado con agregados pétreos.

Con esto se plantea dar solución al manejo de los residuos plásticos generados en las actividades antrópicas, dando un segundo uso a este material que termina en basureros, playas, ríos y demás sitios donde su impacto en el ambiente resulta desfavorable.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar un prototipo de adoquín de concreto con adición de polietileno de alta densidad para su uso en pavimentos con bajos volúmenes de tránsito.

2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar en el mercado colombiano las empresas del sector de la fabricación de adoquines con características similares.

Elaborar los prototipos de adoquín de concreto con adición de polietileno de alta densidad en diferentes porcentajes, para su estudio.

Analizar los resultados obtenidos del prototipo de adoquín diseñado evaluando sus características con respecto a la Norma Técnica Colombiana NTC 2017.

3. ALCANCE

El escenario área de estudio del presente proyecto de investigación se encuentra ubicado centro del perímetro urbano de la ciudad de Santa Marta, en departamento del Magdalena, el espacio temporal en el cual se desarrolló el presente proyecto es durante el año 2020, entre los meses enero hasta diciembre de 2020. Como sistema de evaluación de los diferentes prototipos de adoquines ensayados, se tendrá en cuenta la Norma Técnica Colombiana NTC 2017.

El presente trabajo de grado no contempla la elaboración de los ensayos de ahuellamiento de los adoquines. Debido a las dificultades técnicas para elaborar, transportar y ensayar las muestras fuera de la ciudad de Santa Marta, debido a la emergencia nacional del SARS CoV-2.

4. TIPO DE INVESTIGACIÓN

A partir de lo expuesto anteriormente con los objetivos del presente trabajo, el alcance de la investigación es correlacional y experimental, ya que a partir de los ensayos realizados a los diferentes prototipos de adoquines se podrá identificar el porcentaje idóneo de plástico reciclado en una mezcla para lograr un elemento constructivo amigable con el medio ambiente.

5. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

5.1 Planteamiento del problema

En el año 2018, la Organización de Naciones Unidas (ONU) en conmemoración del día mundial del medio ambiente, afirma que solo el 9% de los residuos plásticos han sido sometidos a un proceso de reciclaje, un 12% aproximadamente ha sido incinerado y el 79% restante termina en vertederos, basureros o en el medio ambiente (ONU, 2018). Estas cifras evidencian una cantidad de productos plásticos que no están siendo aprovechados.

Sin embargo, en Latinoamérica se realizan estrategias para la disminución del impacto ambiental, como las prohibiciones del Poli-espuma y las bolsas plásticas de un solo uso; evento en el que diferentes países estimulan políticas para la reducción y la prohibición de plásticos y derivados de los mismos. (ONU, 2017)

En Colombia, la Universidad Nacional realizó estudios para determinar la situación actual del manejo de residuos sólidos. Esta Institución de Educación Superior concluye que la manipulación de residuos plásticos no es favorable, debido a que en gran medida la recolección y aprovechamiento de estos se realiza de manera informal, y no hay acompañamiento del estado y del sector privado para favorecer la utilización de los elementos desechados por la sociedad (Maldonado, 2012). Así mismo, en localidades como la ciudad de Santa Marta, Según la Empresa de Servicios Públicos de Aseo (ESPA, 2014) a través del “Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS” señala que la contaminación por residuos sólidos proviene del posconsumo como es el caso de los plásticos, los cauchos, entre otros materiales que no se degradan a corto o mediano plazo, es decir entre periodos entre 10 y 500 años.

El sector de la construcción tiene la particularidad de generar contaminación de residuos sólidos en sus diferentes etapas productivas que incluyen principalmente la construcción, mantenimiento y demolición. Es por ello, que se hace cada vez más necesario implementar metodologías para el aprovechamiento de los residuos. Como lo expresa el investigador Franco et al: “La contaminación al medio ambiente se produce no solo por la cantidad de desechos que se genera durante la construcción, sino también cuando es necesario demoler las edificaciones” (Franco, et al, 2018). A partir de la contaminación derivada de los plásticos, se ha generado una tendencia de producir productos, materiales y tecnologías ambientalmente sostenibles; se han realizado investigaciones sobre el uso de materiales reciclados para la elaboración de hormigones y su aplicación en la construcción en Europa”. De acuerdo con la Máster en arquitectura Antonella Costa del Pozo: “el plástico es un material que usamos en abundancia, y que luego de ser reciclado pierde muchas de sus propiedades y la calidad del material disminuye. El plástico es un material resistente a la humedad y al deterioro, es ligero y durable, es un material que perdura. Es una buena alternativa que podría usarse como agregado en hormigones ligeros” (Del Pozo, 2012).

En este escenario, los diferentes países de América Latina como Argentina y Colombia desarrollan soluciones similares para enfrentar la problemática de la contaminación generada por los residuos y buscar alternativas sostenibles de construcción. Como resultado se resalta la elaboración de los ladrillos con plástico reciclado, que, a pesar de no tener resistencia para ser utilizado como elemento estructural, pueden ser usados como alternativa a los bloques de cemento y arena usados para cerramiento o división de casas. En el caso de las placas la resistencia es similar al de las placas fabricadas con ladrillos comunes (Gaggino, 2007). En Colombia, la universidad de Cartagena desarrolló un proyecto para la elaboración de hormigones con polietileno de media densidad, sin embargo, los resultados no fueron concluyentes, recomendando mejorar la elaboración de los prototipos de cilindros con uso de herramientas adecuadas como un mezclador mecánico de concreto para obtener resultados óptimos (Meza y Lengua, 2016).

Se evidencia la importancia de buscar alternativas para el aprovechamiento de los residuos plásticos, y a su vez la necesidad de desarrollar nuevos materiales de construcción sostenible. Por tanto, se realiza la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible desarrollar prototipos de adoquines en concreto con adición de polietileno de alta densidad para su uso en pavimentos con bajos volúmenes de tránsito, cumpliendo con la normativa nacional y disminuyendo el uso de recursos no renovables?

5.2 Justificación

En Santa Marta, los residuos producidos por las construcciones generan un impacto ambiental y paisajístico desfavorable, por lo que es pertinente una evaluación de la gestión integral de éstos, para verificar si hay una adecuada recolección y disposición final, considerando diferentes escenarios que nos ayuden a identificar alternativas de manejo de los potenciales impactos del sistema, bajo una viabilidad técnica y económica (Díaz Valera, 2017).

En grandes ciudades como Bogotá, se desarrollan Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS (2015) en los cuales se afirma que: “Las proyecciones a partir del 2016 incluyen el incremento de este material hasta alcanzar en el año 2037s 1.633 Ton/día, teniendo en cuenta el aprovechamiento de residuos orgánicos (que inicia en 30 ton/día hasta 1000 Ton/día) y el RCD [Residuos de Construcción y Demolición] (55 Ton/día)” (p. 12). Lo que se evidencia, es que, si se desarrollan estrategias contempladas en este PGIRS, la ciudad podrá aprovechar 2.718 ton/día. En ciudades con menor población como Santa Marta se estima una producción 2035,93 ton/mes (PGIRS, 2014); lo cual es una cantidad considerable de desechos desaprovechados que pueden ser transformados en nuevos materiales y productos para satisfacer necesidades de las sociedades.

Además, la política nacional en los últimos años ha ejecutado y viene fortaleciendo el desarrollo de las construcciones sostenibles con entidades como el Concejo Colombiano de Construcciones sostenibles (CCCS), al punto de generar incentivos para el desarrollo de

estos en los diferentes municipios que acojan las nuevas alternativas ambientales, sociales y económicas, cuyas medidas tienen las siguientes características: I) reconocimiento del Sello Ambiental Colombiano con el uso de nuevos materiales con elementos reciclados, II) generación de valor adicional en pro de disminuir el uso de agregados en grueso de adoquines; III) certificado emitido por el LEED, al sumar puntos por el uso de materiales de construcción con porcentaje de elementos reciclados. (Conpes 3919, 2018.)

Adicionalmente durante los últimos años, las investigaciones se vienen adelantando en el desarrollo de nuevos materiales de construcción como bloques, adoquines y elementos no estructurales con materiales reciclados como los residuos de construcción, fibras naturales y sintéticas, cauchos de neumáticos y plásticos reciclados como el Polietileno Tereftalato (PET) que se ha empleado para la elaboración de bloques de mampostería no estructural en argentina (Gaggino, 2007). En el caso de Colombia se ha realizado aprovechamiento de residuos sólidos como el caucho de neumático reciclado para la elaboración de “arena plástica” que puede ser usado en parques y otros escenarios (Gómez y Montoya, 2011). Casos como los mencionados anteriormente abren las posibilidades a nuevos productos elaborados parcial o totalmente con materiales reciclados. Por ende, el nuevo reto que tiene la sociedad es diseñar productos con base en materiales reciclados, que puedan disminuir el uso de materiales no renovables; así como plantear alternativas para el aprovechamiento de elementos desechados.

Con esto, la presente propuesta de proyecto de profundización pretende lograr un desarrollo tecnológico con un nivel TRL (Technology Readiness Level) tres (3) o superior, debido a que en esta etapa las aplicaciones son especulativas y las pruebas a realizar se desarrollan en ambientes controlados (laboratorios), además de realizar un primer sondeo de los productos ofertados actualmente por el mercado colombiano en el sector de la construcción (Alcantara, 2019).

Finalmente, bajo estas condiciones con una cifra creciente de plásticos desechados en las ciudades, políticas mundiales y nacionales en la búsqueda de la disminución de uso de los recursos naturales y prohibición de plásticos de un solo uso, la necesidad de producción de nuevos materiales que sean de producción sostenible y la posibilidad de los proyectos de participar para la obtención de certificados de sostenibilidad a nivel mundial, es pertinente el desarrollo de los adoquines con materiales reciclados.

5.3 Antecedentes

A partir de una revisión bibliográfica que compromete los últimos trabajos de investigación relevantes, se inicia con el estudio de las mezclas de concreto con adición de diferentes materiales. Esto ofrece diferentes características y elementos teóricos para el alcance del objeto de la presente investigación.

En cuanto al diseño con nuevos materiales en el libro “Materiales para la Ingeniería 1. Introducción a las propiedades, aplicaciones y el diseño. Volumen 1” se destaca que, si bien los materiales junto a sus propiedades cambian poco, los nuevos materiales o los combinados pueden ofrecer características únicas y el diseñador debe ser consciente de sus ventajas, desventajas o limitaciones que estos presenten (Ashby, 2008).

La investigadora Gaggino (2007) realiza un estudio sobre los diferentes tipos plásticos, analizando la forma como pueden ser empleados en la fabricación de ladrillos y placas, con esto se resalta la elaboración de los ladrillos con plástico reciclado, que a pesar de no tener resistencia para ser utilizado como elemento estructural pueden ser usados como alternativa a los bloques de cemento y arena, usados para cerramiento o división de casas (Gaggino 2007). En el caso de las placas la resistencia es similar al de las placas fabricadas con ladrillos comunes.

En el año 2011, la investigación desarrollada por Gómez indican que al realizar mezclas de mortero de cemento y Polietileno de alta densidad (PEAD) se adiciona 0,2%, 0,5% y 0,8% del peso cemento, presentan una menor carbonatación y una menor penetración de los cloruros en comparación de los morteros de cemento convencionales, en cambio concentraciones de 0,8% no parece presentar cualidades atractivas para ser empleada como reemplazo del mortero convencional, adicionalmente todos los porcentajes anteriormente mencionados arrojan una menor resistencia en comparación al mortero convencional, sin embargo, todavía no se ha realizado ensayos de las cualidades de estos morteros en ambientes marinos. (Gómez, y otros, 2011). Como conclusión se tiene que: “De acuerdo con los resultados obtenidos, es que se estima que el porcentaje óptimo de adición de PEAD correspondería al 0,5%, no descartándose el 0,2%, ya que los valores obtenidos de carbonatación y penetración de cloruros son bastante cercanos entre sí. Por otro lado, se descarta totalmente el 0,8% por no presentar ningún beneficio.” (Gómez, et al, 2011).

Ese mismo año, El investigador Hermes Andrés Torres Ospina en su trabajo de investigación denominada “Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho” realiza ensayos de propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas de concreto con adición de caucho de neumático variando el porcentaje de reemplazo del agregado fino con este material en las siguientes proporciones: 10%, 20% y 30% los cuales indican que no se logra alcanzar valores aceptables para el uso de este nuevo material en el entorno de la construcción. (Torres, 2014,). Dicho en palabras del propio autor se concluye lo siguiente: “para evitar disminuciones grandes en las propiedades mecánicas del concreto, el uso de agregados de grano de caucho debe limitarse a niveles porcentuales menores del 10 %, para minimizar estos impactos negativos.” También recomiendan realizar futuros ensayos variando la relación agua-cemento (Torres, 2014).

Igualmente, en el año 2011 las investigadoras Laura Cardona Gómez y Luz María Sánchez Montoya (Gómez y Montoya, 2011), realizan un desarrollo de alternativas para el empleo de llantas usadas en la fabricación de pisos decorativos realizando la trituración y

elaboración de la denominada “arena plástica” usadas en los pisos. Como lo enuncian las autoras “Los pisos decorativos elaborados con llantas recicladas, además de convertirse en productos amigables con el medio ambiente y poseen características como: antideslizantes, aptos para exteriores, resistentes al impacto, resistentes al tránsito, durables, higiénicos, elásticos, atenúan el ruido y son fáciles de limpiar” (Gómez y Montoya, 2011).

Con la finalidad de desarrollar concretos con menor peso, nuevas características y que sean ambientalmente sostenibles al disminuir el uso de materiales no renovables como los agregados finos y gruesos, la investigadora Del Pozo en el año 2012 elabora mezclas de concreto con agregado plástico como árido en el cual emplea el polivinilo acrílico (PVC). Los ensayos se realizaron en muestras que contenían agregados de plástico reciclado de PVC de 0%, 10%, 25%, 50% y 70%, y 2 tipos más de probetas con agregado de plástico reciclado con contenido de carbono, con dosificaciones de 25% y 70% (Del Pozo, 2012). De esta manera se puede observar lo que ocurre al tener cantidades mayoritarias de plástico. Como resultados de la investigación se concluye lo siguiente: “El introducir agregados de plástico reciclado a mezclas de mortero resulta ventajoso en cuanto a sus aportes térmicos, no contribuye con las resistencias, por el contrario, estas decrecen, pero si se trata de elementos de construcción que soporten carga ligera, con estos morteros se pueden conseguir buenos resultados, que además aportan un valor agregado, que es el aislamiento y la ligereza del material.” y adicional “El uso de este plástico de propiedades pobres no afectaría en los morteros, ya que está en la mezcla como un material pasivo y no aporta nada en cuanto a resistencias – pensando que además estos materiales se plantean como materiales no estructurales” (Del Pozo, 2012).

A nivel internacional, en el año 2014 la revista “Construction and Building Materials” publica el artículo denominado “Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars” en el cual se realiza el análisis y la experimentación con materiales reciclados para la mejora de algunas cualidades de los pavimentos flexibles con el polietileno de baja densidad, alta densidad y restos de neumáticos en función de las temperaturas de trabajo de los pavimentos flexibles; arrojando como resultado que a mayor temperatura estos componentes aumentan la resistencia contra el rozamiento y el agrietamiento, siendo una solución alternativa y reduciendo los impactos ambientales al utilizar materiales reciclados (da Silva, y otros, 2014).

En el año 2015 se publica en la revista Gaceta de la UNAM (México), se realiza la elaboración de diseños de mezclas de concretos con adición de plástico reciclado, cuya materia prima de estudio es el polietileno de alta densidad (PEAD), en el cual se exalta la importancia del método de la trituración mecánica del material y la mejor adherencia con respecto a elementos como el Polietileno Tereftalato (PET), llegando a ser considerado como un material apto que cumple parámetros de diseño estructural y adquiriendo nuevas propiedades como una mayor flexibilidad del material y una mayor difusividad térmica. Se concluye al finalizar la investigación lo siguiente: “Al ser más dúctil, el concreto al que se le ha incorporado el plástico reciclado es capaz de resistir las cargas y deformaciones, sin presentar mayores daños como fracturas o agrietamientos” (Revista Gaceta, 2015).

En el mismo año, la revista Ideas en ciencia, publica la investigación denominada “Diseño y elaboración de adoquines de Pet reciclado” donde se realiza el diseño de adoquines elaborados completamente con plástico PET reciclado, prototipo diseñado con el programa Solidwork, y fue ensayado en resistencia a la compresión arrojando como resultado 49,987.5 Newton y compresión máxima de 5.379 mm y una resistencia a la compresión de 300 Kg/cm², además en temperaturas entre 4°C y 60°C no varían significativamente sus propiedades físicas lo cual lo hace ideal para ser empleado en casas, patios, sitios públicos; entre otros (Santiago Miguel, y otros, 2015).

A finales del 2016, en la Universidad Javeriana de Cali, realizó el estudio de un diseño de pavimento articulado compuesto de adoquines con concretos agregados reciclado (ARC) y las cenizas provenientes del bagazo de azúcar (CBC), presentado un mayor tiempo de curado con respecto al concreto convencional debido a las cenizas puzolánicas. Cumpliendo con lo exigido en la Norma Técnica Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento, la prueba da como resultados que el módulo de rotura es mayor a 9,8 MPa. Como conclusión de la investigación el autor manifiesta lo siguiente: “Reemplazar CBC por cemento Portland resulta más económico para las mezclas de concreto ya que influye, directamente, bajando los costos en materiales, sin afectar la Mano de obra, equipo y transporte” (Caicedo Quinayás, 2016).

