

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ADOQUINES CON ADICIÓN DE PLÁSTICO RECICLADO PARA PAVIMENTO ARTICULADO VEHICULAR

EVALUATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF PAVERS WITH THE ADDITION OF RECYCLED PLASTIC FOR VEHICULAR ARTICULATED PAVEMENT.

Cuevas Becerra, Natalia Ximena¹; Manrique Espíndola, Ramón de Jesús².

¹Universidad Antonio Nariño, Colombia, ncuevas58@uan.edu.co

²Universidad Antonio Nariño, Colombia, rmanrique14@uan.edu.co

RESUMEN

La adición de materiales reciclados como alternativa para mejorar el comportamiento mecánico de productos para la construcción de obras civiles se ha convertido en una investigación permanente, ya sea para aligerar estos o para mejorar su resistencia. En esta investigación se utiliza adiciones de neumático triturado reciclado malla 30 (M 30 - 0.6mm), malla 25 (M 25 - 1.0 mm), malla 10 (M 10 - 2.0 mm) y malla 5 (M 5 - 4.0 mm), también se usan adiciones de polietileno de alta densidad en presentación del plástico reciclado, dando cumplimiento a los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible).

Para ello se planteó un paso a paso, recopilando información esencial investigativa a nivel nacional e internacional relacionado con adiciones de los mismos, normativas y cumplimientos técnicos y de calidad, se hace caracterización de materiales bajo normas vigente como la NTC 2017 y se propone dosificación según metodología ACI 211.1, estableciendo parámetros mínimos de cumplimientos para concretos con resistencia de 21 MPa, como en este caso para adoquines de pavimentos articulado vehicular, de tal manera que cumpla con el tiempo de fraguado y los elementos elaborados obtengan la resistencia de diseño, para ser fallados a compresión; luego hacer la comparación con adoquines que sin adiciones y determinar si cumple con las condiciones técnicas y de calidad para ser un producto competitivo como nueva alternativa para la construcción o mejoramiento de vías con dificultad de ingreso o tránsito de tráfico liviano y pesado.

Palabras claves: Pavimento articulado, polietileno de alta densidad, neumático, adoquín.

ABSTRACT

The addition of recycled materials as an alternative to improve the mechanical behavior of products for the construction of civil works has become a permanent research, either to lighten them or to improve their resistance. In this research, additions of recycled shredded tire mesh 30 (M 30 - 0.6mm), mesh 25 (M 25 - 1.0 mm), mesh 10 (M 10 - 2.0 mm) and mesh 5 (M 5 - 4.0 mm) are used, also additions of high density polyethylene are used in presentation of recycled plastic, complying with the SDGs (Sustainable Development Goals).

For this purpose, a step-by-step approach was proposed, gathering essential research information at national and international level related to additions of the same, regulations and technical and quality compliance, characterization of materials was made under current standards such as NTC 2017 and dosage is proposed according to ACI 211 methodology. 1, establishing minimum compliance parameters for concrete with a resistance of 21 MPa, as in this case for paving blocks for vehicular articulated pavements, in such a way that it complies with the setting time and the elaborated elements obtain the design resistance, to be failed in compression; then make the comparison with paving blocks without additions and determine if it complies with the technical and quality conditions to be a competitive product as a new alternative for the construction or improvement of roads with difficulty of entry or transit of light and heavy traffic.

Key words: articulated pavement, high density polyethylene, pneumatic tire, pavers.

INTRODUCCIÓN

Buscando nuevas formas de construcción sostenible pavimento articulado vehicular, se retoma la condición ambiental en la que se vive actualmente y la búsqueda de soluciones para que la construcción tradicional sea menos contaminante o deje de serlo, se propone una de las principales alternativas como solución haciendo que los desechos industriales se conviertan en aditivos para el mejoramiento de concretos y/o elementos de construcción hechos a base de concreto.

Como búsqueda principal de ser amigables con el medio ambiente se establecen parámetros que se adapten a las condiciones de ahorro de recursos naturales, haciendo que el impacto ambiental se reduzca en proporciones considerables, en el ámbito de la construcción y el desarrollo de las obras civiles, en este caso el desarrollo y avance en las vías de segundo y tercer nivel, no solo buscando una alternativa para el reemplazo de la placa huella por la reducción en la producción de cemento gris, sino también, un método constructivo para vías más liviano. Como segunda estancia está el aumento del desarrollo económico y agropecuario de la zona permitiendo el paso a vehículos de alto cilindraje o de carga, haciendo que el paso para cultivos y ganado sea más rápido y eficiente.

Por tal razón se hace la evaluación del comportamiento mecánico considerando la resistencia a compresión simple y a la flexotracción de los adoquines para pavimento articulado, dando como propuesta innovadora la adición de materiales reciclados como polietileno de alta densidad y neumático triturado, buscando mejoras en la resistencia y densidad de dichos elementos. Este proceso también busca dar un enfoque más preciso de una adecuada gestión y reutilización de desechos industriales que generan emisiones de CO₂ altamente contaminantes, si se busca la reutilización de los mismos estas cumplirían con la reducción de la contaminación y todos los daños adicionales que se causan.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Notando que con el paso de los años los problemas en las vías han evolucionado de ser poco relevantes a graves y catastróficas, sin tener una política de mantenimiento permanente o al menos favorable, se busca que los materiales que suelen ser desechos industriales tengan una segunda vida útil, por otra parte, la acumulación de materiales que podrían ser reutilizados siguen a la espera de su investigación, esto con el fin de minimizar el impacto ambiental por ser desechos. Estos desechos industriales entran en el cumplimiento de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible) donde se establece que para el año 2030 al menos el 8% de emisiones de CO₂ (Dióxido de carbono) (ONU, sf) será eliminado para mejorar la calidad del aire y la calidad de vida, reutilizando el polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE) y el neumático. Sin embargo, la búsqueda de materiales innovadores para el reemplazo de algunos agregados como composición de los productos de construcción para la obra civil y de vivienda siguen siendo material de investigación, la búsqueda de estos complementos se hace para mejorar o para cambiar su efecto de resistencia y vida útil.

Una de las principales razones de adelantar el proyecto es buscar un nuevo método de construcción sostenible para vías con características de diseño particulares y que presenten especificaciones que dificultan el tránsito vehicular, ya sea por las fuertes pendientes, el material de la superficie como afirmado, o espacio reducido para tráfico pesado, no obstante, se requiere aumentar el desarrollo económico y social de población y de manera especial la rural en la ciudad de Duitama como principal objetivo poblacional, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que el adoquín se pueda utilizar de manera segura en construcciones privadas. ¿La elaboración y evaluación mecánica de adoquines con el empleo de materiales reciclados como el PEAD y el caucho permitirán presentar una alternativa nueva que posibilite el reúso de materiales para pavimentos articulados?

ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta los diferentes retos que representa para los ingenieros viales mundialmente el mantenimiento de las vías, el pavimento articulado con adoquines en concreto representa una solución

para el mismo, buscando alternativas prácticas, con mayor vida útil, estéticos y que aporten seguridad para los agentes de tránsito que ocupen las vías (Dayana de la Caridad Fuentes Alpizar, 2022). Los criterios de empleo para el hormigón van ligados a las diferentes pruebas de resistencias con resistencia media y desviación estándar las cuales se establecen para los adoquines que se realicen con concreto hidráulico, actualmente el enfoque de calidad cobra sentido y se exige, dando productos con estándares técnicos y de alta calidad, junto con ello se habla de la adición de materiales reciclados o desechos industriales como los residuos de construcción y demolición (RCD) con porcentajes áridos reciclados (25% y 50% respectivamente) buscando economía circular y mejoramiento ambiental (David, 2017).

La realización de diferentes mezclas asfálticas ha determinado ventajas y desventajas en la adición de materiales reciclados al asfalto convencionalmente utilizado en el país de Chile. (Arroyo, 2018), se ha hecho Investigación hecha en el Amazonas determinando los efectos producidos en la mezcla asfáltica en caliente para mejor ar su comportamiento, generando 9 mezclas diferentes en total. (Fernandez, 2019), La modificación en las mezclas asfálticas con polvo de caucho o neumático reciclado, teniendo en cuenta procesos secos y húmedos, siendo una adición en los componentes asfálticos usados habitualmente presentando resultados suficientemente buenos para lograr un buen comportamiento. (Salomé Galeas, 2015) las investigaciones con adiciones recicladas siguen siendo más grandes como Determinación de comportamiento mecánico de pavimento flexible con adición de neumático siendo parte constitutiva por la mezcla asfáltica tradicional (Carlos Santos, 2020) ò recopilación informativa de investigación desde 2015 a 2021 buscando el desarrollo óptimo del asfalto con adición de materiales reciclados ayudando al medio ambiente y mejorando la mezcla asfáltica. (Jorge Bobadilla, 2021).