En el mismo periodo, el investigador Silvestre Gutiérrez presenta el proyecto de investigación en el que se añade Nylon en materiales de construcción convencionales como el concreto y el asfalto, como conclusión del estudio se determina que el material puede ser usado como reforzamiento de concreto, algo semejante a lo que se está haciendo con las fibras de carbono (Silvestre Gutiérrez, 2016).

Nuevamente en el año 2017, el investigador Silvestre Gutiérrez realiza el análisis de cilindros de concreto con agregados conformados por Polietileno de Densidad Media en los cuales la falla predominante fue la falla tipo III (fisuras verticales), mencionando igualmente que al aumentar la cantidad de Polietileno de Densidad Media en la mezcla de concreto el módulo de deformación unitaria elástica asciende en menor medida en comparación que los esfuerzos, con lo cual el alcance del módulo de Young decrece. (Silvestre Gutiérrez, 2017). Se concluye: “La mezcla de concreto no cumple los parámetros establecidos por medio de la investigación, debido a la disminución de la resistencia al aumentar la adición de porcentaje de polietileno de densidad media.” (Silvestre Gutiérrez, 2017).

Adicionalmente, algunas propiedades físicas y químicas del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) como elemento a ser usado en el desarrollo del proyecto, son:

- Polietileno de alta densidad (PEAD). Es un polímero de cadena lineal no ramificada. Su resistencia química y térmica y su dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad. Presentan alta capacidad elástica y flexibilidad. Son

muy utilizados para la fabricación de tubos, planchas, materiales aislantes, cables eléctricos recubrimiento para protección contra la corrosión, botellas para leche, frascos para productos cosméticos, envases para productos químicos, cubetas, botellas de refrescos, jugos, platos, juguetes y envases promocionales (Rondón, y otros, 2007).

- Alta durabilidad bajo condiciones ambientales, como la radiación solar. En la ingeniería civil una de las aplicaciones de este material es en la producción de geomembranas, debido a su composición es capaz de disipar el calor logrando que resista el proceso de degradación (envejecimiento) del material como producto de la radiación ultravioleta (Valencia, 2010). Propiedad importante en el proceso de fabricación de los adoquines, puesto que la condición de trabajo de estos elementos se realiza en diferentes condiciones climáticas.

Por otro lado, existen investigaciones anteriores donde se describen las diferentes propiedades físicas y químicas que pueden resultar atractivas al emplear dicho material como elemento para adición en los adoquines, entre las propiedades más destacables se tienen mostradas en la tabla 1:

Tabla 1: Propiedades básicas del Polietileno de alta densidad (PEAD o P.E.H.D.).

Propiedades básicas del Polietileno de alta densidad (PEAD)	
Propiedad	PEAD
Peso molecular (g/cm ³)	200,000-400,000
Densidad (gr/cm ³)	0,94 - 0,97
Resistencia a la tracción (MPa)	21,00
Módulo de Young (MPa)	1000,00
Temperatura de fusión	130 - 140

Fuente: Benavides P. Fecha de consulta 18 de noviembre de 2019.

5.4 Desarrollo de Patentes

En la búsqueda de patentes existentes de adoquines con mezcla de plásticos reciclados o elementos con propiedades similares en diferentes entidades encargadas de la publicación de las patentes como la Cámara de comercio de Colombia, Patentescopus, World Intellectual Property Organization (WIPO); Espacenet, Google Patents, Latipat y La Oficina de Patentes y Marcas de Estados Unidos (USPTO) se evidencia los siguientes resultados de patentes relacionadas con el objeto de estudio hasta la actualidad:

COBBLE STONE UTILIZING WASTE PLASTIC, ITS PRODUCTION OR UTILIZATION THEREOF: Publicado en el año 1999 se patenta un sistema de adoquinado, en el cual es empleada piedra natural y material plástico fundido en forma de

material granular. El autor del elemento pretende realizar un adoquín de manera amigable con el ambiente y económica para vías de uso peatonal o vehicular (Ishihara Shigeo, 2017).

Para el año 2003 es publicado “Cobble stones include reflective particles of glass, metal, plastic or minerals” que es una capa superficial en el adoquín que incluye partículas de diferentes materiales reflectantes como vidrio, metal, plástico o minerales, el cual puede ser tener diferentes matices de colores del adoquín al ser expuesto a la luz natural. El autor define los materiales y procedimientos para poder obtener el producto con las características específicas. (Klausmann, Klaus, 2003).

En el año 2007 es publicada la patente denominada “Artificial cobble and manufacturing method thereof” el cual consiste en la fabricación de adoquines con nuevos gránulos de plástico o con material reciclado, el cual es fundido e inyectado para formar los elementos, definido por el autor como adecuado para diferentes requisitos de pisos o adoquines. En la patente mencionada el autor presenta el método de fabricación de los elementos, trabaja con diferentes tipos de plásticos ya sean nuevos o reciclados (Yu Shanfeng, 2007).

En el 2014 es publicada la patente denominada “BUILDING UNIT WITH COBBLE TOP” el cual consiste en múltiples adoquines o regiones elevadas separadas por juntas falsas que incluye acoplamiento con una conexión en forma de "S" (KEYSTONE RETAINING WALL SYSTEMS LLC, 2014). El diseño ofrece una estética en el pavimento articulado que asemeja a los caminos antiguos.

En el año 2017 fue publicada una patente denominada “PROCESS FOR CONSTRUCTION OF ARTIFICIAL ROADS, WALK WAYS, FOOTPATHS, ETC. FROM WASTE PLASTIC, PLASTIC TYPE RESINS AND RELATED POLYMERS” el cual define el proceso para la construcción de caminos con residuos plásticos de todo tipo (sin clasificarlos o separarlos), usado como parte integral del adoquín, rellenando la parte inferior con material de relleno (Kasture, 2017).

6. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se relacionan los conceptos de los diferentes términos utilizados para una mejor comprensión del documento:

Geotecnia: Consiste en recurrir a los preceptos de la ingeniería para el desarrollo de obras públicas de acuerdo con las cualidades de los materiales que se encuentran en la corteza del planeta (agregados, áridos, limos y arcillas). Puede considerarse como una rama de la geología o de la ingeniería civil (Gardey, 2018).

Concreto: Se define como la mezcla de un material aglutinante (Cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión. (Sanchez, 2001)

Adoquines: Son elementos prefabricados macizos, elaborados con una mezcla de arena, piedra, agua y cemento a través de un proceso industrial de vibro-compresión en moldes. Las formas y colores de estos productos pueden ser muy diferentes; se utilizan como capa de rodadura en todo tipo de pavimentos. (Pacasmayo, 2010).

Vía: Calzada construida para la circulación rodada. (RAE, 2018).

Pavimento Articulado: Pavimento conformado por elementos prefabricados de pequeñas dimensiones que individualmente son muy rígidas y se asientan sobre una capa de arena. (Ricardo Requejo Carrillo, 2017).

Residuo sólido o desecho: Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de aprovechamiento o transformación en un nuevo bien, con valor económico o de disposición final. (Decreto 1713 de 2002; 2002).

Reciclaje: Reciclaje o reciclamiento es la acción y efecto de reciclar (aplicar un proceso sobre un material para que pueda volver a utilizarse). El reciclaje implica dar una nueva vida al material en cuestión, lo que ayuda a reducir el consumo de recursos y la degradación del planeta. (Pérez Porto, 2010).

Plástico: Aquellos materiales que, compuestos por resinas, proteínas y otras sustancias, son fáciles de moldear y pueden modificar su forma de manera permanente a partir de una cierta compresión y temperatura. Un elemento plástico, por lo tanto, tiene características diferentes a un objeto elástico. (Gardey, 2013).

Polietileno De Alta Densidad (PEAD): resina termoplástica, blanca transparente, su fórmula es $(- \text{pn-CH}_2-)_n$ la cual es usada principalmente en la fabricación de envases plásticos, juguetes, artículos para el hogar, tuberías para distribución de agua potable, entre otros. Es uno de los principales termoplásticos utilizados en los últimos años, debido principalmente a su fácil disponibilidad como material de reciclaje (Cruz Estrada y otros, 2006).

Polietileno Tereftalato (PET): Una resina plástica y una forma de poliéster. Es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo. El polietileno tereftalato, es un polímero formado por la combinación de dos monómeros, el glicol etileno modificado y el ácido teréftálico. (Fernández Limón, 2011).

Parafinas Cloradas de Cadena Corta (PCCCs): Las parafinas cloradas son sustancias químicas organocloradas que se producen, simplemente, por la reacción de gas de cloro con parafinas (hidrocarburos). Las PCCCs, son aquellas que tienen entre 10 y 13 átomos de carbono (C10-C13). (Greenpeace, 2003).

Polibromobifenilos (PBBs): Son sustancias químicas manufacturadas. Los PBBs se agregan a plásticos usados en productos tales como monitores de computadoras, televisores, telas, espumas de plástico, etc. para hacer más difícil que se incendien. Los PBBs pueden escapar de estos plásticos y entrar al medio ambiente. Los PBBs son generalmente sólidos incoloros a blancuzcos. Los PBBs son mezclas de polibromobifenilos individuales. (ATSDR, 2016).

Agregado fino: Es el material que pasa en un 95% de sus partículas por el tamiz No.4, de 4.76mm (3/16”) de abertura entre hilos (Matthew, 1999).

Agregado grueso: Es el material que queda retenido en el tamiz de 150mm (6”), cuyas partículas son en un 95% mayores de 4.76mm (Matthew, 1999).

Dosificación de mezcla de concreto: Es determinar la combinación más práctica y económica de los agregados disponibles, cemento, agua y en ciertos casos aditivos, con el fin de producir una mezcla con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las características de resistencia y durabilidad necesarias para el tipo de construcción en que habrá de utilizarse. (Rivera L, 2019).

Flexotracción o módulo de rotura: Se define como la tensión máxima que un espécimen de prueba rectangular puede soportar en una prueba de flexión de 3 puntos hasta que se rompe, expresado en MPa. (NTC, 2017).

TECHNOLOGY READINESS LEVELS (TRLs): es una forma aceptada de medir el grado de madurez de una tecnología. Por lo tanto, si consideramos una tecnología concreta y tenemos información del TRL o nivel en el que se encuentra podremos hacernos una idea de su nivel de madurez (Alcantara, 2019).

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Teoría de innovación

Según Cabrero y Arellano (1992) tenemos:

La introducción de un nuevo, o significativamente mejorado, producto (bien o servicio), de un proceso, de un nuevo método de comercialización o de un nuevo método organizativo, en las prácticas internas de la empresa, la organización del lugar de trabajo o las relaciones exteriores. (Manual de Oslo, 2005)

Por otra parte, citando a Schumpeter indica que:

La innovación tecnológica es un proceso en el que se ponen en práctica nuevas combinaciones entre materiales y fuerzas. De estas nuevas combinaciones pueden surgir nuevos bienes o el mejoramiento de su calidad; nuevos métodos de producción; nuevos mercados; nuevas fuentes de materias primas o una nueva organización en la industria. (Schumpeter, 1997)

7.2 Teoría construcciones sostenibles

Según Bedoya la construcción sostenible se define como:

La construcción sostenible es aquella que busca la implementación de flujos no lineales en cuanto a energía y materiales, como también una política de valoración ambiental de los recursos por encima de los costos económicos. Ello implica construir reflexiva e integralmente, desde la concepción del diseño, hasta el término de la vida útil de la edificación. (Bedoya, 2011).

También según Casado tenemos que:

La Construcción Sostenible, que debería ser la construcción del futuro, se puede definir como aquella que, con especial respeto y compromiso con el Medio Ambiente, implica el uso sostenible de la energía. Cabe destacar la importancia del estudio de la aplicación de las energías renovables en la construcción de los edificios, así como una especial atención al impacto ambiental que ocasiona la aplicación de determinados materiales de construcción y la minimización del consumo de energía que implica la utilización de los edificios. (Casado, 1996).

7.3 Módulo de rotura o flexotracción.

Según la Norma Técnico Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento, El ensayo de Flexotracción de los adoquines debe ser calculado empleando la siguiente fórmula:

$$Mr = \frac{[3 C_{max} \times (li - 20)]}{[(ar + ai) \text{er}^2]} \quad (1)$$

Donde:

Mr = Módulo de rotura, en MPa

C_{max} = Carga Máxima de Rotura, en N

li = Longitud del rectángulo inscrito en mm

ar = Ancho real del espécimen, mm
 ai = Ancho del rectángulo inscrito en mm
 er = Espesor real del espécimen en mm

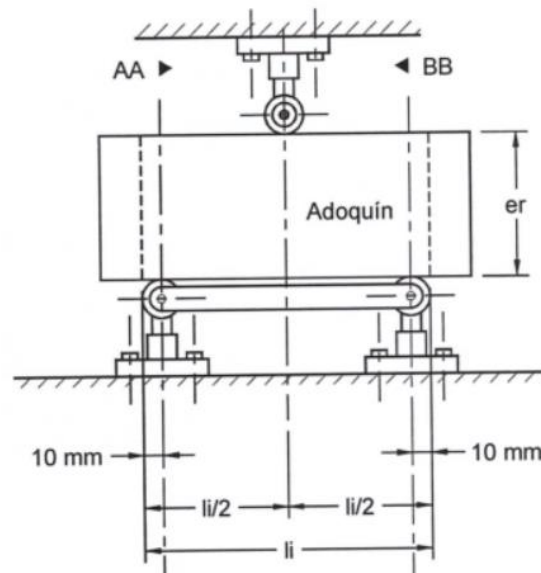


Ilustración 1: Representación del ensayo de flexotracción. NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento

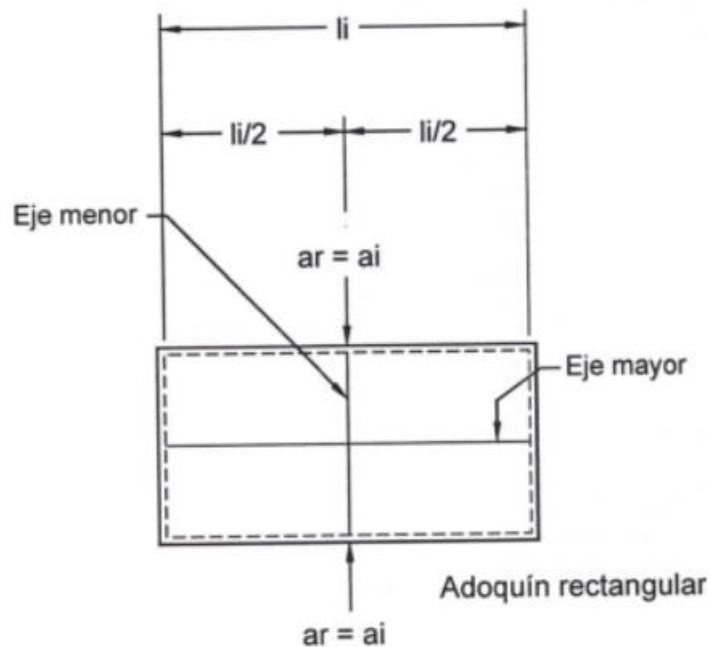


Ilustración 2: Representación de longitudes requeridas en el ensayo de flexotracción.

7.4 Absorción de agua.

La absorción de agua es otro de los aspectos que evalúa la Norma Técnico Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento, contempla que los adoquines seleccionados para el ensayo no deben superar el 7% del valor de absorción de agua total al momento de realizar el despacho al comprador. Este valor puede ser calculado de las siguientes formas:

$$\text{absorción } (Aa), Kg/m^3 = \frac{Mh - Ms}{Mh - Ma} * 1000 \quad (2)$$

$$\text{absorción } (\%Aa), \% = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad (3)$$

Donde:

Mh = Masa saturada (húmeda) del espécimen, en g.

Ms = Masa seca del espécimen, en g

Ma = Masa inmersa en agua y suspendida del espécimen, en g.

7.5 Apariencia de adoquines.

Este ensayo consiste en colocar 5 especímenes de la muestra ordenados en una superficie uniforme con entrada de iluminación natural. Los adoquines evaluados del lote escogido no deben tener fisuras, descaramiento, signos de resequeidad u otro signo no favorable a estudiar, de acuerdo con lo indicado en la Norma Técnico Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento.

7.6 Dimensiones.

Según la Norma Técnico Colombiana NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimento, establece que la longitud nominal no debe ser menor de 50mm ni mayor a 250mm; el ancho nominal no debe ser menor de 50mm y el espesor no debe ser inferior a 60mm y se prefieren dimensiones que sean múltiplos de 20mm.

Por lo general el espesor de los adoquines para tráfico peatonal y vehicular hasta de 50.000 ejes estándar (ejes sencillos de 8,2 Ton) es de 60mm, para demás aplicaciones espesores de 80mm y en casos especiales que lo requiera el diseño, espesores de 100mm. La diferencia entre la longitud real y la longitud estándar del adoquín no debe diferir en más de 1,5mm, en cambio el espesor no debe diferir con el espesor estándar en más de 2mm.

8. MARCO NORMATIVO

8.1 Políticas exteriores.

A raíz de la situación ocasionada por los residuos sólidos que se han generado en el mundo debido a las actividades antrópicas y la necesidad de crear e implementar políticas para la disminución de la contaminación por los desechos sólidos; en diferentes países y entidades se desarrollan normas, guías y decretos que promueven la disminución del uso del plástico e incentiva la construcción sostenible como medida para disminuir el impacto generado por la contaminación de estos. A continuación, se relaciona las más relevantes:

El desarrollo de la estrategia Honolulu iniciado en el 2011 el apoyo del programa ambiental de las naciones unidas (UNEP, por sus siglas en inglés) y la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) con el fin de guiar y evaluar las estrategias para todo el mundo para reducir los impactos ecológicos, económicos y sobre la salud humana por los desechos arrojados al mar (UNEP, 2011).

En el año 2012 se radica en Estados Unidos la ley denominada “Microbead-Free Waters Act of 2015” por el cual se obliga a las empresas a eliminar de sus productos las microperlas, que son partículas de plástico sólido de menos de 1 mm de diámetro utilizado comúnmente en los productos de belleza (Pallone, 2015).

En febrero de 2017 la Organización de Naciones Unidas (ONU), lanza la campaña “Clean Seas”, con el objetivo de involucrar a los gobiernos, el público, la sociedad civil y el sector privado en la lucha contra los desechos plásticos en el mar. El objetivo de la campaña es abordar, dentro de los próximos cinco años, la causa raíz de los desechos marinos al apuntar a la producción y el consumo de plástico no recuperable y de un solo uso (ONU, 2017). Así mismo en el 2018, se realiza en Panamá el informe sobre el estado de las prohibiciones del Poli-espuma y las bolsas plásticas de un solo uso, en el cual Colombia hace parte de los acuerdos; en respuesta se reglamenta la resolución 0668 de 2016 que “rige el uso racional de las bolsas de plástico y adopta otras resoluciones” (Resolución 0668, 2016), y en el 2017 introduce decreto 2198 de 2017 “Por el cual se modifica el epígrafe de la Parte 5 del Libro 1 y se adiciona el Título 6 a la Parte 5 del Libro 1 del Decreto 1625 de 2016 Único Reglamentario en Materia Tributaria, para reglamentar el parágrafo 1 del artículo 512-15 y los numerales 3 y 4 del artículo 512-16 del Estatuto Tributario” (Decreto 2198, 2017). el cual establece impuesto sobre las bolsas de plástico de un solo uso en el cual se cobra 20 pesos colombianos como medida disuasiva en el uso de este tipo de elemento.

Agenda 21: “Definir lineamientos de política sobre construcción y urbanismo sostenible, que incluyan el acompañamiento a las entidades territoriales para el desarrollo de incentivos; la definición de estándares de diseño y construcción para el uso eficiente de los recursos; el desarrollo de un sello ambiental colombiano para edificaciones; y la implementación de hipotecas verdes, entre otros” (Naciones Unidad, 2016).

8.2 Normativa Nacional

A nivel nacional, el gobierno ha realizado esfuerzos en la reglamentación de decretos para el incentivo de la disminución del uso del plástico y la construcción sostenible, entre los que podemos citar:

- Ley 99 de 1993: (...) “Se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público 31 encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones.” (Ley 0099, 1993).
- Resolución 541 de 1994: (...) “Por medio de la cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación” (Resolución 0541, 1994).
- El Decreto 1713 de 2002 menciona lo siguiente:

Recolección de escombros. Es responsabilidad de los productores de escombros su recolección, transporte y disposición en las escombreras autorizadas. El Municipio o Distrito y las personas prestadoras del servicio de aseo son responsables de coordinar estas actividades en el marco de los programas

establecidos para el desarrollo del respectivo Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS (Decreto 1713, 2002).

- Resolución 1555 de 2005: “Por medio de la cual se reglamenta el uso del Sello Ambiental Colombiano”. (Resolución 1555, 2005). Publicado el 20 de octubre de 2005 en el cual establece el Sello Ambiental Colombiano como instrumento para promocionar productos que pueden reducir los impactos ambientales en comparación de productos de la misma categoría.
- El Decreto 1310 de 2012, art.2, párrafo: Tratamiento de Renovación Urbana Modalidad de Redesarrollo, señala lo siguiente:

La aplicación de este tratamiento implica la sustitución y/o reconstrucción total o parcial de las edificaciones existentes, recuperación y el manejo ambiental sostenible del sistema de espacio público, redes de infraestructura y manejo ambiental, en consonancia con las necesidades derivadas de las nuevas condiciones de densidad habitacional y usos del suelo y las características ambientales de la zona. (Decreto 1310, 2012).

- PLAN NACIONAL DE DESARROLLO 2010 – 2014 Prosperidad para todos: (...) Desarrollar instrumentos para el diseño y construcción de viviendas y edificaciones ambientalmente sostenibles; incluyendo la creación de una norma técnica de construcción sostenible para acceder al sello ambiental colombiano. (Plan Nacional De Desarrollo 2010 - 2014, 2014).
- El Decreto 2981 de 2013, art. 90 alude lo siguiente:

Aprovechamiento en el marco de los PGIRS. Los municipios y distritos al actualizar el respectivo plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS están en la obligación de diseñar, implementar y mantener actualizados, programas y proyectos sostenibles de aprovechamiento de residuos sólidos. En desarrollo de esta actividad deberán dar prioridad a los estudios de factibilidad sobre aprovechamiento de residuos. (Decreto 2981, 2013).

- También el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 Todos por un nuevo país menciona:

Construcción sostenible: Se implementará la política de construcción sostenible a través de la cual se busca disminuir los impactos negativos sobre el ambiente, generados por los procesos inadecuados de planeación, diseño, construcción y uso de las edificaciones. Lo anterior a partir de la formulación y adopción de la guía para construcción sostenible en el uso eficiente de agua y energía en edificaciones, la definición de lineamientos para la aplicación de tecnologías ambientalmente sostenibles en la construcción y la implementación de mecanismos de financiación verde, lo que permitirá generar cambios en los aspectos culturales, institucionales, técnicos y económicos para incentivar el

desarrollo de construcciones más eficientes. Así mismo, se realizará la consolidación de un sistema de información integral para el seguimiento de la política con metodologías de medición del uso eficiente de recursos naturales (Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, 2014).

- Decreto 1285 de 2015, art. 1: (...) “Incentivos. El Gobierno Nacional por conducto del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, promoverá que los municipios y distritos, establezcan incentivos para la implementación de las medidas de construcción sostenible” (Decreto 1285, 2015).
- Decreto No. 1077 de 2015, Título 7, Capítulo 1; Artículo 2.2.7.1.1.: “(...) El objeto del presente decreto es establecer lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, encaminados al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social” (Decreto 1077, 2015).
- Resolución 0668 de 2016: “Por el cual se reglamenta el uso racional de bolsas plásticas y se adoptan otras disposiciones” (Resolución 0668, 2016). Con el cual los almacenes de cadena y distribuidores deberán contar con bolsas plásticas tamaño superior a 30 cm por 30 cm con calibre superior a 0.9 milésimas de pulgada que contengan un mensaje ambiental sobre el uso racional.
- Decreto 1203 de 2017, art. 11: (...) “Dar cumplimiento a las disposiciones sobre construcción sostenible que adopte el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio o los municipios o distritos en ejercicio de sus competencias” (Decreto 1203, 2017).
- Documento CONPES 3919 Política Nacional De Edificaciones Sostenibles: (...) “En su plan de acción contempla contar a 2020 con nuevos incentivos económicos y con los ajustes normativos necesarios que permitan definir un instrumento de financiación para incentivar la construcción y adquisición de vivienda en edificaciones sostenibles” (Calderón et al., 2018). Esto radica un paso importante en el desarrollo de proyectos sostenibles, generando nuevas oportunidades de desarrollo al sector de la construcción.

Específicamente en el desarrollo de los adoquines con materiales alternativos, existe normas para su implementación, La Norma Técnica Colombiana 6093 la cual establece los requisitos que debe cumplir los materiales como ladrillos, bloques y adoquines y los requisitos para la obtención del Sello Ambiental Colombiano (SAC).

9. MARCO SOCIOECONÓMICO

En Colombia, en los últimos años se desarrollan proyectos e iniciativas de entidades públicas y privadas, como la campaña denominada “Dale Vida al Plástico” impulsada por la organización sin ánimo de lucro ACOPLASTICO, en la que busca compensar a través de videos educativos y campañas de sensibilización a las empresas y la sociedad en general en hacer mejor uso de los desechos plásticos y su disposición final (ACOPLASTICO, 2018).

Actualmente, en Colombia ya existen varios proyectos de construcción sostenible, los cuales han obtenido su certificado del sistema de clasificación de edificios sostenibles denominado Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental (LEED, por sus siglas en inglés), estos proyectos son atractivos debido a que proporcionan ambientes saludables y productivos para los usuarios brindándoles confort, seguridad y ahorro de dinero al momento de utilizar el agua y la energía, por tanto, son vendidas a mejor precio que las construcciones tradicionales (Sepúlveda, 2016). Entre los requisitos existentes para la certificación de las construcciones está el uso de materiales reciclados, además de los materiales de construcción generados localmente, lo que permite a las empresas del sector ofrecer productos que estén acreditados energéticamente.

Adicionalmente, el gobierno colombiano desarrolló el denominado “Sello Ambiental Colombiano para Edificaciones Sostenibles” el cual busca brindar a los compradores de proyectos de viviendas nuevas, empresarios y demás interesados información verificada y precisa sobre los aspectos ambientales positivos de los productos, servicios y materiales usados en las construcciones o en su defecto que genere el menor impacto ambiental. Una de las formas en que los proyectos pueden obtener del certificado del Sello Ambiental Colombiano es el siguiente: no menos del 20% del total de los materiales de construcción usados en el proyecto estén basados ya sea en masa o costo directo final de los materiales deben ser con materiales reciclados. (Resolución 1555, 2005).

Además, se evidencia como organizaciones como la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), a través la ejecución del programa Excellence in Design for Greater Efficiencies (EDGE) tiene como objetivo que en el año 2024 una de cinco edificaciones cuente con el certificado EDGE. Este último certificado es un factor que impulsa a las empresas a buscar nuevos proveedores de materiales que sean ambientalmente sustentables, ya que entre su propuesta está alcanzar en un 20% menos de consumo en energía y agua en los materiales de construcción, facilitando el desarrollo de nuevas empresas, nuevos productos y diseños de materiales que cumplan con los requerimientos necesarios para obtener los certificados mencionados (CAMACOL, 2019).

Adicionalmente, existen convenios con entidades bancarias como el banco Davivienda lanzó los denominados “bonos verdes” por un monto que asciende los 433.000 millones de pesos con un plazo de hasta de 10 años, además de una tasa Indicador Bancario de Referencia (IBR) de 2,13% (El Tiempo, 2018.) Por su parte el grupo Bancolombia, para

los proyectos de construcciones sostenibles, genera los llamados bonos verdes, los cuales están enfocados en proyectos de construcción sostenibles que ofrecen préstamos a constructores con intereses menores al proporcionado por un proyecto de edificación no sostenible, dependiendo del impacto social y ambiental que llegue a generar el mismo, además otorga plazo de hasta 120 meses (Grupo Bancolombia, 2021)

10. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en este trabajo de profundización consiste en 4 pasos descritos a continuación:

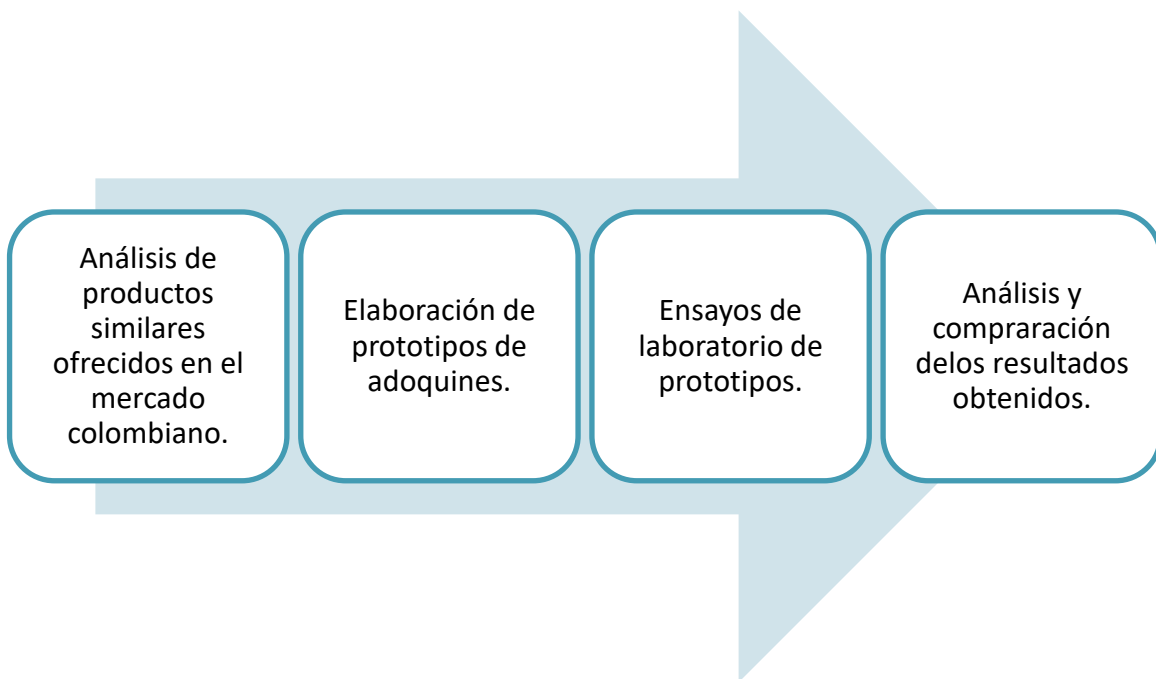


Ilustración 3: Metodología empleada. Fuente elaboración propia.

Inicialmente se realiza la indagación en empresas productoras de adoquines, teniendo en cuenta aspectos como: Material de elaboración, Norma aplicada, peso, funcionalidad, beneficio ambiental. Esta información será de utilidad para conocer productos de similares características ofrecidos en el mercado colombiano y poder realizar una comparativa si llega a existir.

Luego de ese análisis inicial de productos ofrecidos en el mercado colombiano por los productores de adoquines, se procede a realizar el desarrollo de los prototipos de adoquines, teniendo en cuenta la variación del PEAD como sustituto de la arena blanca, los cuales serán elaborados teniendo en cuenta la NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos. El método de mezclado fue realizado de forma mecánica con una mezcladora industrial para garantizar una homogeneidad en la formación de los elementos. Para efectos de este

trabajo de profundización se contempla que los materiales se encuentran completamente secos.

Después de 28 días de curado, se escogen 10 adoquines por cada prototipo de adoquín y se realizan los ensayos de laboratorio a 5 muestras, dejando las otras 5 como testigos en caso de presentar inconvenientes durante los ensayos. En esta etapa se realizaron los siguientes ensayos en el consecutivo orden: Apariencia, Porcentaje de Absorción de agua y densidad, Resistencia a la flexotracción.

Los resultados de las diferentes pruebas son analizados para determinar si cumple o no con los requisitos de la NTC 2017 y a su vez se comparan con los resultados obtenidos de los grupos de adoquines de control. Además, de la comparación de los resultados a través de la norma, estos son sometidos pruebas estadísticas con el empleo del programa STAGRAPHIS 19.

11. CARACTERIZACIÓN DEL MERCADO COLOMBIANO EN EL SECTOR DE LA FABRICACIÓN Y/O DISTRIBUCIÓN DE ADOQUINES.

En la actualidad en el mercado colombiano, se comercia principalmente los adoquines de concreto y adoquines de arcilla, tomando varias formas, tamaños y presentaciones dependiendo del uso requerido (peatonal, vehicular liviano, vehicular pesado, estadios deportivos, plazas). Otras alternativas de adoquines presentada por algunas empresas consisten en el Gramoquín y los adoquines drenantes que permiten la instalación de césped y facilidad en el paso del agua hacia el suelo, los cuales son comercializados por algunas empresas como adoquines ecológicos, algunos que emplean los materiales con certificación LEED como es el caso del empleo del Cemento estructural MAX.

También existe en el mercado colombiano adoquines que son empleados para el reemplazo de vías en sitios turísticos o coloniales, donde el proceso de la apariencia del adoquín varía. Las empresas presentan productos que pueden ser empleados recreando adoquines antiguos, en forma de madera, piedras u otros elementos.

Actualmente no existen adoquines con materiales reciclados comercializados. Sin embargo, existen diferentes estudios desarrollados por investigadores sobre adoquines con propiedades interesantes al añadir ciertos materiales que pueden ser utilizados en el sector de la construcción, pero ninguno ha sido explotado de forma comercial.

Además, entre las principales ventajas que tiene al trabajar con un material reciclado como el Polietileno de Alta Densidad (PEAD) en la economía colombiana, es la recuperación de material que de otra forma termina en los mares, rellenos sanitarios o contaminando los diferentes ecosistemas. Asimismo, al no ser fácilmente reutilizado para el envasar otros productos de consumo humano, puede obtenerse gran cantidad de este material a disposición con un segundo uso en el sector de la construcción (Roymaplast, 2015).

También al ser materiales que soportan bien el efecto de agentes externos que degradan otros materiales como el agua, sales, ácidos y demás elementos al ser químicamente inertes, lo cual afectan la calidad estructural a largo plazo del tiempo. Por esta razón, es un material que tiene propiedades interesantes para ser empleada en el ámbito de la ingeniería civil. Además, poseer una densidad baja en comparación con otros materiales como la arena y la grava; lo hace idóneo para el sector de la construcción ya que disminuye peso final de los productos elaborados con este material.

A partir de la información recolectada se realizó el análisis y clasificación de productos, ofrecidos en el mercado colombiano, de adoquines con adición de Polietileno de Alta Densidad u otro material reciclado que sea comercializado. El estudio involucró a 24 empresas a nivel nacional dedicadas a la fabricación adoquines. Luego de analizar los datos obtenidos del estudio de las empresas productoras de adoquines, se puede concluir que, de los 107 productos analizados del mercado de diferentes empresas productoras, el 83,18% de los productos ofrecidos son adoquines rectangulares; el 11,21% de los productos son tipos gramoquines, el 4,67% son adoquines drenantes, y el 0,93% de los productos son adoquines empleados como tipo colonial. De los 107 productos 82 (76.64%) son elaborados en concreto, mientras 25 (23,56%) corresponde en adoquines elaborados en arcillas. El peso promedio de los productos ofrecidos es de 3,56 Kg.