En cuanto al rendimiento y la identificación en la eficiencia drenante de las capas granulares en la construcción de pavimentos permeables, teniendo en cuenta las problemáticas en la capa de rodadura, determinado y evaluando el tamaño de las partículas (Garzón, 2021) has sido buenos y con garantías de vida útil más prolongadas, sin embargo, la identificación de fallas ha sido a nivel internacional como la investigación realizada en el país de Perú, evaluando fallas y causas de los pavimentos a base de adoquines en vías urbanas. (Castillo, 2017) luego también se determinó de factores que intervienen en el fallamiento de los pavimentos articulados en el país de Perú haciendo evaluación de suelos y penetración en los mismos (Medalith, 2018)

Se ha hablado de los pavimentos de hormigón armado, dando una nueva iniciativa a los estudios de ingeniería para carreteras, buscando analizar las condiciones que producen tensiones en el pavimento realizando cálculos y una serie de operaciones para desarrollar antecedentes teóricos de su análisis estructural y su alto costo en la construcción del mismo con su baja tracción, buscando nuevas alternativas que mejoren las propiedades mecánicas del mismo (Shreyas Pranav a, 2022). El conocimiento para el pavimento de hormigón ha ido creciendo de tal manera que las adiciones para mejorarlo en condiciones de permeabilidad se convierte en una razón principal para los beneficios ambientales y la vida útil, es difícil optimizar simultáneamente el rendimiento y la durabilidad de la infiltración de la PCP (pavimento de hormigón permeable) causando cuello de botella tipo efecto de obstrucción, sin embargo, las tecnologías permiten actualmente para cumplir con los requisitos de las normas dando una visión futurista a la nanociencia y la nano ingeniería. (Ning Xie a b, 2019).

Durante años, el sector industrial ha generado residuos industriales con cenizas volantes, cenizas de carbón y constantes emisiones de dióxido de carbono, causando daños a la salud de los seres vivos y contaminación del suelo, aire y agua. Se buscó una nueva alternativa para sustituir el hormigón puzolánico con los residuos mencionados, revisando los requisitos que deben cumplirse para el hormigón geopolímero, dando buenos resultados al sustituir hasta el 50% de las áridas vírgenes, enriqueciendo la mezcla con sodio. (Singh, 2022). Por otro lado, se continúa trabajando en cálculos que permitan predecir diversos tipos de daños en los pavimentos de concreto durante su vida útil, obteniendo resultados cuantitativos y cualitativos y teniendo una evaluación de las desviaciones en la calidad de su construcción, buscando que al tener estas alertas a tiempo la mano de obra sea inmediata y más económica, dando soluciones rápidas sin causar problemas de movilidad. (AA Fotiadi, 2020)

MARCOS REFERENCIAS

- a. Calidad de vida: Posicionamiento de una persona para lograr obtener una vida digna con sustento básico para poder vivir, es decir, tener que beber, comer y donde refugiarse o vivir. (Verdugo y Gómez, 2013)
- b. Dióxido de carbono: Gas químico vaporizado generado por la producción de procesos industriales netamente tóxicos, ya sea por manejo de aceites en caso de los automóviles o producción de cemento en el caso de las concreteteras. (Martínez, s.f.)
- c. Fatiga: exceso repetitivo de cargas de tránsito. (Boada Marcano & Reyes Lizcano, 2012.)
- d. Método PCA: método estadístico que permite simplificar la complejidad de espacios muestrales con muchas dimensiones a la vez que conserva su información. (Rodrigo, 2017)
- e. Neumático: Caucho del alto calibre utilizado para el rodamiento de ejes vehiculares para diferentes terrenos ya sea de tráfico pesado o para vehículos particulares, andando por carreteras de pavimentos flexible, rígido o articulado, también vías únicamente con afirmado. (Hernández, 2019)
- f. Pavimentos Módulo de Rotura (MR): Es un concreto diseñado especialmente para resistir esfuerzos a flexotracción, impuestos por el paso de vehículos en las estructuras de pavimento. (CEMEX, s.f.)
- g. Polietileno de alta densidad (PEAD o HDPE): es un polímero termoplástico producido a partir del monómero etileno. A veces se le llama "alcateno" o "polietileno" cuando se usa para tuberías de HDPE.12 Con una alta relación resistencia-densidad, el HDPE se utiliza en la producción de botellas de plástico, tuberías resistentes a la corrosión, geomembranas y madera plástica. (Wikipedia, s.f)
- h. Vía de circulación pública: Vías por donde pueden transitar vehículos, ciclas, peatones y demás entes relacionados con el transito que pueda estar implicado en las calles o carreras de una ciudad o país. (Hernández, 2019)

MARCO LEGAL

- a. Artículo 189. Constitución política: Corresponde al presidente de la República como Jefe de Estado, Jefe del Gobierno y Suprema Autoridad Administrativa para INVIAS. (Defensa jurídica, 1991)
- b. ASTM: Sociedad estadounidense para pruebas y materiales (astm, 1996 - 2013)
- c. Decreto 2618 de 2013: Por el cual se modifica la estructura del Instituto Nacional de Vías (Invías) y se determinan las funciones de sus dependencias. (Función pública , 2013)
- d. Ley 105 de 1993: disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la Nación y las Entidades Territoriales, se reglamenta la planeación en el sector transporte y se dictan otras disposiciones. (Función pública, 1993)
- e. Norma ACI: Instituto americano de concreto (ACI, 2023)
- f. Norma PCA: Análisis de componentes principales (Rodrigo J. A., 2017)
- g. Norma NPR: npr-20 normas generales de seguridad en los laboratorios de prácticas (Universidad de Santiago de Compostela, 2009)
- h. NTC 2017: Normativa establecida para determinar los estándares de producción y resistencias de adoquines y concreto, esto con el fin de definir correctamente el uso de los mismos para tráfico peatonal y vehicular determinado así mismo el tipo de neumático que debe ser utilizado según la necesidad. (ICONTEC, 2004)
- i. NSR 10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente es el reglamento colombiano encargado de regular las condiciones con las que deben contar las construcciones con el fin de que la respuesta estructural a un sismo sea favorable. (wikipedia, 2023)
- j. Prueba de laboratorio, INV - E 426: Resistencia de compresión a veintiocho días (28 d), mínimo (MPa) (INVIAS, 2012)
- k. Prueba de laboratorio, INV - E 213: Granulometría (INVIAS, 2012)

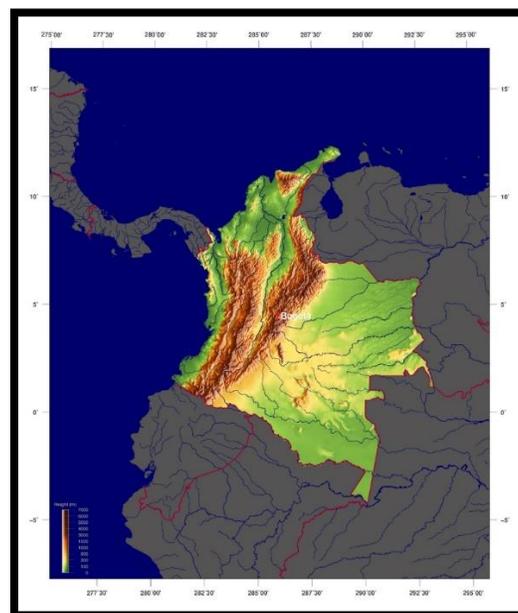
- l. Prueba de laboratorio, INV - E 218: Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%): 500 revoluciones y 100 revoluciones. (INVIAS, 2012)
- m. Prueba de laboratorio, INV - E 227: Partículas fracturadas mecánicamente, mínimo (%). (INVIAS, 2012)
- n. Prueba de laboratorio, INV - E 240: Resistencia al rasgado (kPa) (INVIAS, 2012)
- o. Prueba de laboratorio, INV - E 125: Limite líquido. (INVIAS, 2012)
- p. Prueba de laboratorio, INV - E 126: Limite plástico. (INVIAS, 2012)
- q. Prueba de laboratorio, INV - E 222: Densidad nominal (INVIAS, 2012)
- r. Prueba de laboratorio, INV - E 223: Densidad aparente (INVIAS, 2012)
- s. Prueba de laboratorio, INV - E 214: Tamizaje (INVIAS, 2012)
- t. Política de sostenibilidad para la infraestructura de transporte del instituto nacional de vías (invias): Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) establece la Política de Sostenibilidad para la Infraestructura de Transporte como una contribución a los cambios y retos que trae consigo el desarrollo sostenible en el país, bajo el entendido de que la infraestructura es una base fundamental para apoyar el crecimiento, la productividad y el bienestar de las comunidades. (Invias, 2022)