Tabla 2. Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su composición).

Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su composición)	
Adoquines de concreto	76,64%
Adoquines en arcilla	23,56%
Adoquines con adición de materiales reciclados	0.00%

Fuente: Elaboración propia

Según la función para la cual son ofertados en el mercado por las diferentes empresas productoras, se evidencia que los adoquines más usados en el sector de la construcción son los adoquines convencionales de concreto, que representa más del 80% de los productos ofertados. En contraparte los adoquines que permiten la instalación de césped o con función drenante ocupan menos de 10% de productos ofertados.

Tabla 3. Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su funcionalidad).

Adoquines producidos en el mercado colombiano (Según su funcionalidad)	
Adoquín convencional	83,18%
Adoquín drenante	4,67%
Gramoquín	11,21%
Adoquín colonial	0,93%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Adoquines comercializados en el mercado colombiano (Según su forma).

Adoquines comercializados en el mercado colombiano (Según su forma)	
Rectangular	67,29%
Cruz	8,41%
Tipo I	6,54%
Pentagonal	0,93%
Octogonal	0,93%
Guitarra	3,74%
Compuesta de varias formas	0,93%
Gramoquín	11,21%

Fuente: Elaboración propia

12. MATERIALES EMPLEADOS EN LOS PROTOTIPOS.

Cemento: EL cemento empleado para la elaboración de los adoquines es el “cemento estructural MAX” diseñado principalmente para uso en la industria de producción de la construcción, permite alcanzar un alto desarrollo de resistencias en edades iniciales y finales; adicionalmente es producto puede aportar a la certificación del LEED®. La presentación empleada para estos ensayos es la de 42.5 Kg

Agua: El agua empleada en la mezcla, debe encontrarse con pocas cantidades o nulas de sulfatos, ácidos o minerales, sólidos disueltos, sales, material orgánico o cualquier otro que pueda afectar o deteriorar el concreto empleado a largo plazo; ya que de este depende el curado y la resistencia de estos, como lo estipula la NTC 3459.

Polietileno de Alta Densidad (PEAD): El Polietileno de Alta Densidad, fue obtenido mediante el proceso de triturado con un tamaño de grano de tamaño 3/8 de pulgada, a su vez el denominado cisco o desecho del proceso de reciclado, es recogido del fondo del proceso de reciclado del plástico. El plástico obtenido es el resultado del proceso de

reciclado llevado en diferentes empresas dedicadas a la recuperación de este tipo de residuos.



Ilustración 4. Colores disponibles en los centros de reciclado del Polietileno de alta Densidad reciclado.

Arena Amarilla y blanca: La arena empleada para la elaboración de los adoquines proviene de la cantera Trituradora Tayrona, los cuales ambos se emplean para cumplir con lo estipulado en la NTC 174.

Tabla 5. Granulometría de arena blanca empleada en los diferentes prototipos de adoquines

Peso total de la muestra (g):		1020	Granulometría de arena blanca				Especificación NTC 174	
Tamiz		Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado	Porcentaje que pasa			
in	mm					Min	Max	
3/8"	9,5	0	0	0	100	100	100	
No. 4	4,75	0,3	0	0	99,97	95	100	
No. 8	2,36	201,2	0,2	0,2	80,25	80	100	
No. 16	1,18	274,2	0,27	0,47	53,36	50	85	
No. 30	600 μm	192,6	0,19	0,66	34,48	25	60	
No. 50	300 μm	102,5	0,1	0,76	24,43	10	30	
No. 100	150 μm	205,3	0,2	0,96	4,3	2	10	
No. 200		43,8	0,04	1	0,01			
Total	1019,9							
Módulo de finura		3,09			2,3		3,1	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Granulometría de arena amarilla, empleada en los diferentes prototipos de adoquines

Peso total de la muestra (g):		1020	Granulometría de arena blanca				Epecificación NTC 174	
Tamiz		Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado	Porcentaje que pasa			
in	mm					Min	Max	
3/8"	9,5	0	0	0	100	100	100	
No. 4	4,75	55,3	0,04	0,04	95,88	95	100	
No. 8	2,36	210,2	0,16	0,2	80,2	80	100	
No. 16	1,18	348,2	0,26	0,46	54,24	50	85	
No. 30	600 µm	302,6	0,23	0,68	31,67	25	60	
No. 50	300 µm	146,7	0,11	0,79	20,73	10	30	
No. 100	150 µm	256,2	0,19	0,98	163	2	10	
No. 200		21,8	0,02	1	0			
Total	1341							
Módulo de finura		2,52			2,3		3,1	

Fuente: Elaboración propia

Grava natural: La grava empleada en los diferentes tipos de concretos usados por la COMERCIALIZADORA SAMARIA S.A.S, es grava natural proveniente de la cantera Trituradora Tayrona, los cuales cumplen con lo estipulado en la NTC 174.

Tabla 7: Granulometría de grava natural para adoquines.

Peso total de la muestra (g):		1020	Granulometría de arena blanca			Epecificación NTC 174	
Tamiz		Peso retenido	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado	Porcentaje que pasa		
in	mm					Min	Max
2	50,8	0	0	0	100	100	100
1 1/2"	38,1	0	0	0	100	100	100
1"	25,4	0	0	0	100	100	100
3/4"	19	0	0	0	100	100	100
1/2"	12,7	0	0	0	100	100	100
3/8"	9,51	0	0	0	100	100	100
N4	4,76	1758	80	80	20	85	100
N8	2,36	406	18,5	98,6	1,5	10	30
N16	1,18	4	0,2	98,6	1,4	0	10
No. 200	0,075	30	1,3	99,8	0,2	0	5
FONDO	-	0	0				
TOTAL		2198	100				

Fuente: Elaboración propia

13. DESARROLLO DE PROTOTIPOS Y EXPERIMENTOS

13.1 Elaboración y ensayos de laboratorio de prototipos de adoquines.

Inicialmente se realizan diferentes hipótesis sobre el tipo de combinación ideal que se debe emplear en los adoquines a partir del análisis de bibliografías y experiencias. Se procede a emplear los siguientes grupos con diferentes porcentajes de PEAD.

Tabla 8. Prototipos de adoquines elaborados.

Adoquines elaborados.	
Tipo prototipo	Descripción del porcentaje de adición de polietileno de alta densidad (PEAD)
<i>A1</i>	Adoquín sin adición de PEAD. (grupo de control)
<i>B1</i>	Adoquines con adición de 20% de PEAD en grano.
<i>C1</i>	Adoquines con adición de 7.93% de PEAD en grano.
<i>D1</i>	Adoquines con adición de 10% de PEAD en grano
<i>A</i>	Adoquines con el 2% de PEAD (CISCO).
<i>B</i>	Adoquines con el 6% de PEAD, en grano.
<i>C</i>	Adoquines sin adición de PEAD. (Grupo de control)
<i>D</i>	Adoquines con el 2% de PEAD en grano.
<i>E</i>	Adoquines con el 6% de PEAD (CISCO).
<i>F</i>	Adoquines con el 4% de PEAD (CISCO).
<i>G</i>	Adoquines con el 4% de PEAD en grano.

Fuente: Elaboración propia

Los diferentes grupos de adoquines se elaboraron en 2 periodos de tiempo diferente debido a las medidas restrictivas presentadas en el año 2020 por la pandemia del COVID-19, sin embargo, se empleó las mismas condiciones de temperatura y espacio aislado para evitar posible variación de los resultados obtenidos, adicionalmente se preparó un segundo grupo de control para corroborar que no exista una diferencia significativa con la muestra realizada con el periodo de enero de 2020. Adicionalmente se realiza la dosificación empleada por la COMERCIALIZADORA SAMARIA S.A.S. que se muestra a continuación:

Tabla 9. Dosificación de materiales empleados en los prototipos de adoquines.

Material conformado de adoquín	Arena blanca (kg)	Arena amarilla (kg)	Agregado grueso de 3/8" (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	PEAD (kg)	Total (kg)
<i>Adoquín convencional</i>	91	20	20	22	7	0	160
<i>Adoquín con el 2% de PEAD grano</i>	87,8	20	20	22	7	3,2	160
<i>Adoquín con el 2% de PEAD cisco</i>	87,8	20	20	22	7	3,2	160
<i>Adoquín con el 4% de PEAD grano</i>	84,6	20	20	22	7	6,4	160
<i>Adoquín con el 4% de PEAD cisco</i>	84,6	20	20	22	7	6,4	160
<i>Adoquín con el 6% de PEAD grano</i>	81,4	20	20	22	7	9,6	160
<i>Adoquín con el 6% de PEAD cisco</i>	81,4	20	20	22	7	9,6	160
<i>Adoquín con el 7.93% de PEAD grano</i>	76,8	20	20	22	7	14,2	160
<i>Adoquín con el 10% de PEAD cisco</i>	72,4	20	20	22	7	18,6	160
<i>Adoquín con el 20% de PEAD cisco</i>	53,8	20	20	22	7	37,2	160

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento inicial con el pesado y dosificación de los diferentes elementos que componen los prototipos de adoquines a elaborar (Agregado grueso, Arena amarilla, Arena blanca, cemento y agua). Para realizar el pesado del cemento y del PEAD se emplea mediante una balanza digital, en cambio los materiales como grava, arenas y el agua son controlados pesados a través de la mezcladora industrial que trae incorporado. La dosificación empleada para la elaboración de los adoquines consiste en: 91 Kg de arena blanca, 20 Kg de arena amarilla, 20 Kg de arena de 3/8", 22 kilos de cemento tipo argos, 7 kilos de agua, que a medida que se producen los diferentes tipos de adoquines a ensayar, se reemplaza con la arena amarilla, manteniendo el mismo peso. El mezclado de estos se realiza en la máquina de referencia DOMAT 450. Luego del mezclado homogéneo de los materiales, se procede a transportar la mezcla seca hacia las vibro-compactadoras con los moldes de adoquines de dimensiones 200mmx100mmx80mm, las cuales producen por cada tanda 12 unidades. Luego de su elaboración los adoquines son ubicados en un sitio sin sol directo donde inicia su proceso de curado que comprende los 28 días.



Ilustración 5: Elaboración de prototipos de adoquines con PEAD. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 6: Mezcladora DOMAT 450 con sus respectivas tolvas para dosificación de material. Fuente: Elaboración propia

Luego del proceso de elaboración de los adoquines se procede a realizar su respectivo curado bajo agua durante los siguientes 28 días hasta el momento de realizar los respectivos ensayos de flexotracción como lo estipula la NTC 2017 Adoquines en Concreto para Pavimentos. Todas las muestras fueron analizadas individualmente con sus medidas en las cuales se tomaron diferentes mediciones de ancho largo y espesor con un pie de rey, para obtener unos valores promedios. Para el ensayo de apariencia se realiza para cada elemento estudiado, para ello se realiza el estudio en un ambiente controlado que cuenta con entrada de luz natural con el fin de denotar porosidad superficial, cambio de color u otra característica que pueda ser apreciado a la vista.



Ilustración 7: Curado de adoquines. Fuente: Elaboración propia



Ilustración 8. Evaluación de apariencia de los diferentes prototipos de adoquines. Fuente. Elaboración propia.

Luego los adoquines se sumergieron en agua durante $24 \text{ h} \pm 2$, hasta saturarlos completamente, al transcurrir ese periodo de tiempo son retirados rápidamente secados con un paño seco y pesados inmediatamente para obtener su masa saturada, finalmente se procede analizar la masa de los elementos sumergidos en el agua para conocer su masa sumergida.



Ilustración 9. Ensayo para cálculo de la masa sumergida. Fuente: Elaboración propia.

Después medir las masas (húmeda y sumergida), se calculan las densidades de los adoquines, se ingresan en el horno $12 \text{ h} \pm 1$ a 200°C , así como lo indica la NTC 2017 Adoquines en concreto para pavimentos, donde se someten los adoquines a medir su masa cada 2 horas hasta evidenciar que los últimos 2 mediciones sucesivas la masa presente una disminución menos del 0,2%. Se registran los valores y se da por terminado el ensayo.



Ilustración 10. Peso seco de adoquín. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la NTC 2017 adoquines de concreto para pavimentos se elaboran las muestras para el ensayo de flexotracción fueron sacadas del cuarto de curado, escurridas durante 1 minuto, secadas con un paño seco en todas las caras y puestas en la máquina universal de referencia UH-F1000kNX para su rotura. El ensayo consiste en someter los adoquines está apoyado en 2 puntos en la parte inferior y otro en la parte superior de forma

central, donde se realiza la aplicación de la fuerza. Se realizó teniendo en cuenta una variación del esfuerzo de 0.5 MPa/seg. Se registra los valores obtenidos al final del ensayo.



Ilustración 11. Maquina Universal modelo UH- F1000kNX sometiendo un adoquín a ensayo de flexotracción. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 12: Interior de adoquín con adición de Polietileno de alta Densidad, la rotura del elemento se realiza de forma recta. Fuente: Elaboración propia.

13.2 Resultados de laboratorio.

A partir de la fecha de preparación de los diferentes grupos de adoquines, se realiza el respectivo curado por 28 días para realizar las pruebas contenidas en la NTC 2017 Adoquines de concreto para Pavimentos. En las tablas 10 y 11 que se presentan a continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos luego de las pruebas realizadas (medición, apariencia, densidad, porcentaje de absorción de agua y módulo de rotura).

Tabla 10. Resultados de prototipos de adoquines.

Grupo	Tipo de adoquín	Carga de rotura (individual) (N)	Módulo de rotura (individual) MPa	Módulo de rotura (promedio) MPa	Masa sumergida en agua Ma (g)	Masa húmeda Mh (g)	Masa seca Ms (g)	Densidad (individual) Kg/m ³	Densidad (promedio) Kg/m ³	%Aa	Absorción de agua (promedio)
Contol (sin PEAD)	ESP. 1	5504,29	4,94	5,64	1888,0	3420,5	3147,6	2053,90	2128	53,25	5%
	ESP. 2	8116,88	7,15		1863,0	3423,5	3175,0	2034,60		56,05	
	ESP. 3	7943,95	6,85		1863,0	3373,0	3196,2	2116,69		51,00	
	ESP. 4	7832,20	4,01		1887,5	3410,0	3391,2	2227,39		52,25	
	ESP. 5	6205,08	5,24		1890,0	3435,5	3411,6	2207,44		54,55	
10% PEAD en grano	ESP. 6	1274,11	1,10	1,37	1097,5	2611,5	2174,2	1436,06	1465,1	51,40	18%
	ESP. 7	1364,55	1,15		1123,0	2621,0	2257,2	1506,81		49,80	
	ESP. 8	1907,83	1,59		1153,5	2685,5	2264,7	1478,26		53,20	
	ESP. 9	1637,46	1,35		1098,0	2697,5	2333,1	1458,64		59,95	
	ESP. 10	1955,51	1,68		1070,5	2588,5	2194,6	1445,72		51,80	
20% PEAD en grano	ESP. 11	782,96	0,67	0,74	1410,0	2924,5	2644,6	1746,19	1692,13	51,45	9%
	ESP. 12	672,02	0,58		1136,5	2652,5	2505,3	1652,57		51,60	
	ESP. 13	839,39	0,74		1117,5	2633,0	2404,5	1586,61		51,55	
	ESP. 14	1012,33	0,86		1392,5	2913,0	2609,3	1716,08		52,05	
	ESP. 15	943,34	0,84		1462,0	3030,5	2759,3	1759,20		56,85	
7,93% PEAD en grano	ESP. 16	1665,59	1,40	1,73	1388,5	2932,5	2709,7	1754,99	1777,74	54,40	13%
	ESP. 17	1700,56	1,43		1467,0	3040,0	2725,9	1732,93		57,30	
	ESP. 18	2327,53	1,98		1367,5	2891,5	2565,5	1683,40		52,40	
	ESP. 19	2143,63	1,80		1693,0	3176,0	2789,1	1880,71		48,30	
	ESP. 20	2427,18	2,05		1748,5	3267,0	2789,0	1836,68		51,85	
2% PEAD en cisco	ESP. 21	5330,56	4,59	3,86	1513,1	3123,7	2755,4	1710,79	1669,79	61,06	17%
	ESP. 22	4486,24	3,88		1514,1	3118,8	2618,5	1631,77		60,47	
	ESP. 23	3752,07	3,19		1558,5	3133,8	2650,8	1682,73		57,53	
	ESP. 24	4036,27	3,39		1528,1	3188,2	2693,0	1622,19		66,01	
	ESP. 25	5056,38	4,26		1539,1	3105,4	2665,0	1701,46		56,63	
6% PEAD en grano	ESP. 26	4851,18	4,09	5,67	1532,7	3192,2	2704,0	1629,44	1690,71	65,94	15%
	ESP. 27	5666,42	4,74		1540,8	3100,6	2757,9	1768,10		55,98	
	ESP. 28	5126,32	4,26		1512,0	3141,3	2836,5	1740,93		62,93	
	ESP. 29	7030,33	5,89		1560,1	3189,6	2662,2	1633,78		62,95	
	ESP. 30	11205,20	9,37		1502,7	3157,0	2781,3	1681,30		65,43	
Contol (sin PEAD)	ESP. 31	8824,98	7,38	5,73	1917,6	3339,6	3184,2	2239,16	2075,26	42,21	7%
	ESP. 32	5588,21	4,73		1817,5	3207,6	2997,7	2156,46		39,01	
	ESP. 33	7098,04	5,94		1835,2	3189,2	3053,1	2254,83		35,40	
	ESP. 34	6790,80	5,73		1655,0	3322,5	2971,4	1781,95		66,75	
	ESP. 35	5833,31	4,85		1724,0	3285,8	3036,0	1943,91		56,18	
2% PEAD en grano	ESP. 36	6020,07	5,04	5,13	1555,5	3142,9	2698,5	1699,99	1689,45	58,74	17%
	ESP. 37	5285,42	4,44		1523,8	3182,4	2697,0	1626,14		65,85	
	ESP. 38	6869,00	5,85		1596,0	3197,2	2669,5	1667,14		60,12	
	ESP. 39	5581,86	4,69		1538,7	3107,1	2652,6	1691,24		56,84	
	ESP. 40	6625,02	5,60		1536,0	3112,7	2779,3	1762,73		57,67	
6% PEAD en cisco	ESP. 41	6192,37	5,23	5,94	1538,8	3063,4	2767,6	1815,30	1745,07	52,46	14%
	ESP. 42	6758,53	5,70		1554,2	3156,2	2777,7	1733,97		60,20	
	ESP. 43	7000,61	5,90		1517,8	3098,0	2757,4	1744,97		58,02	
	ESP. 44	6596,57	5,55		1559,4	3149,8	2679,6	1684,94		59,03	
	ESP. 45	8662,06	7,31		1588,9	3146,1	2719,1	1746,16		55,72	
4% PEAD en cisco	ESP. 46	6475,77	5,48	5,15	1567,8	3139,6	2784,8	1771,65	1704,12	57,19	17%
	ESP. 47	6770,13	5,69		1510,1	3173,2	2651,6	1594,39		66,31	
	ESP. 48	6667,46	5,61		1587,3	3173,5	2609,6	1645,23		58,62	
	ESP. 49	5684,38	4,80		1594,9	3128,7	2783,9	1815,12		53,37	
	ESP. 50	4946,55	4,19		1573,5	3189,7	2738,2	1694,20		61,62	
4% PEAD en grano	ESP. 51	7514,32	6,35	7,98	1524,3	3100,2	2653,2	1683,64	1696,59	57,59	16%
	ESP. 52	8198,42	6,91		1579,6	3090,3	2645,3	1751,04		51,07	
	ESP. 53	11165,10	9,42		1500,5	3161,3	2720,4	1638,07		66,07	
	ESP. 54	9442,49	7,95		1515,9	3084,4	2771,1	1766,71		56,85	
	ESP. 55	10996,00	9,26		1570,9	3182,0	2647,8	1643,49		61,11	