MARCO GEOGRÁFICO

a. Colombia: Colombia se encuentra ubicada en América, en el extremo noroccidental de América del Sur. El país es travesado por la cordillera de los Andes y la llanura amazónica, es el único país de América del Sur con costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico. Su ubicación latitudinal corresponde a $12^{\circ} 27' 46''$ norte y $4^{\circ} 13' 30''$ de latitud sur, lo cual corresponde a la zona intertropical. Su ubicación longitudinal se encuentra entre $66^{\circ} 50' 54''$ oeste y $70^{\circ} 01' 23''$ este de Greenwich. El área total de Colombia es de 2 129 748 km² conformados por el territorio continental y las aguas marítimas. El territorio continental de Colombia es de 1 141 748 km² y el marítimo de 988 000 km², de los cuales 658 000 km² están en el mar Caribe y 330 000 km² en el océano Pacífico donde se encuentran las islas de Gorgona y Malpelo. (Wikipedia, 2023)

Figura 1

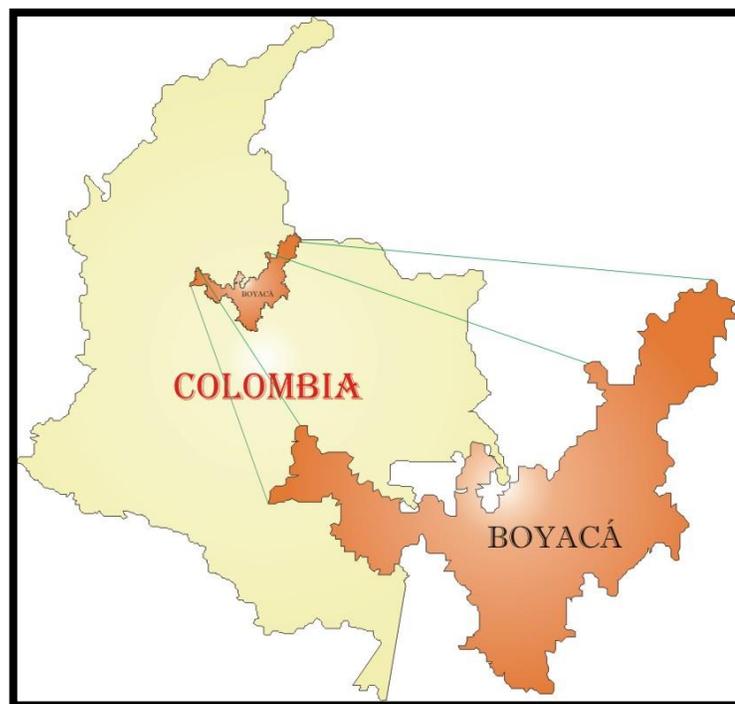
Mapa físico de Colombia ubicado en Suramérica



Nota: Tomado de Mapas del mundo. 2023.

b. Boyacá: En el territorio de Boyacá se presenta una diversidad de accidentes geográficos que forman las regiones fisionómicas del valle del río Magdalena, la cordillera Oriental, el Altiplano Cundiboyacense y el piedemonte de los llanos orientales. Gracias a ello, en el departamento se presentan todos los pisos térmicos con temperaturas desde los 35 °C en Puerto Boyacá, hasta temperatura bajo cero grados, en la Sierra Nevada de Güicán y El Cocuy, las cuales presentan alturas de hasta 5.490 m y en el Páramo de Pisba con alturas de hasta 4.000 m. En el centro del departamento hay un área hondonada bañada por el río Gacheneca conocida como el desierto de la Candelaria, ubicada siete kilómetros al nororiente de Ráquira y en la cual se destaca el monasterio agustino construido en 1604.26 Al occidente del departamento se ubica el Territorio Vásquez en el valle del Magdalena Medio que se caracteriza por presentar alturas inferiores a 500 m s. n. m. y por constituir una región rica en petróleo. (Wikipedia, 2023)

Figura2
Ubicación geográfica de Boyacá ubicado en Colombia.

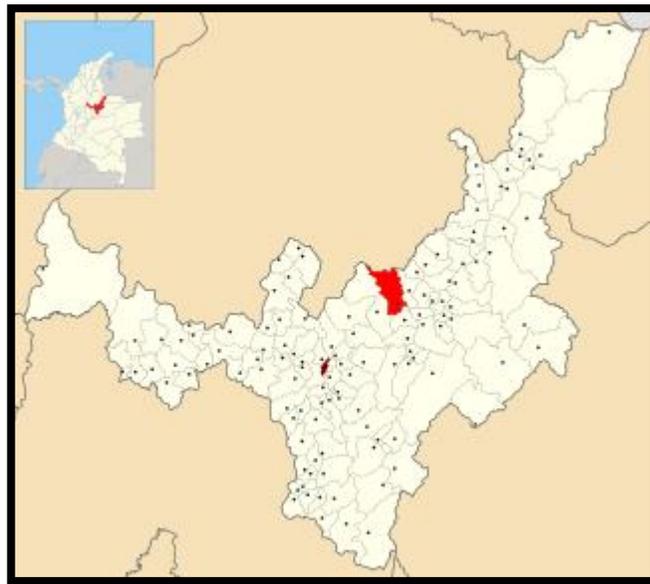


Nota: Tomado de Mapade.org. 2023

c. Duitama: La población del municipio de Duitama, a través del tiempo, ha tenido una evolución importante en su grado de urbanización: mientras que el censo del año 1985 reportaba que el 77% de la población residía en el área urbana, el censo del año 2005 reportó un 87% de la población residente en esta área, con una proyección para el año 2015 que asciende al 95%. El proceso de industrialización, el desarrollo económico en las ciudades y la búsqueda de mejores condiciones de vida, ha llevado a un importante crecimiento de los núcleos urbanos. Bajo esta dinámica, el sector salud debe estar preparado para enfrentar el impacto de la expansión urbana en el proceso de salud-enfermedad, teniendo en cuenta la relación existente entre la salud y el lugar en que se habita. La evolución de la ciudad, conlleva a problemas como

exposición a ruido, episodios altos de contaminación, disponibilidad restringida de agua potable y falta de espacios abiertos estas condiciones, pueden tener impactos negativos para la salud si no se cuenta con adecuados sistemas de planificación urbana y de gestión de medidas sanitarias a nivel municipal. (Wikipedia, 2023)

Figura 3
Ubicación geográfica de Duitama ubicado en Boyacá.



Nota: Tomado de Wikipedia. 2023

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico de adoquines elaborados en concreto hidráulico con adición de materiales reciclados como plástico y/o neumático, para su posible uso en pavimento articulado vehicular.

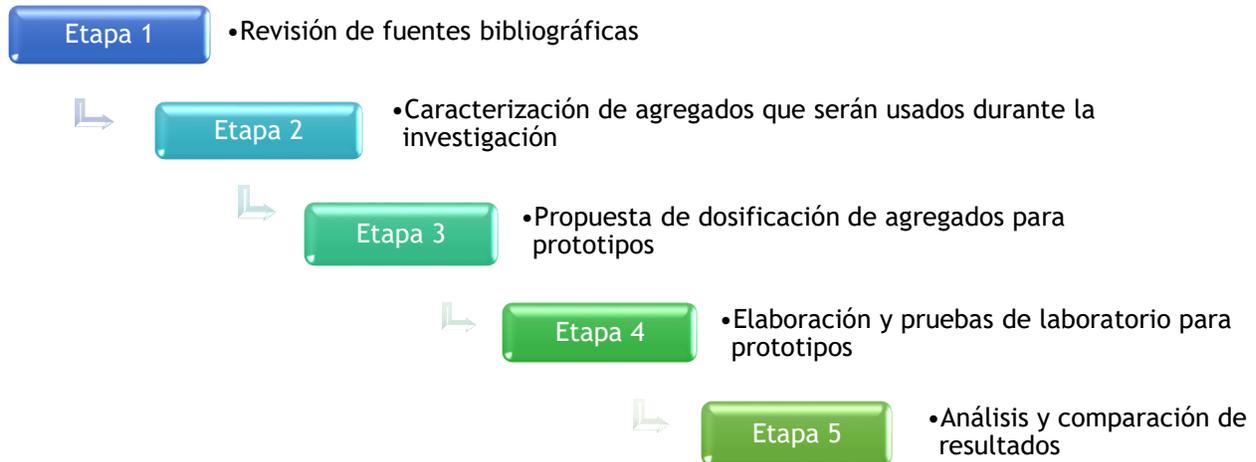
ESPECÍFICOS

- a. Definir y analizar a partir de las especificaciones técnicas particulares los materiales a usar en los prototipos, mediante la caracterización física en laboratorio para las mezclas de concreto en el desarrollo de la investigación
 - b. Elaborar adoquines con diferentes dosificaciones modificando el contenido de los materiales reciclados que permitan evaluar el comportamiento mecánico bajo especificaciones de compresión y flexotracción.
 - c. Comparar los parámetros de resistencia obtenidos en los adoquines elaborados con mezclas adicionadas respecto de las especificaciones técnicas de los adoquines para empleo de pavimentos.
-

METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta los diferentes enfoques y el proceso para determinar el comportamiento mecánico de los adoquines para pavimento articulado, la metodología es mixta ya que tiene enfoque cualitativo y cuantitativo para llegar a tener las diferentes hipótesis, con el fin de establecer diferentes etapas generando un paso a paso en el proceso constructivo de prototipos a fallar y posterior comparación con adoquines que habitualmente son usados para pavimento articulado para pavimento vehicular.

Figura 4
Etapas de la metodología.



Nota: Elaboración propia.

Etapa 1: Se realiza la revisión bibliográfica para determinar el avance observado respecto a investigaciones que se realizan actualmente o máximo 5 años atrás, no obstante, hay fuentes de mayor tiempo porque no ha sido investigado frecuentemente por tanto se buscan similitudes, dando rumbo a que la investigación tenga un enfoque más asertivo y claro.

Etapa 2: La caracterización de agregados que se utiliza durante el proceso de investigativo de adoquines para pavimento articulado vehicular.

- **Cemento:** La caracterización del cemento es adoptada por las propiedades reportadas en la ficha técnica de la cementera que provee el mismo teniendo en cuenta que sus propiedades deben ser de acorde con la NTC 121.
- **Agregado fino y agregado grueso:** Tendrán una caracterización por medio de pruebas de laboratorio tales como granulometría (INV-E 213), límite líquido y plástico (INV - E 215-216), densidad nominal y aparente, tamizaje 200, resistencia de absorción (INV - E 222 - 227) y desgaste con la máquina de los ángeles.
- **Agua:** El agua que se va a usar es del acueducto de la ciudad de Duitama, la cual cuenta con un tratamiento de potabilización suficiente en la producción de adoquines para pavimento articulado.
- **Plástico (Polietileno de alta densidad) como desecho de plástico reciclado para otros trabajos en presentación de fibra y caucho triturado reciclado:** La caracterización será realizada empíricamente teniendo en cuenta que no hay norma que establezca las pruebas que se deben realizar a materiales reciclados, sin embargo, los laboratorios serán basados en normativa para agregados finos y gruesos los agregados.

Tabla 1: Propuesta de pruebas de laboratorio para agregados

PRUEBA	GRA	LL / LP	DN	DA	FRT	MUS	MUA	HMN
Cemento	La caracterización del cemento está definida en las especificaciones que el proveedor suministra.							
Ag fino	2	1	1	1	N/A	1	1	4
Ag grueso	2	1	1	1	Se asume que cumple con las condiciones exigidas según norma	1	1	4
Neumático	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Plástico	1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Agua	Se asume que el agua que se toma para los prototipos es del acueducto, por tanto, cuenta con estándares de calidad y es agua tratada apta para consumo humano y/o industrial.							

Nota: Elaboración propia

Etapa 3: Propuesta de dosificaciones de prototipos con adiciones de materiales reciclados, posteriormente prensado y secado bajo las condiciones estipuladas en la normativa NTC 2017 para prefabricados de adoquines para pavimento articulado, las dosificaciones se harán teniendo como guía las metodologías como ACI (American Concrete Institute) cumpliendo con ensayos técnicos de resistencia a los productos que requieren métodos y prácticas de pruebas ASTM (Sociedad estadounidense de pruebas y materiales) y PCA (Principal Component Analysis) método estadístico para simplificar la complejidad de espacios muestrales (Rodrigo J. A., 2017).

Tabla 2: Planteamiento de dosificaciones para prototipos a base de cemento gris con adiciones de materiales reciclados. Se diseñan dosificaciones como prototipo con adiciones de neumático y plástico (PPN), prototipos con adiciones de plástico (PP) y prototipos con adiciones de neumático (PN) junto con los diferentes porcentajes propuestos, siendo reemplazado por el porcentaje de agregado fino.

Tabla 2: Propuesta de dosificación para prototipos con adición de materiales reciclados.

PROPUESTA DE PROTOTIPOS CON ADICIONES DE MATERIALES RECICLADOS				
Prototipos	Número de prototipo			
	1	2	3	4
Adición de plástico	0%	3%	5%	10%
Adición de neumático	0%	3%	5%	10%
Adición de plástico y neumático de c/u	0%	1,5%	2,5%	5,0%

Nota: Elaboración propia.

Etapa 4: Elaboración de prototipos y fallas con pruebas a compresión, en este caso se busca el comportamiento a flexotracción, teniendo resultados finales de resistencia del adoquín.

Etapa 5: Se realiza análisis de resultados respecto a la norma, bibliografía y adoquines sin adiciones.

ODS - OBEJTIVOS DE DESARROLLO SOSTENBLE.

Los objetivos de desarrollo sostenible también llamados como la agenda 2030 fue aprobada por dirigentes mundiales en septiembre del año 2015 en la cumbre de las naciones unidas y entraron oficialmente a ser trabajadas en enero de 2016 proyectados para cumplirse en su totalidad mundialmente en el año 2030. Estos objetivos son un total de 17 y cuentan con la particularidad de ser primordiales para el desarrollo de todos los países a nivel mundial fortaleciendo el crecimiento económico, dando iniciativas para combatir la pobreza, adoptan medidas de prosperidad al tiempo para proteger el planeta y abordan una serie de necesidades sociales, como educación, protección social y oportunidades de empleo mientras que a su vez luchan por el cambio climático y promueven la protección del cambio climático. En este caso el proyecto buscó cumplir con algunos de los objetivos planteados con la ONU.

Figura 5

Figura oficial de los ODS a nivel mundial



Nota: Tomado de Isglobal. 2016

Objetivo 9 se busca el desarrollo de infraestructuras viales amigables con el medio ambiente, fiables, seguras, resilientes y de calidad, incluyendo vías regionales y nacionales, apoyando desarrollos económicos y bienestar de los ciudadanos.

Figura 6

Logo del objetivo 9 de los ODS



Nota: Tomado de Isglobal. 2016.

Objetivo 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles: Este objetivo pasa a ser uno de los que este proyecto cumplió dado que se busca generar un nuevo método constructivo para generar infraestructura vial para pasos escasos o remotos, dando crecimiento económico y estabilidad social con incremento en la productividad y mejoras a nivel educativo.

Figura 7
Logo del objetivo 11 de los ODS



Nota: Tomado de Isglobal. 2016.

Objetivo 12 Producción y Consumo Responsables: La producción de un elemento que reduce la contaminación por la reutilización de desechos industriales como el polietileno de alta densidad y el neumático triturado, así mismo haciendo reemplazo de agregados dentro de la mezcla dando a conocer un adoquín amigable con el medio ambiente y más liviano.

Figura 8
Logo del objetivo 12 de los ODS



Nota: Tomado de Wikipedia. 2015.