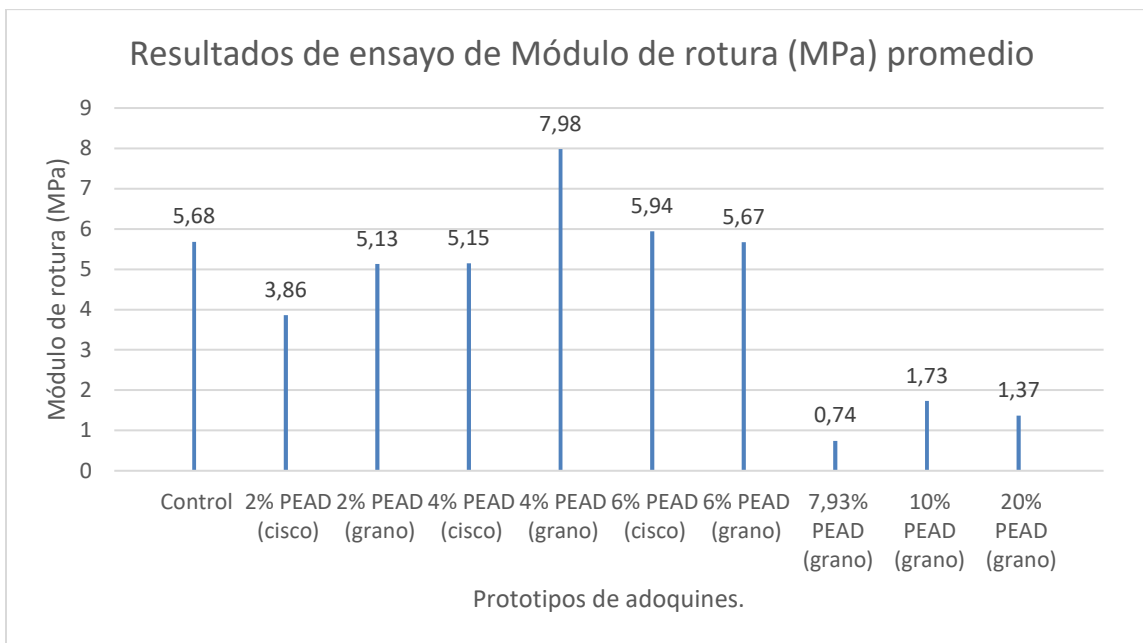
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Continuación de resultados prototipos de adoquines.

Grupo	Tipo de adoquín	Apariencia	Longitud promedio (mm)	Ancho inscrito promedio (mm)	Ancho promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Diferencia con respecto a la longitud (mm)	Diferencia con respecto al ancho (mm)	Diferencia con respecto al espesor (mm)	Grupo
Contol (sin PEAD)	ESP. 1	Uniforme	180,29	99,57	100,71	78,58	0,29	0,71	1,42	A1
	ESP. 2	Uniforme	180,71	99,56	100,04	78,64	0,71	0,04	1,36	
	ESP. 3	Uniforme	180,58	99,60	100,10	79,23	0,58	0,10	0,77	
	ESP. 4	Uniforme	180,30	99,89	100,30	79,51	0,30	0,30	0,49	
	ESP. 5	Uniforme	180,32	100,07	100,20	79,92	0,32	0,20	0,08	
10% PEAD en grano	ESP. 6	Poroso, desprendimiento de material	180,59	99,77	100,14	79,05	0,59	0,14	0,95	B1
	ESP. 7	Poroso, desprendimiento de material	180,42	99,90	100,35	79,96	0,42	0,35	0,04	
	ESP. 8	Poroso, desprendimiento de material	180,38	100,24	101,10	80,18	0,38	1,10	0,18	
	ESP. 9	Poroso, desprendimiento de material	180,46	99,94	100,40	78,75	0,46	0,40	1,25	
	ESP. 10	Poroso, desprendimiento de material	180,14	99,55	100,15	80,88	0,14	0,15	0,88	
20% PEAD en grano	ESP. 11	Uniforme	180,58	99,60	100,60	79,23	0,58	0,60	0,77	C1
	ESP. 12	Uniforme	180,14	99,84	100,08	79,31	0,14	0,08	0,69	
	ESP. 13	Uniforme	180,37	100,05	100,40	78,00	0,37	0,40	2,00	
	ESP. 14	Uniforme	180,13	100,41	100,53	79,49	0,13	0,53	0,51	
	ESP. 15	Uniforme	180,27	100,31	100,50	78,56	0,27	0,50	1,44	
7,93% PEAD en grano	ESP. 16	Poroso, desprendimiento de material	179,50	99,10	99,97	80,19	0,50	0,03	0,19	D1
	ESP. 17	Poroso, desprendimiento de material	179,80	99,60	100,42	79,98	0,20	0,42	0,02	
	ESP. 18	Poroso, desprendimiento de material	180,60	99,26	99,79	79,81	0,60	0,21	0,19	
	ESP. 19	Poroso, desprendimiento de material	180,30	99,61	99,98	80,20	0,30	0,02	0,20	
	ESP. 20	Poroso, desprendimiento de material	180,04	99,70	100,10	79,91	0,04	0,10	0,09	
2% PEAD en cisco	ESP. 21	Uniforme	180,10	99,93	100,71	78,96	0,10	0,71	1,04	A
	ESP. 22	Uniforme	180,30	99,28	100,04	79,06	0,30	0,04	0,94	
	ESP. 23	Uniforme	180,29	99,47	100,10	79,70	0,29	0,10	0,30	
	ESP. 24	Uniforme	180,28	99,37	100,30	80,10	0,28	0,30	0,10	
	ESP. 25	Uniforme	180,15	99,26	100,20	80,01	0,15	0,20	0,01	
6% PEAD en grano	ESP. 26	Uniforme	180,25	99,23	100,14	80,05	0,25	0,14	0,05	B
	ESP. 27	Uniforme	180,20	100,29	100,50	80,15	0,20	0,50	0,15	
	ESP. 28	Uniforme	180,16	100,21	101,10	80,21	0,16	1,10	0,21	
	ESP. 29	Uniforme	180,40	100,03	100,40	80,20	0,40	0,40	0,20	
	ESP. 30	Uniforme	180,02	99,52	100,15	80,30	0,02	0,15	0,30	
Contol (sin PEAD)	ESP. 31	Uniforme	180,35	100,59	100,60	80,19	0,35	0,60	0,19	C
	ESP. 32	Uniforme	180,19	99,77	99,88	79,96	0,19	0,12	0,04	
	ESP. 33	Uniforme	180,14	99,61	100,40	80,20	0,14	0,40	0,20	
	ESP. 34	Uniforme	180,25	99,78	100,35	79,91	0,25	0,35	0,09	
	ESP. 35	Uniforme	180,15	100,04	100,50	80,40	0,15	0,50	0,40	
2% PEAD en grano	ESP. 36	Uniforme	179,50	99,10	99,97	80,19	0,50	0,03	0,19	D
	ESP. 37	Uniforme	179,80	99,60	100,42	79,98	0,20	0,42	0,02	
	ESP. 38	Uniforme	180,60	99,26	99,79	79,81	0,60	0,21	0,19	
	ESP. 39	Uniforme	180,30	99,61	99,98	80,20	0,30	0,02	0,20	
	ESP. 40	Uniforme	180,04	99,70	100,10	79,91	0,04	0,10	0,09	
6% PEAD en cisco	ESP. 41	Uniforme	180,29	99,60	100,00	80,02	0,29	0,00	0,02	E
	ESP. 42	Uniforme	180,15	99,11	100,03	80,00	0,15	0,03	0,00	
	ESP. 43	Uniforme	180,20	99,58	100,12	80,06	0,20	0,12	0,06	
	ESP. 44	Uniforme	180,05	99,87	100,08	80,11	0,05	0,08	0,11	
	ESP. 45	Uniforme	180,40	99,99	100,03	80,07	0,40	0,03	0,07	
4% PEAD en cisco	ESP. 46	Uniforme	179,90	99,31	99,97	79,87	0,10	0,03	0,13	F
	ESP. 47	Uniforme	179,97	100,02	100,21	80,09	0,03	0,21	0,09	
	ESP. 48	Uniforme	180,01	99,49	100,05	80,10	0,01	0,05	0,10	
	ESP. 49	Uniforme	180,08	99,88	100,10	79,90	0,08	0,10	0,10	
	ESP. 50	Uniforme	180,06	99,61	99,89	79,86	0,06	0,11	0,14	
4% PEAD en grano	ESP. 51	Uniforme	180,10	99,70	99,99	79,93	0,10	0,01	0,07	G
	ESP. 52	Uniforme	180,11	99,96	100,06	80,01	0,11	0,06	0,01	
	ESP. 53	Uniforme	180,00	99,11	100,04	80,00	0,00	0,04	0,00	
	ESP. 54	Uniforme	179,96	99,88	100,30	79,95	0,04	0,30	0,05	
	ESP. 55	Uniforme	179,98	99,69	100,15	79,99	0,02	0,15	0,01	

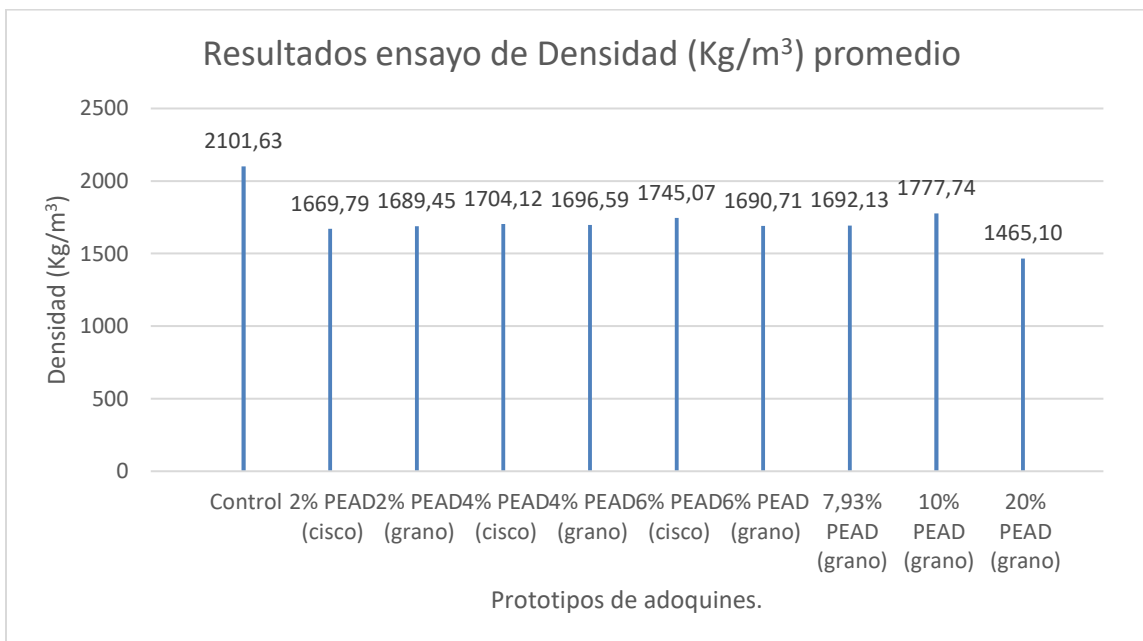
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 1. Resultados ensayo de Densidad (Kg/m^3) de módulo rotura (MPa) promedio.



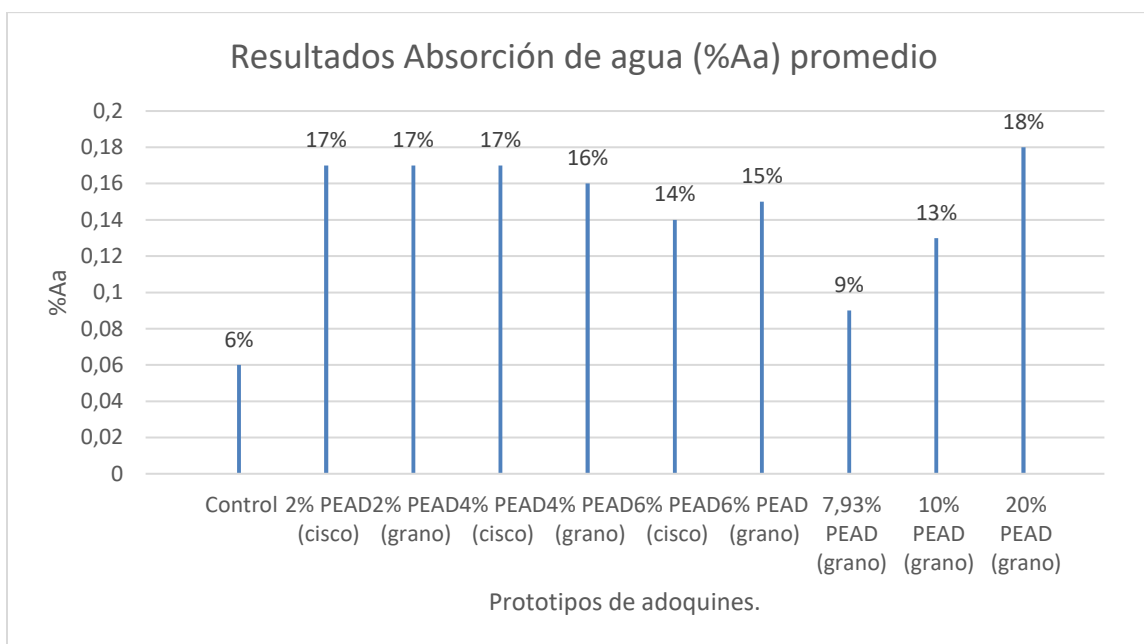
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2. Resultados ensayo Densidad (Kg/m^3) promedio.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3. Resultados de porcentaje de absorción de agua (%Aa) promedio.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, los adoquines cuyos porcentajes de PEAD en sus 2 variaciones (cisco y grano) del 4 y 6% cumplen con el valor mínimo de resistencia en promedio (5.0 MPa) e individual (4.2 MPa) al igual que el grupo de control (ver tabla 12), como lo establece la NTC 2017

Los resultados de densidad, se observa la disminución de los prototipos con diferentes porcentajes de PEAD los cuales disminuyen con respecto al valor de referencia de los adoquines de control entre un 16,97% y 30,29% (ver tabla 13). Esta disminución de la densidad también modifica directamente el peso y masa final de los adoquines. La norma no establece un valor mínimo o máximo para su aceptación.

El porcentaje de humedad en los adoquines de control cumplen con el valor mínimo para su aprobación (6%) (ver tabla 14), por el contrario, todos los adoquines con diferentes porcentajes de Polietileno de Alta Densidad se evidencia un alto porcentaje de absorción de humedad, el cual no es aprobado por la normativa.

A partir de los resultados de la apariencia de los diferentes grupos de adoquines se indica lo siguiente: Los grupos que presentan porosidad y desprendimiento de material son: A1, B1 y D1 que son los que contienen el 7,93%, 10% y 20% de PEAD respectivamente (ver tabla 10). Los grupos restantes presentan un buen acabado de los adoquines y no se denota desprendimiento del material.