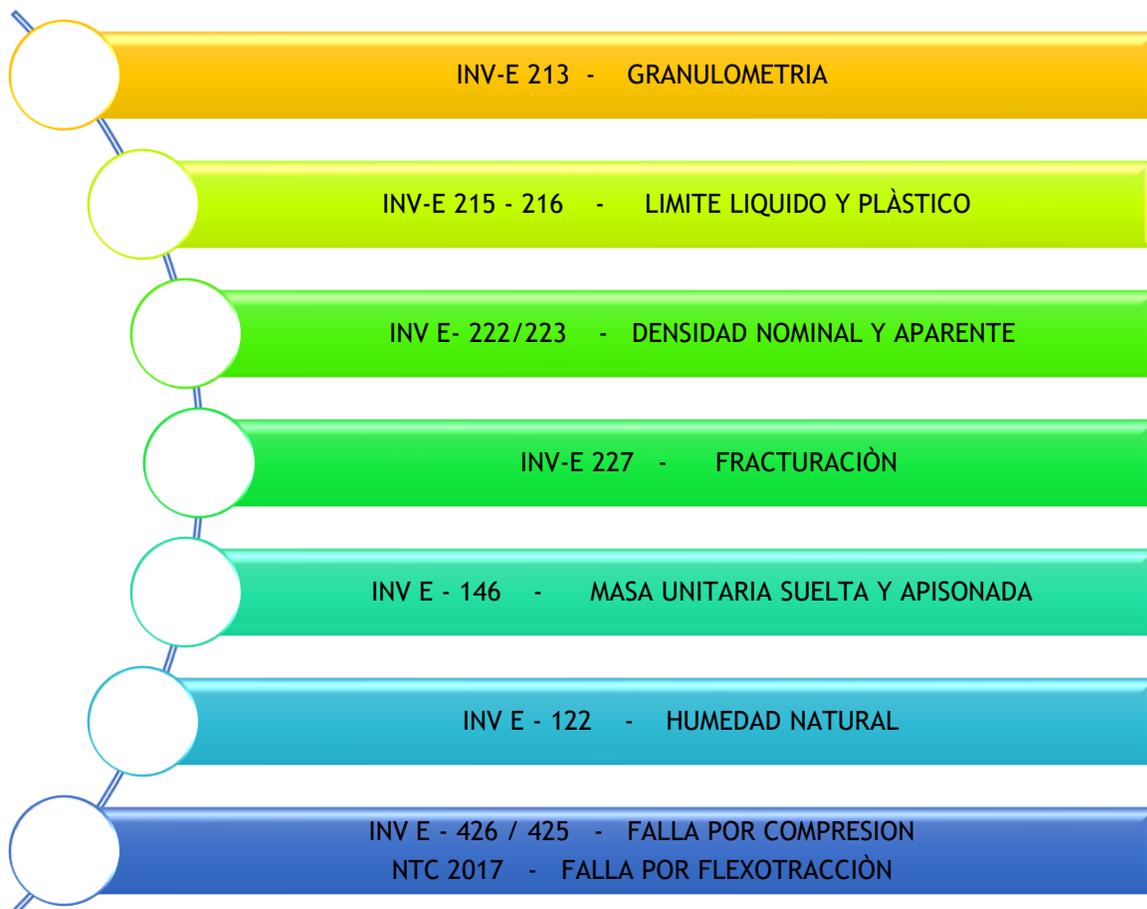
DATOS

La recolección de datos está basada en los laboratorios elaborados en las instalaciones de la universidad y las metodologías establecidas para el desarrollo de los prototipos a fallar, de tal manera que el avance del proyecto va de acorde con los mismos, también se cuenta con información de otras investigaciones relacionas con el tema de este proyecto, sin embargo, debido a su poca indagación no se han encontrado en su mayoría fuentes menores a cinco años.

Los agregados finos y gruesos fueron suministrados por la empresa MaxSima, los cuales deben ser caracterizados en laboratorio con pruebas establecidas en la norma NTC 2017 para adoquines de pavimento articulado. La adición de los materiales reciclados son el polietileno de alta densidad suministrado por la empresa Ecosostenible y el neumático M30 0.6 mm, M25, M10 y M5 suministrado por la empresa futuro ambiental.

Igualmente se tienen en cuenta las diferentes metodologías como la ACI, PCA y NPR que se usan para la elaboración de prototipos y el desarrollo de la investigación, contando con estándares de calidad, técnicos y seguridad y Las pruebas a realizar con el fin de obtener las características de los materiales con los que se van a trabajar y tener la certeza de cumplir con los estándares exigidos.

Figura 9
Pruebas de laboratorio



Nota: Elaboración propia

PROCESAMIENTO DE DATOS

Durante la caracterización de materiales es necesario recaudar la mayor cantidad de datos para analizar su comportamiento, estos ensayos se realizan de acuerdo a lo definido en los protocolos adoptados y difundidos por el INVIAS para agregados finos y gruesos y para concretos. Se comenzó por la granulometría

de los mismos bajo la norma INV - E 213, de tal manera que se pudiese determinar distribución de los granos del material según el tamaño usados en la elaboración de los prototipos.

Figura 10
Tamizaje de agregados



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Para el tamizado de los agregados que cumplen la función de ser adicionados reemplazando un porcentaje de los agregados tradicionales como el plástico y el caucho, se utiliza la misma norma para granulometría INV - E 213.

Figura 11
Tamices junto al caucho Malla 30 (M 30 - 0.6mm), malla 25 (M 25 - 1.0 mm), malla 10 (M 10 - 2.0 mm) y malla 5 (M 5 - 4.0 mm)



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 12
Tamizaje del polietileno de alta densidad



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Se continúa recaudando datos con los límites líquido y plásticos únicamente usados para los agregados finos y gruesos, dado que las características del material solo pueden ser usados en este, los agregados pasan únicamente por el tamiz 40 para escoger específicamente el material que se necesita para usar en casa grande.

Figura 13
Agregado fino pasado por tamiz 40 para límites líquido y plástico.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 14

Laboratorio con casa grande para limites líquido y plástico del agregado fino.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023

Figura 15

Laboratorio con casa grande para limites líquido y plástico del agregado fino.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 16

Laboratorio con casa grande para limites líquido y plástico del agregado grueso.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 17

Laboratorio con casa grande para limites líquido y plástico del agregado grueso.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Se determina las masas unitarias sueltas y apisonadas para el agregado fino y agregado grueso. Registrando resultados suficientes para determinar la compactación total de los agregados.

Figura 18
Laboratorio para determinar masa unitaria suelta (MUS).



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

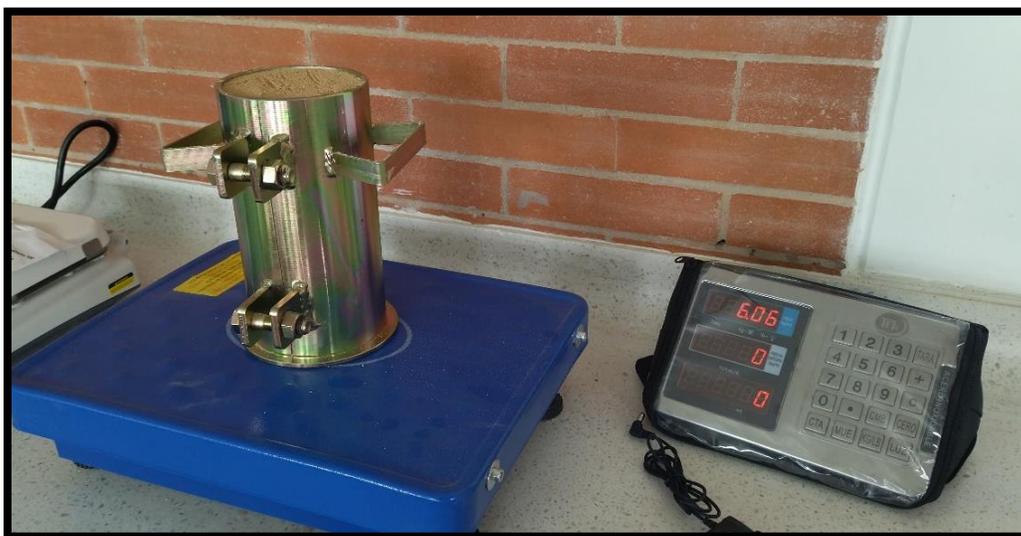
Se agrega el material de tal manera que quede en tres capas diferentes dando 25 golpes por cada una hasta llenar totalmente y para el laboratorio se utilizan implementos para pruebas de cilindros de concreto.

Figura 19
Implementos para realización de laboratorio MUA.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 19.1
Peso de MUA para agregado fino.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 20
Laboratorio para determinar masa unitaria apisonada (MUA).



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Se toman dimensiones al cilindro y se determina el volumen del mismo para calcular las masas unitarias sueltas a apisonadas. Como punto esencial en el proyecto se necesita encontrar la humedad natural, para esto se lleva la muestra 24 horas al horno con una temperatura constante de 109°C, se pesan las masas antes de entrar al horno y después de su secado.

Figura 21
Temperatura del horno



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 22 y 23
Capsulas con muestras para determinar humedad natural.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 24
Capsulas con muestras para determinar humedad natural luego de 24h de secado.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Es necesario analizar cuál es la maquina y los moldes que se van a manejar, de tal manera que conozcamos el manejo del material y la construcción de los adoquines para entender de qué manera se

deben realizar las mezclas y sus respectivas dosificaciones. Se hace una compactación y vibrado por dos minutos, haciendo que la mezcla se ajuste al molde del adoquín donde se funden los adoquines. La empresa **MaxSima** es la proveedora de los agregados que se analizaron y caracterizaron para su posterior mezcla, así mismo es fabricante de prefabricados como adoquines, tope llantas, bordillos, losetas entre otros productos para hacer la construcción menos compleja y cortando los tiempos de las obras.

Figura 25
Máquina de vibrado y compactación de material para adoquines.



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Figura 26 y 27
Máquina de vibrado y compactación de material para losetas prefabricadas.



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Teniendo en cuenta los datos recaudados en la investigación, se continua con el análisis de los mismos haciendo los cálculos correspondientes a cada laboratorio luego de tabular la información para su posterior dosificación, sin embargo, se tiene en cuenta que los mismos materiales caracterizados deberán ser los mismo utilizados para las mezclas a realizar.

De acuerdo a los laboratorios realizados en la UAN (Universidad Antonio Nariño) sede Duitama, las muestras fueron llevadas a la empresa (MaxSima) de prensado para hacer adición agua para ser puestas en la máquina de vibro prensado y obtener los adoquines con medidas de 20x10x8, medidas establecidas en la NTC 2017 para pavimento articulado vehicular.

RESULTADOS

Se define según la granulometría que el agregado grueso que se va a manejar es arena gruesa ya que la mayoría del material queda retenido en el tamiz 10, en cuanto al agregado fino la arena que se va a manejar es arena de medias a finas la mayoría del material está en el tamiz 30 y 40.

Tabla 3: Granulometría de agregado grueso.

ESTANDAR	Tamiz mm	Peso retenido g	% RETENIDO		% PASA
1/2	12,5	0	0	0	100
3/8	9,5	1,8	0,26	0,26	99,74
4	4,75	16,2	2,33	2,58	97,42
10	2	621,3	89,19	91,77	8,23
16	1,18	16,3	2,34	94,11	5,89
30	0,6	9,2	1,32	95,43	4,57
40	0,425	2,1	0,30	95,74	4,26
50	0,3	1,6	0,23	95,97	4,03
60	0,25	0,9	0,13	96,10	3,90
80	0,18	3	0,43	96,53	3,47
100	0,15	3,4	0,49	97,01	2,99
200	0,074	13,5	1,94	98,95	1,05
Pasa 200	0	7,3	1,05	100,00	0,00
		696,6	100		

Nota: Elaboración propia

Tabla 4: Granulometría de agregado fino

ESTANDAR	Tamiz mm	Peso retenido g	% RET		% PASA
1/2	12,5	0	0	0	100,00
3/8	9,5	11,9	0,92	0,92	99,08
4	4,75	34,6	2,67	3,59	96,41
8	2,38	57,2	4,41	8,00	92,00
10	2	11,2	0,86	8,87	91,13
16	1,18	52,4	4,04	12,91	87,09
30	0,6	186,4	14,38	27,29	72,71
40	0,425	157,9	12,18	39,47	60,53
50	0,3	162,9	12,57	52,04	47,96
60	0,25	235,9	18,20	70,24	29,76
80	0,18	278,2	21,46	91,71	8,29
100	0,15	37,8	2,92	94,62	5,38
200	0,074	58,1	4,48	99,11	0,89
Pasa 200	0	11,6	0,89	100,00	0,00
Margen de error		1,8	100		
		1296,1			

Nota: Elaboración propia

Junto con el análisis granulométrico se calculó el módulo de finura del agregado fino como información de entrada para la dosificación según el protocolo ACI 211.1, el cual se determina teniendo en cuenta los tamices 3/8", 4, 8, 16, 30, 50 y 100 luego de tener esa sumatoria la dividimos en 100. Los valores de MF de 2.5 a 3 se consideran normales, sin embargo, a pesar de tener los valores más bajos no se considera un material fino con MF menor a 2.5.

Tabla 4.2: Análisis de módulo de finura

MF	2,25
-----------	-------------

Nota: Elaboración propia

En cuanto a la humedad natural son resultados que van desde 1,5% al 12%, lo cual indica que aún sin ser sometidos durante 24h en horno a 110°C ya tienen un índice mínimo de humedad. Los materiales son específicamente para prefabricados como los son agregado fino y agregado grueso aproximadamente de 1/8' plg.

Tabla 5: Análisis de humedad natural, unidad de medida gramos.

HUMEDAD NATURAL (g)				
RECIPIENTE	PESO HUMEDO	PESO SECO POST 24H	DIF	%W
2+++	40,9	36,5	4,4	12,05
16	47	41,4	5,6	13,53
M304	58,9	58,8	0,1	0,17
6	64,9	64,9	0	0,00
M4	69,5	68,3	1,2	1,76
10	65,8	64,8	1	1,54

Nota: Elaboración propia

Figura 28
Muestra para análisis de humedad natural.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Los límites líquido y plástico son obtenidos con hacer el laboratorio casa grande los cuales arrojaron resultados (NP), fueron golpes entre 3 y 6 para agregado fino y entre 6 y 16 para agregado grueso, no obstante, los materiales cumplen con la norma NTC 2017 de ser NP para adoquines de pavimento articulado.

Tabla 6: Límite líquido y límite plástico agregado fino

AGREGADO FINO PASADO POR TAMIZ 40	
PRUEBA	N.º DE GOLPES
1	3
2	6

Resultado (NP)

Nota: Elaboración propia

Tabla 7: Límite líquido y límite plástico agregado grueso

AGREGADO GRUESO PASADO POR TAMIZ 40	
PRUEBA	N.º DE GOLPES
1	6
2	19
3	18
4	16

Resultado (NP)

Nota: Elaboración propia

Se requiere determinar la masa unitaria suelta y apisonada de tal manera que se obtienen los pesos luego de su respectivo proceso con cilindros como se puede ver en la **figura 11**.

Tabla 8: Cálculos de masa unitaria suelta del agregado fino.

	MASA UNITARIA SUELTA	
	kg/M ³	gm/CM ³
E1 W molde + material suelto	1273,239545	1,273239545
E2 W molde + material suelto	1298,704336	1,298704336
E3 W molde + material suelto	1273,239545	1,273239545

Nota: Elaboración propio.

Tabla 9: Cálculos de masa unitaria apisonada del agregado fino.

	MASA UNITARIA APISONADA	
	kg/M ³	gm/CM ³
E1 W molde + material suelto	1540,619849	1,540619849
E2 W molde + material suelto	1540,619849	1,540619849
E3 W molde + material suelto	1540,619849	1,540619849

Nota: Elaboración propia

Tabla 10: Cálculos de masa unitaria suelta del agregado grueso

	MASA UNITARIA SUELTA	
	kg/M ³	gm/CM ³
E1 W molde + material suelto	1336,901522	1,336901522
E2 W molde + material suelto	1336,901522	1,336901522
E3 W molde + material suelto	1324,169127	1,324169127

Nota: Elaboración propia

Tabla 11: Cálculos de masa unitaria apisonada del agregado grueso

	MASA UNITARIA APISONADA	
	kg/M ³	gm/CM ³
E1 W molde + material suelto	1451,493081	1,451493081
E2 W molde + material suelto	1464,225476	1,464225476
E3 W molde + material suelto	1464,225476	1,464225476

Nota: Elaboración propia

Luego de copilar gran cantidad de información con las diferentes pruebas establecidas por las normas INVIAS, se formula la dosificación la cual consta de datos arrojados por la caracterización de los agregados y en lo particular el tamaño máximo de agregado grueso y el módulo de finura del agregado fino, masas unitarias entre otros, luego se realizan las mezclas ajustando las adiciones de materiales reciclados tales como polietileno de alta densidad y caucho tritura de neumático Malla 30 (M 30 - 0.6mm), malla 25 (M 25 - 1.0 mm), malla 10 (M 10 - 2.0 mm) y malla 5 (M 5 - 4.0 mm) reciclado según la práctica estándar para la selección de las proporciones para Normal, peso pesado, y el hormigón en masa (ACI 211,1-91) (American Concret institute, 1991).