Con base en la información obtenida de las mediciones de los adoquines, y comparar sus variaciones con respecto a lo estipulado en la NTC 2017 Adoquines de concreto para Pavimentos (ver tabla 11), se puede llegar a la conclusión de que los elementos cumplen con el requisito de tolerancia; debido a que la mayor diferencia encontrada en todos los adoquines con respecto a su longitud y ancho fue de 0,71mm y 1.10mm cuando la norma indica que esta diferencia no debe ser mayor de 1.5 mm; mientras que la mayor diferencia en medidas de espesor es de 2mm y la norma estipula que esta diferencia no puede ser mayor de 2mm.

13.3 Análisis estadístico de resultados de laboratorio

Con base en los resultados presentados anteriormente (ver tabla 10), se realiza las pruebas de Normalidad de cada uno de los aspectos evaluados en los ensayos para determinar que los datos a procesar sean paramétricos o no paramétricos.

Tabla 12 Pruebas de Normalidad para Módulo de rotura o MR (MPa)

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	48,9818	0,0000332613
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,948253	0,0192709

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Pruebas de Normalidad para Densidad (Kg/m3)

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	40,6909	0,0006166730
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,87302	0,0000324763

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14. Prueba de normalidad para absorción de aguas (%Aa)

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	13,7455	0,6176700000
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,953682	0,0335241000

Fuente: Elaboración propia.

En las anteriores tablas se muestran los resultados realizados con Shapiro-Wilk y con Chi-cuadrado para determinar si el comportamiento de Módulo de rotura, densidad y porcentaje

de absorción de agua para determinar si el comportamiento de los datos corresponde a una distribución normal. La prueba de chi-cuadrada divide los rangos de MR (MPa), Densidad (Kg/m^3) y absorción de agua (%Aa) en 19 clases igualmente probables y compara el número de observaciones en cada clase con el número esperado de observaciones. La prueba de Shapiro-Wilk está basada en la comparación de los cuartiles de la distribución normal ajustada a los datos.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, en todos los aspectos estudiados se puede rechazar la idea de que el Módulo de rotura, la densidad y el porcentaje de absorción de agua provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Esto quiere decir que debe ser manejado con pruebas no paramétricas, la cual tiene en cuenta para el análisis a partir de la mediana de cada grupo, en vez de la media.

A partir de lo anterior, se define que la información debe ser tratada con estadística no paramétrica, ya que no cumple con (los requisitos) para ser considerado una distribución normal, en este caso se tiene en cuenta para las pruebas los valores de las medianas. Para esta ocasión la prueba no paramétrica que se empleó fue la prueba de la Mediana de Mood, en los diferentes aspectos analizados.

Prueba de la Mediana de Mood para MR (MPa) por Adoquines

Total n = 55

Gran mediana = 4,74

Tabla 15. Prueba mediana de Mood para MR.

Adoquines	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
10% PEAD en grano	5	5	0	1,35		
2% PEAD cisco	5	5	0	3,88		
2% PEAD en grano	5	2	3	5,04		
20% PEAD en grano	5	5	0	0,74		
4% PEAD en cisco	5	1	4	5,48		
4% PEAD grano	5	0	5	7,95		
6% PEAD en cisco	5	0	5	5,7		
6% PEAD en grano	5	3	2	4,74		
7,93% PEAD en grano	5	5	0	1,8		
Control (sin PEAD)	10	2	8	5,485	4,2436	7,30538

Estadístico = 35,7937 Valor-P = 0,0000431319

Fuente: Elaboración propia.

Prueba de la Mediana de Mood para Mh (g) por Adoquines

Total n = 55

Gran mediana = 3141,3

Tabla 16. Prueba de la Mediana de Mood para Mh (g) por Adoquines

Adoquines	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
10% PEAD en grano	5	5	0	2621		
2% PEAD cisco	5	4	1	3123,7		
2% PEAD en grano	5	2	3	3142,9		
20% PEAD en grano	5	5	0	2913		
4% PEAD en cisco	5	2	3	3173,2		
4% PEAD grano	5	3	2	3100,2		
6% PEAD en cisco	5	2	3	3146,1		
6% PEAD en grano	5	2	3	3157		
7,93% PEAD en grano	5	3	2	3040		
Control (sin PEAD)	10	0	10	3356,3	3195,17	3431,61

Estadístico = 22,9894 Valor-P = 0,00622013

Fuente: Elaboración propia.

Prueba de la Mediana de Mood para Ms (g) por Adoquines

Total n = 55

Gran mediana = 2719,1

Tabla 17. Prueba de la Mediana de Mood para Ms (g) por Adoquines

Adoquines	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
10% PEAD en grano	5	5	0	2257,2		
2% PEAD cisco	5	4	1	2665		
2% PEAD en grano	5	4	1	2697		
20% PEAD en grano	5	4	1	2609,3		
4% PEAD en cisco	5	2	3	2738,2		
4% PEAD grano	5	3	2	2653,2		
6% PEAD en cisco	5	2	3	2757,4		
6% PEAD en grano	5	2	3	2757,9		
7,93% PEAD en grano	5	2	3	2725,9		
Control (sin PEAD)	10	0	10	3161,3	2979,93	3404,98

Estadístico = 21,3889 Valor-P = 0,0110313

Fuente: Elaboración propia.

Prueba de la Mediana de Mood para Densidad (Kg/m³) por Adoquines

Total n = 55

Gran mediana = 1716,08

Tabla 18. Prueba de la Mediana de Mood para Densidad (Kg/m³) por Adoquines

Adoquines	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
10% PEAD en grano	5	5	0	1458,64		
2% PEAD cisco	5	5	0	1682,73		
2% PEAD en grano	5	4	1	1691,24		
20% PEAD en grano	5	3	2	1716,08		
4% PEAD en cisco	5	3	2	1694,2		
4% PEAD grano	5	3	2	1683,64		
6% PEAD en cisco	5	1	4	1744,97		
6% PEAD en grano	5	3	2	1681,3		
7,93% PEAD en grano	5	1	4	1754,99		
Control (sin PEAD)	10	0	10	2136,57	1834,5	2249,75

Estadístico = 26,1905 Valor-P = 0,00190138

Fuente: Elaboración propia.

Prueba de la Mediana de Mood para % Aa por Adoquines

Total n = 55

Gran mediana = 13,51

Tabla 19. Prueba de la Mediana de Mood para % Aa por Adoquines

Adoquines	Tamaño de Muestra	n<=	n>	Mediana	LC inferior 95,0%	LC superior 95,0%
10% PEAD en grano	5	0	5	17,95		
2% PEAD cisco	5	1	4	18,22		
2% PEAD en grano	5	1	4	17,13		
20% PEAD en grano	5	5	0	9,83		
4% PEAD en cisco	5	2	3	16,49		
4% PEAD grano	5	1	4	16,82		
6% PEAD en cisco	5	2	3	13,62		
6% PEAD en grano	5	3	2	13,51		
7,93% PEAD en grano	5	3	2	12,71		

Control (sin PEAD)	10	10	0	6,265	0,598667	10,798
--------------------	----	----	---	-------	----------	--------

Estadístico = 26,1905 Valor-P = 0,00190138

Fuente: Elaboración propia.

La prueba de medianas de Mood evalúa la hipótesis de que las medianas de todas las 10 muestras son iguales. Lo hace contando el número de observaciones en cada muestra, a cada lado de la mediana global, la cual es igual a 4,74 para el módulo de rotura, 3141,3 para la masa húmeda, 2719,1 para la masa seca; 1716,8 para la densidad y de 13,51 para el caso del porcentaje de humedad. Puesto que los valores valor-P para cada una de las pruebas de chi-cuadrada es menor que 0,05 (ver tablas 15, 16, 17, 18 y 19), las medianas de las muestras son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0%. También se incluyen (si están disponibles) los intervalos del 95,0% de confianza para mediana, basados en los estadísticos de orden de cada muestra.

Finalmente se elaboran los gráficos de cajas y bigotes para los diferentes aspectos evaluados de los cuales se puede observar lo siguiente:

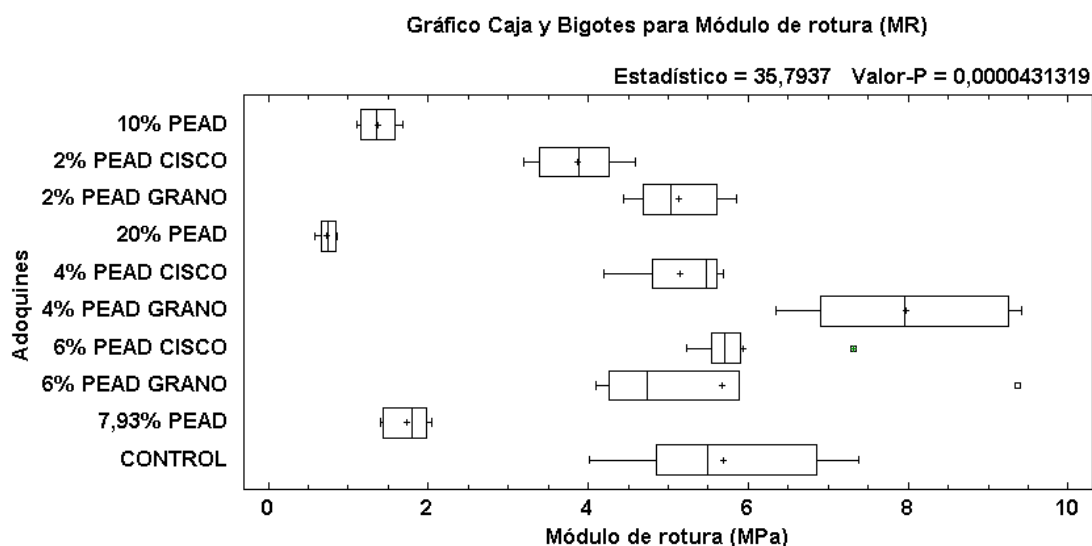


Ilustración 13. Gráficos de cajas y bigotes para MR. Fuente. Elaboración propia.

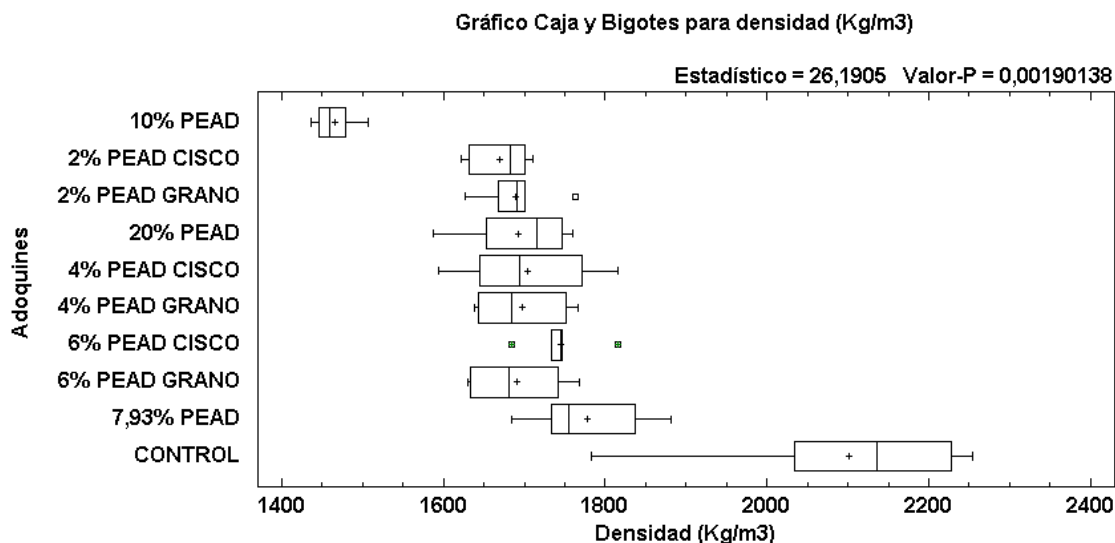


Ilustración 14. Gráfico de cajas y bigotes para densidad (Kg/m³). Fuente: Elaboración propia.

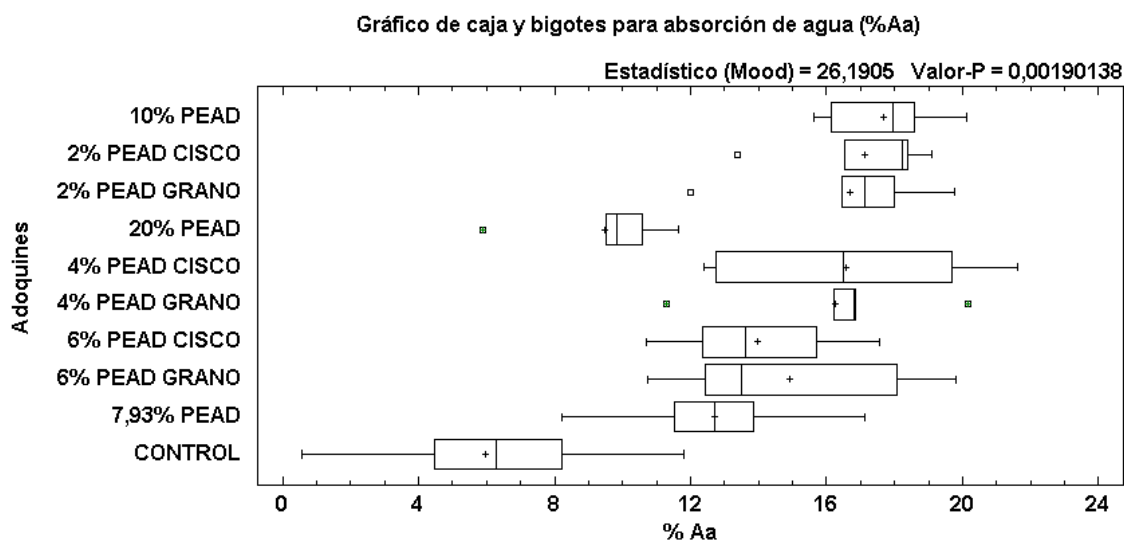


Ilustración 15. Gráfico de caja y bigotes para porcentaje de absorción de agua (%Aa). Fuente:

Elaboración propia.

Finalmente, En el gráfico de cajas y bigotes que evalúa el comportamiento de la densidad, observa que los diferentes grupos de adoquines presentan diferencias significativas entre sí con un porcentaje de certeza del 95% y con valores $P = 0,0000431319$ para el MR, $P = 0,00622013$ para masa húmeda (Mh, $P = 0,0110313$) para masa seca (Ms y

$P=0.00190138$) para %Aa (ver ilustraciones 13, 14 y 15), observando un diferente comportamiento de los grupos de adoquines con los diferentes porcentajes de PEAD que los compone.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que el Módulo de rotura (MPa), Densidad (Kg/m^3) y Porcentaje de absorción de agua (%Aa); provienen de una distribución normal con 95% de confianza. Esto quiere decir que los datos deben ser evaluados con pruebas no paramétricas.

Histograma para MR (MPa)

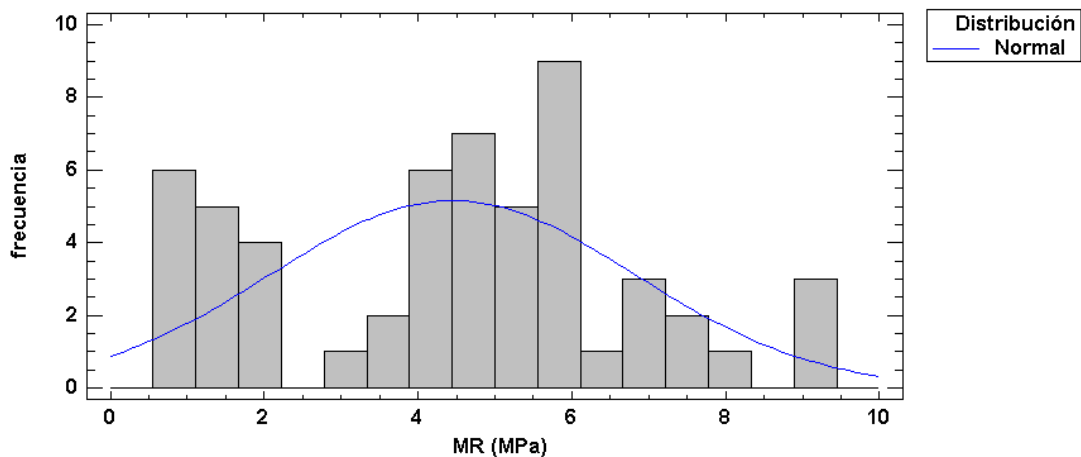


Ilustración 16. Histograma para Módulo de rotura (MR)

Histograma para Densidad (Kg/m^3)

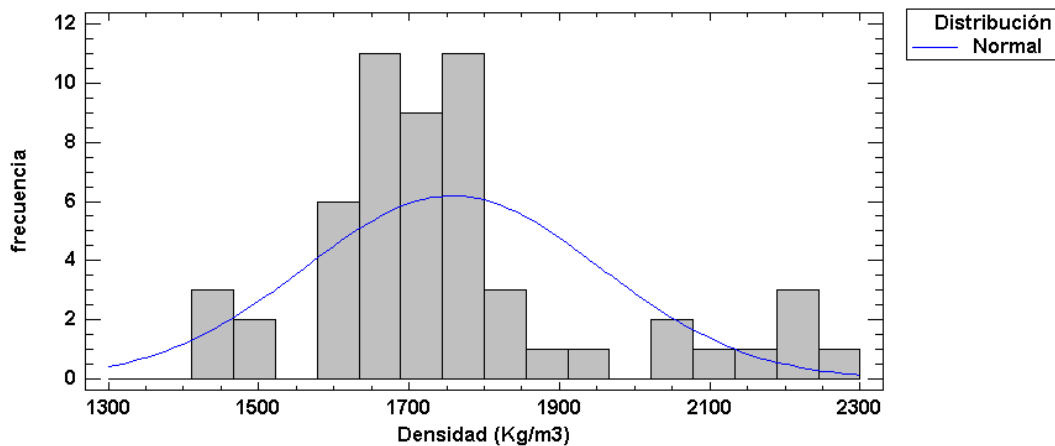


Ilustración 17. Histograma de frecuencia para densidad (Kg/m^3)

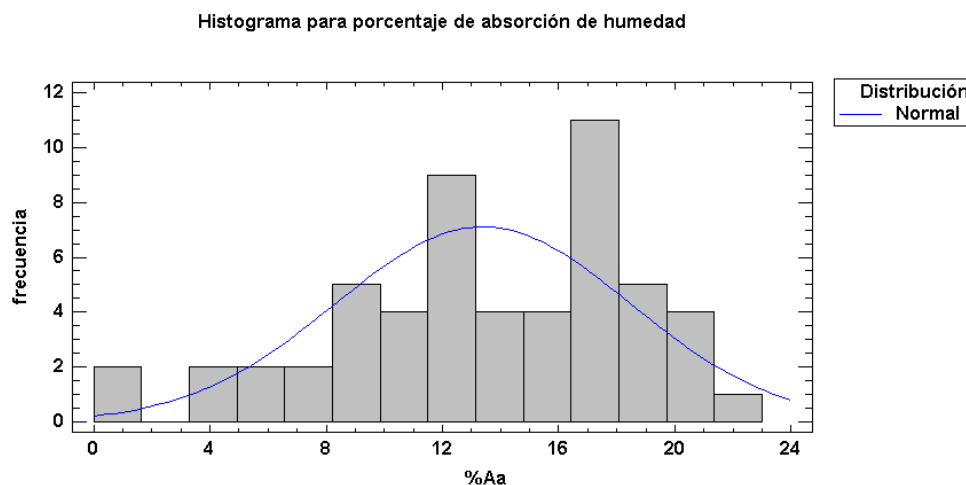


Ilustración 18. Histograma de frecuencia de porcentaje de absorción de agua (%Aa).

En los histogramas se evidencia un comportamiento muy variado, se observa mayor frecuencia de los datos en el rango de [5,5556 - 6,1111). También, se presenta un cambio significativo en el comportamiento de la flexotracción. Asimismo se conoce que estos datos no tienen comportamiento normal.

En el segundo histograma, se evidencian 2 modas, donde se tiene alta frecuencia entre el [1633,33 – 1688,89) y [1744,44 – 1800,00) (ver ilustración 17). También, se observan 3 zonas se encuentran dispersos los datos, lo que denota un comportamiento significativamente notable con respecto al porcentaje de PEAD que tienen las muestras de adoquines.

Por último, en el histograma que evalúa el porcentaje de absorción de agua, se observa que la mayor concentración de datos se encuentra en el rango [16,4286 – 18,0714) (ver ilustración 18). Adicionalmente se denota que los diferentes grupos presentan un comportamiento que debe ser evaluado con estadística no paramétrica.

14. COSTOS Y RENDIMIENTOS.

Para el eventual análisis de costos y rendimientos se emplearon los precios de materiales empleados por la COMERCIALIZADORA SAMARIA S.A.S. teniendo de esta forma tenemos que:

El precio de la materia prima empleada en los adoquines sin modificar es de aproximadamente 278,28 pesos por adoquín, mientras el valor obtenido en materiales por elaborar adoquines con Polietileno de Alta Densidad reciclado varía entre 369.05 y 457.14 pesos, lo que representa un aumento de precio de 32.62% hasta un 64.28%.

El aumento del precio de los adoquines modificados es debido al del PEAD reciclado, que es en promedio de 1400 pesos en el mercado colombiano. A pesar de que la cantidad de adoquines generados aumenta significativamente con el reemplazo de agregados por Polietileno de alta Densidad, su alto precio por kilo, en comparación con otros materiales convencionales empleados en la construcción afecta en el precio final por unidad del producto.

Tipo de adoquín	Costo total materiales	% aumento precio	Precio por adoquín	% aumento de precio por adoquín	Unidades producidas	Unidades adicionales por 1/2 m3	Aumento de producción
<i>Adoquín sin PEAD</i>	\$ 13.357,35	0%	\$ 278,28	0,00%	48	0	0,00%
<i>Con 2% de PEAD en grano</i>	\$ 17.762,02	32,98%	\$ 370,04	32,98%	48	0	0,00%
<i>Con 2% de PEAD en CISCO</i>	\$ 17.762,02	32,98%	\$ 370,04	32,98%	48	0	0,00%
<i>Con 4% de PEAD en grano</i>	\$ 22.166,69	65,95%	\$ 369,44	32,76%	60	12	25,00%
<i>Con 4% de PEAD en CISCO</i>	\$ 22.166,69	65,95%	\$ 369,44	32,76%	60	12	25,00%
<i>Con 6% de PEAD en grano</i>	\$ 26.571,37	98,93%	\$ 369,05	32,62%	72	24	50,00%
<i>Con 6% de PEAD en CISCO</i>	\$ 26.571,37	98,93%	\$ 369,05	32,62%	72	24	50,00%
<i>Con 7,93% de PEAD en grano</i>	\$ 32.914,30	146,41%	\$ 457,14	64,28%	72	24	50,00%
<i>Con 10% de PEAD en grano</i>	\$ 38.974,20	191,78%	\$ 405,98	45,89%	96	48	100,00%
<i>Con 20% de PEAD en grano</i>	\$ 64.591,05	383,56%	\$ 448,55	61,19%	144	96	200,00%

Tabla 20. Costo de producción y unidades producidas por ½ M³

Fuente: Elaboración propia.

15. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de los lotes de prototipos elaborados con diferentes porcentajes de PEAD reciclado en grano y CISCO, se comenta lo siguiente:

En la actualidad, en el mercado colombiano no se evidencia la existencia de adoquines de concreto con adición de materiales reciclados en el comercio. Sin embargo, existen varios estudios realizados en los que desarrollan adoquines con reemplazo o adición de materiales reciclados como el cisco de palma, Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Tereftalato de Polietileno (PET), Residuos de construcción y demolición (RCD), evidenciando el interés de desarrollar medidas ambientalmente sostenibles.

En general los adoquines convencionales poseen una mayor densidad en comparación con los adoquines con adición de PEAD en grano y en cisco. Donde se observa una disminución de la densidad de los adoquines con adición de PEAD, esto se debe a que el peso específico del PEAD es menor que el del agregado convencional el cual varía entre 0,94 y 0,97 g/cm³.

De los grupos A, B, C, D, E, F, G, A1, B1 y D1 (ver tabla 10) se evidencia que solamente los adoquines del tipo B1, D1 y A, no cumplen con el valor mínimo del módulo de rotura (M_r) requerida por la NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos, lo cual no permite ser considerados aptos como vehiculares. Los demás grupos (incluyendo los grupos de control) presenta resultados favorables. De los grupos de adoquines ensayados, se observa que los adoquines con mejor resultados de módulo de rotura son los adoquines del grupo G, presentando una resistencia promedio de 7,79 MPa, en comparación del grupo de control que es de 5,72 MPa. Lo que cual se refleja en un aumento significativo de la resistencia del 36,36% en el caso de adoquines con adición de PEAD del 4% en grano. Con el 6% de PEAD (CISCO) el aumento de la resistencia con el adoquín convencional es del 3,69% en promedio. Sin embargo, los tipos (A, B, D y F); a pesar de que cumplen con los requisitos de la NTC 2017 en la resistencia a la flexotracción se denota que estos disminuyen en los porcentajes los cuales son en su orden del -32.56%, -0.98%; -10.50% y -9.98%; siendo evidente la pérdida de resistencia con respecto a la mezcla de referencia. Sin embargo, estos resultados todavía cumplen con el parámetro de la NTC 2017 adoquines de concreto para Pavimentos.

Adicionalmente, con los prototipos que reemplazan PEAD por de arena amarilla en la fabricación de los adoquines, se denota que por cada metro cúbico de mezcla se puede disminuir el uso de esta entre el 3,2% hasta el 9,60%; lo cual contribuye a un menor peso del adoquín elaborado y en menos consumo de materias primas. Este porcentaje es inversamente proporcional al porcentaje de PEAD adicionado para el caso del presente

estudio, lo cual se relaciona directamente con la disminución del peso de estos y el aumento en la cantidad de los adoquines. Los grupos A1, B1 y D1 (ver tabla 10) a pesar de que la disminución del material es mayor que en los demás grupos, su poca resistencia a la flexotracción no los convierte en elementos viables para continuar con estudios más extensos.

Se evidencia un significativo aumento en la producción de unidades de adoquines del 25% y 50% (ver tabla 23) en comparación a sus contrapartes elaborados en la COMERCIALIZADORA Samaria; pasando de producir, con medio metro cúbico de mezcla 48 adoquines a 60 y 72 adoquines, respectivamente.

A pesar de que la producción aumenta en todas las combinaciones en la que se utiliza el PEAD, la combinación que garantiza aumento de unidades producidas y a su vez mantener la mayor resistencia es del 6% con PEAD en forma de CISCO y que a su vez cumpla con los requisitos exigidos por la NTC 2017 adoquines de concreto para pavimentos. Se evidencia aumento promedio de la resistencia de los adoquines de un 3,69% en comparación al adoquín de control fabricado en la COMERCIALIZADORA SAMARIA S.A.S.

El porcentaje de absorción de agua en los adoquines exigida por la NTC 2017 adoquines de concreto para pavimentos se observa que solo los adoquines convencionales (Tipo C y A1) cumple con el porcentaje de absorción de agua del 7% en promedio de la muestra (ver tabla 10), Por otro lado, los demás tipos de adoquines (Tipo A, B, D, E, F, G; B1, C1 y D1) tienen un porcentaje de absorción de agua que varía entre el 14% y el 17%; evidenciando un comportamiento diferente que debe ser estudiado con mayor profundidad y realizar experimentos en un ambiente real, donde se pueda analizar el comportamiento de los prototipos a lo largo del tiempo.

En relación con la apariencia (ver tabla 11), se aprecia mayor porosidad en los adoquines, incluso llega en algunos elementos a presentar desprendimiento de material particulado en los prototipos que presentan una mayor concentración de PEAD superior al 7,93%. Se observa un acabado más uniforme los adoquines que presentan una concentración de PEAD del 6% o inferior, el cual puede ser la producción a escala industrial, ya que no se denota defectos o porosidad abundante en todas sus caras.

En cuanto a la comparación de precios (ver tabla 23), se denota que los adoquines sin adición de Polietileno de alta Densidad son más económicos que producir en comparación con sus homólogos de PEAD, mientras el precio de los materiales empleados en un adoquín convencional es de 278,28 pesos, mientras el de su homólogo de PEAD puede variar desde

369,05 pesos hasta 457,14; dependiendo de la cantidad de plástico reciclado empleado para su elaboración.

Con respecto a las dimensiones de los adoquines (ver tabla 11), se observa que, en todos los casos, la variación de longitud máxima fue de 1,10mm máximo, el ancho fue de 0,71mm y espesor el valor máximo fue de 1,44mm, esto indica que los elementos cumplen con las tolerancias que permite la NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos.

Del análisis estadístico realizado con los prototipos ensayados en laboratorio, se observa que presentan en las propiedades estudiadas se evidencia diferencias significativas, esto indica que los grupos con otros porcentajes de PEAD reciclado presentan un comportamiento completamente diferente entre los diferentes grupos. En todos los casos se estudió el comportamiento a través de pruebas no paramétricas en los que se tiene en cuenta la mediana de los diferentes conjuntos como partida para el análisis con un nivel de certeza del 95%.

16. CONCLUSIONES

A partir del análisis de la información recolectada de las diferentes empresas dedicadas a la producción de adoquines se puede establecer que no existe en el mercado alguna alternativa de estos elementos que empleen materiales reciclados o similares que disminuya el uso de los materiales pétreos.

Los resultados presentados por los adoquines con adición de PEAD en la resistencia a la flexotracción muestra que los elementos con un 4% y 6% cumplen con el valor mínimo exigido por la NTC 2017 Adoquines de concreto para pavimentos. Sin embargo, a su vez su porcentaje de absorción de agua es mayor al 7%, lo cual no cumple lo establecido en la sección 4.3 de la norma. Per, no se descarta aplicaciones sistema de pavimentación que pueda ser empleados en zonas de recarga de acuíferos donde se necesite una solución de movilidad y que requiera captar mayor cantidad de agua para no saturar sistemas de evacuación de aguas lluvias.

Se concluye también que el aumento del costo por unidad producida con los prototipos del 4% y del 6% del PEAD puede no incentivar opción a los productores de adoquines debido al aumento del costo de producción. Sin embargo, los diferentes beneficios ambientales por la disminución de agregados, la generación de empleos indirectos y realizar la gestión para obtener un certificado ambiental, debido a que el 25% y 50% del valor de los adoquines modificados es debido a la inclusión el material reciclado. También como

beneficio adicional está el menor peso del producto, lo cual significa que se pueden transportar más elementos por viaje, y beneficio para el personal que realiza el transporte e instalación final de los adoquines, al trabajar con un elemento con menor peso.

A pesar de los ensayos no favorecen los resultados del grupo A (2% PEAD en cisco), debido a que al comparar los resultados no cumplen con el requerido por la NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos, es necesario realizar más ensayos en laboratorio antes de descartar completamente este prototipo.

17. RECOMENDACIONES

En el proceso de fabricación de los adoquines con adición de PEAD, es importante tener en cuenta los equipos empleados para el correcto mezclado y homogenizado de la mezcla, ya que, sin los mencionados anteriormente se puede presentar acumulación de material sin mezclar y esto último puede afectar negativamente el desempeño de los adoquines a futuro. Adicional se debe asegurar que el PEAD reciclado no se encuentre suciedad u otros elementos que puedan afectar el proceso de mezclado, fabricación de mismo.

Es pertinente realizar en estudios posteriores ensayos de prueba de desgastes de la cara superficial del adoquín, debido a las limitaciones presentadas actualmente (pandemia) no ha sido posible realizar estos ensayos.

Es propicio realizar a futuro más ensayos y pruebas en campo sobre el comportamiento físico, químico y mecánico de los prototipos de adoquines, así como elaborar el prototipo con el porcentaje ideal de PEAD como resultado del proceso estadístico.

Se recomienda realizar a futuro los adoquines con adición de PEAD empleando el mezclado húmedo, para corroborar si el proceso de fabricación de este influye en la cantidad de vacíos presentados frente al mezclado en seco.

También se recomienda emplear otros métodos estadísticos para determinar el porcentaje de PEAD ideal a reemplazar en la mezcla con el fin de lograr el mejor desempeño posible, que cumpla con la NTC 2017, ofrezca el menor uso de arena y proporcione el mejor precio de fabricación. Para ello se requieren realizar mayor cantidad de elementos a probar y ensayar.

Realizar un análisis en el que se compare la cantidad de adoquines modificados por viaje vs el adoquín convencional y el aumento de rendimiento del personal en labores de armado

de los guacales que se emplean para el transporte de estos y el gasto combustible por kilómetro de los vehículos empleados para la distribución; con el fin de cuantificar los beneficios al emplear adoquines modificados.