Figura 29

Vista previa a la mezcla de los agregados con adición de polietileno de alta densidad y neumático reciclado.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Tabla 12: Dosificación con adición solamente de plástico

Espesor 8cm			
	PP3%	PP5%	PP10%
PROTOTIPO	1(3%)	2 (5%)	3 (10%)
Agregado fino (g)	2,58	2,45	2,20
Agregado grueso (g)	5,78	5,78	5,78
Agua (cm ³)	0,99	0,99	0,99
Cemento (g)	1,45	1,45	1,45
Plástico (g)	0,08	0,13	0,27
Peso total de la muestra	10,88	10,80	10,69

Nota: Elaboración propia

Tabla 13: Dosificación con adición solamente de neumático

Espesor 8cm			
	PN3%	PN5%	PN10%
PROTOTIPO	1 (3%)	2 (5%)	3 (10%)
Agregado fino	2,58	2,45	2,20
Agregado grueso	5,78	5,78	5,78
Agua	0,99	0,99	0,99
Cemento	1,45	1,45	1,45
Caucho de neumático	0,08	0,13	0,27
Peso total de la muestra	10,88	10,80	10,69

Nota: Elaboración propia

Tabla 14: Dosificación con adición de plástico y neumático

Espesor 8cm			
	PPN 3%	PPN 5%	PPN 10%
PROTOTIPO	1 (3%)	2 (5%)	3 (10%)
Agregado fino	2,58	2,45	2,20
Agregado grueso	5,78	5,78	5,78
Agua	0,99	0,99	0,99
Cemento	1,45	1,45	1,45
Plástico	0,04	0,07	0,13
Neumático	0,04	0,07	0,13
Peso total de la muestra	10,88	10,80	10,69

Nota: Elaboración propia.

La información suministrada a continuación se obtiene de la metodología ACI de tal manera que los ensayos cumplieran con dosificaciones técnicamente comprobados, según la tabla 6.3.7.1. la estimación de peso de hormigón fresco para talla máxima nominal para agregado grueso de 1/8" es de 3840 lb/Yr³ y en la tabla de numeral 6.3.4 la relación agua cemento para una resistencia de 21 MPa debe ser de 0.68, en la tabla A1.5.3.3 el agua de mezcla debe cumplir con unos requisitos aproximados

por depresiones y tamaños preestablecidos nominales máximos de agregados el agua debe ser de 207 l/m³.

Tabla 15: Especificaciones para la realización de dosificaciones con adiciones de materiales reciclados.

DOSIFICACION	
ASENTAMIENTO cm	5,0
F'c R28 (MPa)	21
T MAX mm	9,8
A / C	0,68
AGUA Lts	207,0
CEMENTO	304,4
MASA DE CONCRETO	2280,0
VOLUMEN AGR GRUESO	0,4
MASA AGR GRUESO	1140
MASA AGR FINO	0,3
VOLUMEN AGR FINO	0,00213
DA AGR FINO	2670
DA AGR GRUESO	2670

Nota: Elaboración propia.

Figura 30
Adición de 10% neumático según dosificaciones establecida por metodología ACI.



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Figura 31

Adición de 5% neumático y plástico según dosificaciones establecida por metodología ACI.



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Figura 32
Adición de 10% de plástico según dosificaciones establecida por metodología ACI.



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

De esta manera se busca que según la norma NTC 2017 los adoquines para pavimentos articulado para tráfico pesado cumplan con resistencia a compresión de 21 MPa que también son equivalentes a 20 Kn/m². Las dimensiones del adoquín están establecidas bajo la normativa vigente anteriormente mencionada, de tal manera que sus medidas habituales, resistencias y dimensiones sean iguales a los adoquines normalmente usados y lograr hacer una comparación tangible y real de los adoquines más utilizados y comprado para pavimento articulado vehicular.

Al observar estas los especímenes se evidencian que es una mezcla casi seca. A diferencias del concreto habitual para placas de entrepiso, vigas, cimentaciones o columnas. El lograr fundirla a vibro compactación permite obtener uniformidad inmediata y su fase de fraguado es más acelerado, teniendo como fase inicial 72h luego de su fabricación, los adoquines tienen dimensiones según norma NTC 2017 capítulo 4 (Requisitos físicos) (Norma técnica colombiana , 2017) cuenta con dimensiones.

Figura 33

Adoquines fundidos a vibro compactación



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Figura 34
Adoquines fundidos a vibro compactación



Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Figura 35
Adoquines fundidos a vibro compactación

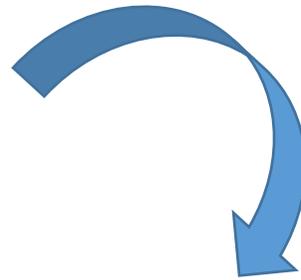
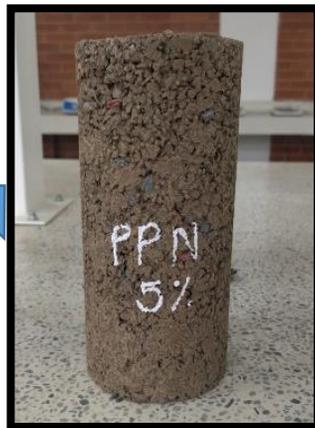
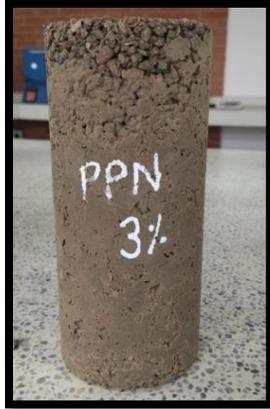


Nota: Toma propia. MaxSima Duitama 2023.

Se realiza pruebas de laboratorio con los cilindros, estos se fallan a compresión de igual manera a los adoquines, sin embargo, se busca que estas pruebas de resultados más exactos del comportamiento de los materiales en su tiempo de fraguado.

Figura 36,37 y 38

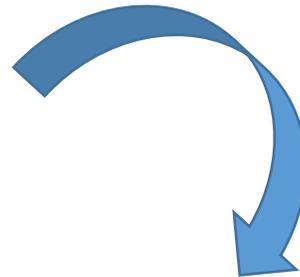
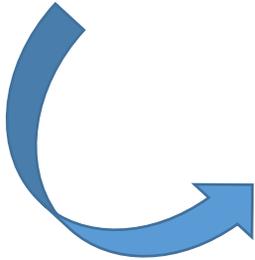
Cilindros para pruebas internas de laboratorio PPN de 3%, 5% y 10%.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 39, 40 y 41

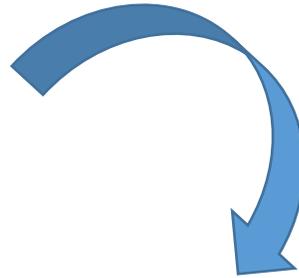
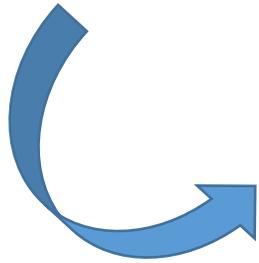
Cilindros para pruebas internas de laboratorio PP de 3%, 5% y 10%.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 42, 43 y 44

Cilindros para pruebas internas de laboratorio PN de 3%, 5% y 10%.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Teniendo los especímenes hechos y desencofrados después de 24h se procede a sumergirlos en agua durante mínimo 7 días observando el comportamiento de cada uno, a los cual podemos decir que el peso y la reacción al sumergir los prototipos que solo cuentan con adición de plástico únicamente, absorben gran cantidad de agua y sus pesos son más bajos a diferencia de los que cuentan con adiciones de neumático.

Tabla 16: Especificaciones de cilindros antes de ser cometidos ha fraguado.