18. BIBLIOGRAFÍA

- ACOPLASTICOS. Campaña dale vida al plástico. (2018). Recuperado 12 de marzo de 2019, de <http://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-noti/181-ns-180206>
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). Polibromobifenilos (Polybrominated Biphenyls). ATSDR. (2016). Recuperado 23 de marzo de 2019, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts68.html
- Alcantara, D. (2019). Los niveles TRLs en Horizon 2020 | Financiación e investigación. Recuperado 18 de septiembre de 2019, de <https://financiacioneinvestigacion.com/blog/los-niveles-trls-en-horizon-2020/>
- Ashby, M. F. (2008). Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Reverte.
- Bedoya, C. (2011). construcción sostenible para volver al camino. Mares consultoría sostenible, 160. Recuperado 17 de noviembre de 2020. http://www.bdigital.unal.edu.co/3738/1/CONSTRUCCI%C3%93N_SOSTENIBLE_2011.pdf
- Benavides P. (2018) Estudio del comportamiento termomecánico de compuestos de Polietileno de Alta Densidad (HDPE) reciclado y ceniza de cáscara de arroz (CCA). Universidad Nacional de San Agustín. Perú (2018). Recuperado de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/207/194>
- Caicedo Quinayás. (2016). Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento portland. Recuperado 12 de febrero de 2019, de <http://vitela.javerianacali.edu.co/handle/11522/8072?locale-attribute=en>
- Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL). (2019). EDGE, La transformación hacia la construcción sostenible en Colombia. Camacol. Recuperado 1 de junio de 2019 <https://camacol.co/prensa/noticias/edge-la-trasformaci%C3%B3n-hacia-la-construcci%C3%B3n-sostenible-en-colombia>.
- Calderón, J. M. S., Trujillo, Ó. A. N., Flórez, G. A. R., Santamaría, M. C., Echeverri, L. C. V., y Uribe, A. G. (2018). Consejo Nacional De Política Económica Y Social CONPES 3919. 98.
- Casado Martínez, N (1996) Edificios de alta calidad ambiental (Ibérica, Alta Tecnología ISSN 0211-0776)
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS). Programa LEED® en Colombia. (2018). Recuperado 23 de junio de 2020 <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>
- Consejo Nacional de Política económica y social CONPES. CONPES 3919. (2018). Recuperado 14 de agosto de 2021, de <https://www.cccs.org.co/wp/download/1-documento-conpes-3919-pdf/?wpdm=16063&refresh=6117df9e5f42a1628954526>

- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS). (2017). DECRETO 1203 DE 2017. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://www.cccs.org.co/wp/download/3-mvct-decreto-1203-de-2017/>
- Cepeda, H., y Beatríz, Y. (2018). Pavimentos de adoquines de concreto una solución ambiental en la construcción de infraestructura vial colombiana. Instituto Colombiano de Productores de Cemento, Ministerio de Transporte y Instituto Nacional de Vías, Manual de Diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito, Bogotá y Medellín, Colombia: Instituto Colombiano De Productores De Cemento. Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17882>
- CONSTRUYORED. (2017). Aplicación y ventajas de la aplicación de adoquines de concreto. Construyored. Recuperado 6 de diciembre de 2020 <https://construyored.com/noticias/1555-aplicacion-y-ventajas-de-la-aplicacion-de-adoquines-de-concreto>
- Cruz Estrada, R. H., Fuentes Carrillo, P., Martínez Domínguez, O., Canché Escamilla, G., & García Gómez, C. (2006). Obtención de materiales compuestos a base de desechos vegetales y polietileno de alta densidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 5(1), 29–34. Recuperado 14 agosto 2021 de <http://www.redalyc.org/html/620/62009906/>
- Da Silva, A. M., de Brito, J., y Veiga, R. (2014). Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars. *Construction and Building Materials*, 71, 226-236. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>
- Dávila, R. (2002). Las cooperativas en Colombia: innovación organizacional y novedad académica. *Cuadernos de Desarrollo Rural* (48), 99-118.
- Decreto 0838 del 23 de marzo de 2005. (2005) Diario Oficial 45.862 de marzo 28 de 2005, Bogotá D.C, Colombia, 23 de marzo de 2005. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadYServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_0838_230305.pdf
- Decreto 1077 de 2015. Presidencia de la República de Colombia, Bogotá D.C, Colombia. (2015). Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://www.habitatbogota.gov.co/decreto-1077-2005>
- Decreto 1285 del 12 de junio de 2015. Ministerio de defensa Nacional de La República de Colombia, Bogotá D.C, Colombia. (2015) 12 de junio de 2015. Recuperado de <http://wp.presidencia.gov.co/sitios/normativa/decretos/2015/Decretos2015/DECRETO%201285%20DEL%2012%20DE%20JUNIO%20DE%202015.pdf>
- Decreto 1310 de 2012. (2012). Presidencia de la República de Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 14 de junio de 2012. Recuperado de <http://www.minvivienda.gov.co/Decretos%20Vivienda/1310%20-%202012.pdf>
- Decreto 1713 del 06 agosto de 2002. (2002). Diario Oficial, Bogotá D.C, Colombia, 06 de agosto de 2002. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadYServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Decretos/dec_1713_060802.pdf
- Decreto 2198 del 26 de diciembre de 2017. (2017). Presidencia de la República de Colombia, Bogotá D.C, Colombia, 26 de diciembre de 2017. Recuperado de

<http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/DECRETO%202198%20DEL%2026%20DE%20DICIEMBRE%20DE%202017.pdf>

Decreto 2981 de 2013. (2013). Diario Oficial, Bogotá D.C, Colombia, 20 de diciembre de 2013. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <http://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?id=1505864>

Decreto 3695 de 2009. (2009). Publicado en el Diario Oficial 47.483 de septiembre 25 de 2009, Bogotá D.C, Colombia, 25 de septiembre de 2009. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <http://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=37494>

Departamento Nacional de Desarrollo (DNP). (2010). Plan Nacional De 2010 - 2014. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://www.dnp.gov.co/Plan-Nacional-de-Desarrollo/PND-2010-2014/Paginas/Plan-Nacional-De-2010-2014.aspx>

Departamento Nacional de Desarrollo (DNP). (2014). Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018 Todos por un nuevo país.pdf. Recuperado de <https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control-gestion/Gestin/Plan%20de%20Acci%C3%B3n/PLAN%20NACIONAL%20DE%20DESARROLLO%202014%20-%202018%20TODOS%20POR%20UN%20NUEVO%20PAIS.pdf>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2019). Política para la Gestión de la Red Terciaria: presupuesto informado por resultados. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Presentaciones/RED%20TERCIARIA%20CCI%20-%20DNP.pdf>

Díaz Varela. (2017). Formulación de modelo de gestión ambiental para el manejo de los residuos de construcción y demolición del distrito turístico cultural e histórico de santa marta, aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida.

División de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas. (2016). Recuperado 12 de marzo de 2019, de <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/index.htm>

El Espectador. Santa Marta busca ser la primera ciudad libre de plástico en Colombia. (2018). Recuperado 12 de marzo de 2019, de ELESPECTADOR.COM website: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/santa-marta-busca-ser-la-primera-ciudad-libre-de-plastico-en-colombia-articulo-819489>

El Tiempo. (2018). En Colombia, la banca apoya la construcción sostenible. Recuperado 16 de enero de 2021 (<https://www.eltiempo.com/economia/sectores/en-colombia-la-banca-apoya-la-construccion-sostenible-302804>).

El Tiempo. (1995). El adoquín: alternativa para la pavimentación. Recuperado 3 de marzo de 2019, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-487529>

Empresa de Servicios Públicos del Distrito de Santa Marta (ESPA). (2014). Plan De Gestión Integral De Los Residuos Sólidos Del Distrito De Santa Marta Volumen II: Diagnóstico Integral PGIRS. Santa Marta D.T.H.C.

Fernández Limón. (2011). ¿Qué significa PET? Recuperado 22 de febrero de 2019, de http://horno3.ensi.com.mx/apps/newsletter/idem.php?module=Newsletter&action=ReadNewsletter&newsletter_id=4359

- Franco, M. L., Varela, C. T. de, y Espinoza, J. C. T. (2018). Propuesta metodológica para paneles prefabricados de bajo costo con desechos y escombros de construcción con Poliestireno expandido. *Opuntia brava*, 10(4), 279-290.
- Gaggino. (2007). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados aptos para la autoconstrucción | Gaggino | Revista INVI. Recuperado 10 de febrero de 2019, de <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/446/955>
- Gardey, P. P. (2013). Definición de plástico. Recuperado 22 de febrero de 2019, de <https://definicion.de/plastico/>
- Gardey, P. P. (2018). Definición de geotecnia. Recuperado 22 de febrero de 2019, de <https://definicion.de/geotecnia/>
- Garraín, Daniel, Rosario Vidal, Vicente Franco, y Pilar Martínez. (2008). Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad. recuperado 18 de noviembre de 2019, de <https://core.ac.uk/download/pdf/61397553.pdf>
- Gómez, L. C., & Montoya, L. M. S. (2011). Aprovechamiento de llantas usadas para la fabricación de pisos decorativos. 79. Recuperado 21 de febrero de 2019, de <https://repository.udem.edu.co/bitstream/handle/11407/375/Aprovechamiento%20de%20llantas%20usadas%20para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20pisos%20decorativos.pdf?sequence=1>
- Gómez, M. S., Carvajal, A. M., y Santelices, V. (2011). Influencia del Polietileno de Alta Densidad (PEAD) usado como adición en el mortero de cemento. *Revista de la construcción*, 10(3), 110-121. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2011000300011>
- Greenpeace. Parafinas cloradas de cadena corta (PCCCS). (2003). Recuperado de <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/other/parafinas-cloradas-de-cadena-c.pdf>
- Grupo Bancolombia. (2021). Crédito Constructor Sostenible Leasing. Recuperado 16 de enero de 2021 <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/acerca-de/informacion-corporativa/sostenibilidad/negocios-sostenibles/soluciones-servicios/credito-constructor-sostenible-leasing>
- Hernández Guerrero. (2015). Aprovechan plástico de desecho en concretos arquitectónicos. Recuperado 12 de febrero de 2019, de http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_635.html
- Ishihara Shigeo. Cobble stone utilizing waste plastic, its production or utilization thereof. Patentscope, Patent N.o: JP11209508. (2017). Recuperado 16 de agosto de 2019, de https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=JP66056271&_cid=P12-JZEY5K-43228-1
- Kasture, M. (2017) Process For Construction Of Artificial Roads, Walk Ways, Footpaths, Etc. From Waste Plastic, Plastic Type Resins And Related Polymers. Patentscope, Patent N.o WO/2017/093822. (2017). Recuperado de https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2017093822&_cid=P22-JZLIHS-36622-6

- KEYSTONE RETAINING WALL SYSTEMS LLC. Building unit with cobble top. Número de patente: US20140260057. (2014). Recuperado 21 de agosto de 2019, de https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US107238138&_cid=P22-JZLIGY-36568-5
- Klausmann, Klaus. (2003). Cobble stones include reflective particles of glass, metal, plastic or minerals. Patentscope, Patent N.o: DE000020301977. (2003). Recuperado 21 de agosto de 2019, de https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=DE104051041&_cid=P22-JZLID5-35976-2
- Ley 0099 de 1993. (1993). Diario Oficial No. 41.146 de 22 de diciembre de 1993, Bogotá D.C, Colombia, 22 de diciembre de 1993. Recuperado 12 de marzo de 2019, de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html
- Ley 1259 de 2008. (2008). Diario Oficial No. 47.208 de 19 de diciembre de 2008, Bogotá D.C, Colombia, 19 de diciembre de 2008. Recuperado 12 de marzo de 2019, de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1259_2008.html
- Madrid, G. (1997). Ventajas y aplicaciones de los pavimentos de adoquines de concreto. Notas técnicas. DOCUMENTOS-IPC. Recuperado 6 de diciembre de 2020 (<https://trid.trb.org/view/961041>).
- Maldonado, A. T. (2012). La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá. 120.
- Manual de Oslo (2005). Guía para la recolección e interpretación de datos sobre innovación. Madrid, OECD y Eurostat.
- Matthew Adam. Tecnología del concreto. (1999) Segunda edición. ISBN 978-0-273-73219-8. México. 1999.
- Meza, B. C., y Lengua, O. (2016). Elaboración de bloques en cemento reutilizando el plástico polietileno-tereftalato (PET) como alternativa sostenible para la construcción. Universidad de Cartagena, (2016).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. A 2018 Colombia tendrá una tasa de reciclaje del 20% (s. f.). Recuperado 22 de septiembre de 2019, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2291-a-2018-colombia-tendra-una-tasa-de-reciclaje-del-20>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Reembólsale al Planeta: Por el uso responsable de las bolsas (s. f.). Recuperado 5 de octubre de 2019, de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2266-reembolsale-al-planeta-por-el-uso-responsable-de-las-bolsas>
- Montero-Cordero, A. (2018). ¿Plástico en el mar? tiramos nuestro esfuerzo por la borda? Revista de Biología Tropical, Blog-Blog.
- Organización de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU medio ambiente). (2017). Informe sobre el estado de las prohibiciones del poliespuma y de las bolsas de plástico en la región del gran caribe. Recuperado 12 de agosto de 2020

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33273/WG.39_INF.8-es.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Organización de Naciones Unidas (ONU). (2018). Recuperado 14 de enero de 2021 Plásticos de un solo uso. ISBN:978-92-807-3705-9
<https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/1239/plasticosdeunsolouso.pdf;jsessionid=1E29EA28855EDB667B9ED5206D4ABEF6?sequence=1>

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2014) Evaluaciones del desempeño ambiental: Colombia. ISBN 978-92-64-20829-2. Recuperado 26 de febrero de 2019, de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36663/1/lcl3768_es.pdf

Pallone, F. (2015). Text - H.R.1321 - 114th Congress (2015-2016): Microbead-Free Waters Act of 2015. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/1321/text>

Pacasmayo. (2010). Adoquines de concreto. Perú. Recuperado 20 de septiembre del 2020, de <http://www.cementospacasmayo.com.pe/productos-y-servicios/prefabricados/adoquines>

Pérez Porto, G. (2010). Definición de reciclaje. Recuperado 22 de febrero de 2019, de <https://definicion.de/reciclaje/>

Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos. (2015). Recuperado 17 de enero de 2019, de http://www.uaesp.gov.co/uaesp_jo/images/direccion/PGIRS_FINAL_18-12-2015.pdf

Del Pozo, A. C. D. (2012). Estudio de hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla. 108.

RAE. (2018). Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario. Recuperado 23 de febrero de 2019, de «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario website: <http://dle.rae.es/>

Real Academia de Ingeniería. (2019). Flexotracción Recuperado 2 de abril de 2019, de <http://diccionario.raing.es/es/lema/flexotracci%C3%B3n>

Requejo R. (2017). Pavimento articulado. Ingeniería. Recuperado 13 de octubre de 2019 de <https://es.slideshare.net/ricardorequejocarrillo/pavimento-articulado>

Resolución 0541 de 1994. Ministerio Del Medio Ambiente, Santafé de Bogotá, Colombia 14 de diciembre de 1194 (1994). Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Normativa/Resoluciones/res_0541_141294.pdf

Resolución 1555 de 2005. (2005). Ministerios de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial y de Comercio Industria y Turismo, Bogotá, Colombia, 20 de octubre de 2005. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Sello_ambiental_colombiano/Resoluci%C3%B3n_1555_de_2005_de_los_Ministerios_de_Ambiente_Vivienda_y_Development_territorial_y_de_Comercio_Industria_y_Turismo.pdf

- Resolución 668 de 2016. (2016). Ministerio Del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Bogotá, Colombia, 28 de abril de 2016. Recuperado 12 de marzo de 2019, de <https://www.ambienteysociedad.org.co/es/resolucion-668-de-2016-que-regula-el-uso-de-bolsas-plasticas-en-colombia/>
- Rivera L. Capítulo 2. Agregado para mortero o concreto. (2019). Recuperado 23 de febrero de 2019, de ftp://ftp.unicauca.edu.co/Documentos_Publicos/Facultades/FIC/IngCivil/Geotecnia/profesor_gerardo_rivera/FIC%20y%20GEOTEC%20SEM%20%20de%202009/Tecnolog%EDa%20del%20Concreto%20-%20%20PDF%20ver.%20%202009/Cap.%2002%20-%20Agregados%20para%20mortero%20y%20concreto.pdf
- Rivera L. Capítulo 8. Dosificación de mezclas de concreto. (2019). Recuperado 3 de marzo de 2019, de <https://docplayer.es/9734905-Capitulo-8-dosificacion-de-mezclas-de-concreto.html>
- Rondón, H., Rodríguez, E., y Moreno, L. (2007). RESISTENCIA MECÁNICA EVALUADA EN EL ENSAYO MARSHALL DE MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE ELABORADAS CON ASFALTOS MODIFICADOS CON DESECHOS DE POLICLORURO DE VINILO (PVC), POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD) Y POLIESTIRENO (PS). Revista Ingenierías Universidad de Medellín. Recuperado 18 de noviembre de 2019, de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/207/194>
- Roymaplast. (2015). Propiedades del Polietileno de Alta Densidad Reciclado | Manipulación de plásticos especiales. Recuperado 18 de diciembre de 2020 (<http://roymaplast.com/propiedades-del-polietileno-de-alta-densidad-reciclado/>).
- Santiago Miguel, G.-G., Contreras-Santos, S.-C., y Hernández-Alcántara. (2015). Diseño y elaboración de adoquines de PET reciclado. Recuperado 12 de febrero de 2019, de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/66911>
- Sanchez D. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Quinta edición, ISBN 958-9247-04-0, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Sepúlveda, I. A. G. (2016). Recopilación sobre políticas legales y reglamentarias para la construcción sostenible en Colombia. 97.
- Schumpeter, Joseph (1997). La teoría del desenvolvimiento económico. México DF: Fondo de Cultura Económica.
- Silvestre Gutiérrez. (2016). Análisis del concreto con nylon como aditivo para aligerar elementos estructurales. Recuperado 25 febrero 2019, de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17016/ANALISIS%20DEL%20CONCRETO.pdf?sequence=1>
- Silvestre Gutiérrez. (2017). Análisis del concreto con polietileno de densidad media como aditivo para aligerar elementos estructurales. Recuperado 5 de febrero de 2019, de <http://repositorio.unilibrepereira.edu.co:8080/pereira/bitstream/handle/123456789/878/ANALISIS%20DEL%20CONCRETO%20CON%20POLIETILENO.pdf?sequence=1>
- Torres. (2014). Valoración de propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionado con residuos de llantas de caucho | Biblioteca Digital. Recuperado 10 de febrero de 2019, de <https://repositorio.escolaing.edu.co/handle/001/169>

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2011). The Honolulu Strategy. Recuperado de https://marinedebris.noaa.gov/sites/default/files/publications-files/Honolulu_Strategy.pdf
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). BeatPlasticPollution This World Environment Day. Recuperado 10 de marzo de 2019, de <https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/es/>
- Valencia G. (2010). Construcción de pozas con Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad con propósitos de impermeabilización en el desarrollo de proyectos de ingeniería. Universidad de Magallanes. Punta Arenas. Chile. Recuperado 19 de noviembre de 2019, de <http://www.umag.cl/biblioteca/tesis/2010.pdf>.
- Yu Shanfeng. (2007). Artificial cobble and manufacturing method thereof. Patentscope, Patent N.o: CN101085839. (2007), Recuperado 21 de agosto de 2019 de https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2017093822&_cid=P22-JZLIHS-36622-6
- Zikmund, W. G., & Babin, B. J. (2007). Exploring marketing research (9th ed). Mason, OH: Thomson/South-Western.