CILINDROS CON ADICIONES DE MATERIALES RECICLADOS							
Cilindro	Nombre de prototipo	Diam prom (cm)	Radio cm	Altura de los cilindros (cm)	Vol. de cilindros cm ³	Peso g (w)	Densidad de cilindros kg/m ³
1	PP 10%	10,14	5,07	20,33	1643,04	2478,5	1,51
2	PP 5%	10,10	5,05	20,67	1656,83	3084,6	1,86
3	PP 3%	10,14	5,07	20,63	1667,28	3052,1	1,83
4	PN 5%	10,16	5,08	20,77	1684,68	3565,4	2,12
5	PN 10%	10,09	5,05	20,57	1644,46	3386,7	2,06
6	PN 3%	10,17	5,08	20,50	1664,13	3320,5	2,00
7	PPN 3%	10,07	5,04	20,50	1632,64	3380,7	2,07
8	PPN 5%	10,16	5,08	20,73	1680,87	3319,2	1,97
9	PPN 10%	10,01	5,00	20,47	1609,54	3220,5	2,00

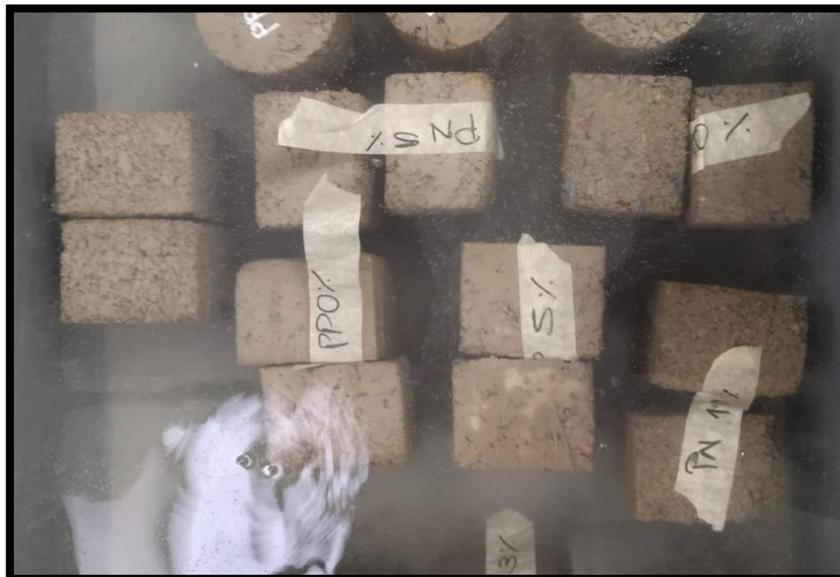
Nota: Elaboración propia.

Figura 45
Cilindros en fase de fraguado.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 46
Adoquines en fase de fraguado.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Figura 48
Adoquines en fase de fraguado.



Nota: Toma propia. Laboratorios UAN Duitama 2023.

Las fallas a compresión realizadas en los cilindros arrojaron datos de carga ultima en unidades de Kn, teniendo en cuenta que el área de los cilindros está en cm² los datos son calculados en Kn/cm².

Tabla 17: Resistencia ultima de cilindros fallados a compresión.

PRUEBAS	Densidad	CARGA	Área cm ²	KN /	MPa
				cm ²	
1 Cilindro a base de plas 3%	1,83	14,9	80,81	0,18	1,94
Cilindro a base de plas 5%	1,86	15,9	80,17	0,20	2,08
Cilindro a base de plas 10%	1,51	4	80,81	0,05	0,52
2 Cilindro a base de neumat 3%	2,00	20,6	81,18	0,25	2,66
Cilindro a base de neumat 5%	2,12	34,7	81,13	0,43	4,49
Cilindro a base de neumat 10%	2,06	13,6	79,96	0,17	1,79
3 Cilindro a base de plas y neumat 3%	2,07	21	79,64	0,26	2,77
Cilindro a base de plas y neumat 5%	1,97	17,6	81,07	0,22	2,28
Cilindro a base de plas y neumat 10%	2,00	18,1	78,64	0,23	2,42

Nota: Elaboración propia.

Tabla 18: Resistencia ultima de adoquines fallados a flexotracción.

FALLAS DE ADOQUINES

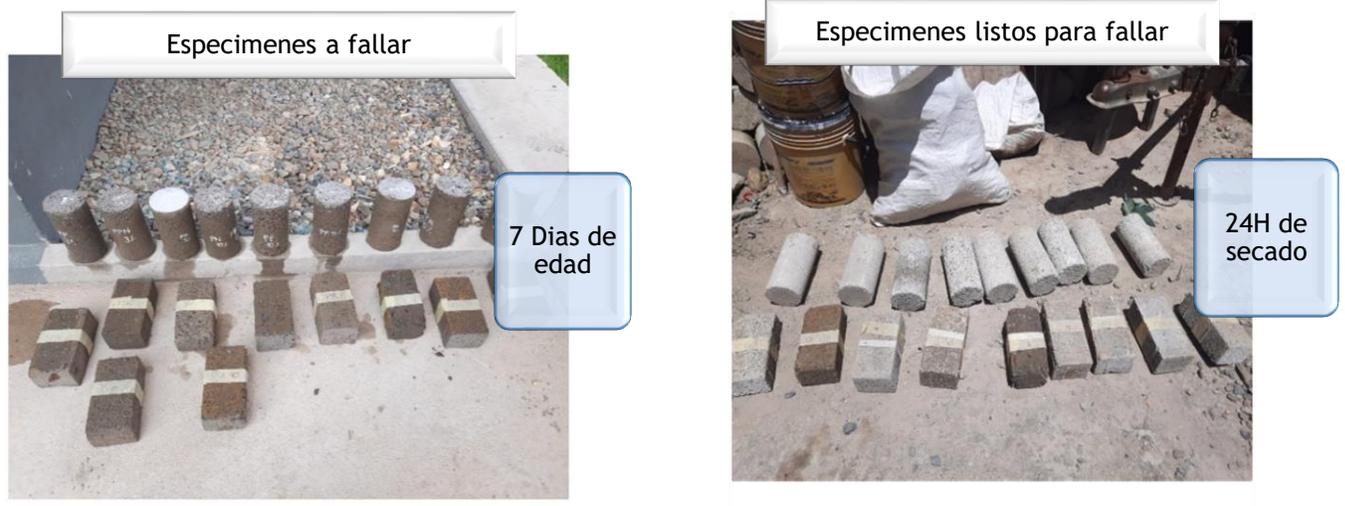
PRUEBAS		CARGA A KN	INV - E RESITENCIA DE LOS 3 PUNTOS	
Adiciones 0		7,3	KN / cm2	MPa
1	Adoq a base de plas 3%	2	0,013	0,13
	Adoq a base de plas 5%	6,7	0,044	0,44
	Adoq a base de plas 10%	5,3	0,035	0,35
2	Adoq a base de neumat 3%	4,1	0,027	0,27
	Adoq a base de neumat 5%	5,9	0,039	0,39
	Adoq a base de neumat 10%	2,3	0,015	0,15
3	Adoq a base de plas y neumat 3%	7,9	0,052	0,52
	Adoq a base de plas y neumat 5%	6,5	0,042	0,42
	Adoq a base de plas y neumat 10%	7,6	0,049	0,49

Nota: Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se hace un análisis de cálculos y visual, a pesar de que los resultados dieron cuantitativamente bajos, se debe tener en cuenta que los cilindros y los adoquines tienen 7 días de edad por tanto las resistencias son bajas.

Figura 49
Especímenes listos para fallar luego de 7 días de edad



Nota: Elaboración propia.

Figura 50
Cilindros fallados a compresión.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Especímenes que tienen adiciones únicamente de PEAD tienen poca adherencia con los demás agregados por tal razón cuando son sometidos a compresión fallan rápidamente y aún luego de ser fallados sigue cayendo en forma de granos su composición.

Figura 51
Cilindro fallado a compresión con solo adiciones de plástico



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

A diferencia de los cilindros que tenían solamente adición de PEAD, los que cuentan con adición de neumático tienen una mejor adherencia y comportamiento, las fallas en los cilindros son verticales y es notorio visualmente la mejoría en la adherencia de los componentes.

Figura 52
Cilindro fallado en prensa



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Figura 53
Falla a compresión de cilindro a base de solo neumático



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Las fallas hechas a los adoquines son a flexotracción o de tres puntos, ocasionando una ruptura en la mitad del adoquín, las fallas se dieron en línea recta o en diagonal dependiendo de la composición del mismo, los diferentes porcentajes de PEAD igual que en los cilindros demuestran que no hay adherencia y tampoco influyen en su geometría para tener más resistencia, por el contrario, fallan aún más rápido que los cilindros haciendo referencia al tiempo que falla en la máquina.

Figura 54
Falla a tres puntos para adoquines vehiculares



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Los adoquines con adiciones de ambos materiales como el PEAD y neumático triturado que son fallados a flexotracción cuentan con mejor resistencia a diferencia de los que tienen una sola adición de los dos a pesar de ser en diferentes porcentajes.

Figura 55

Ruptura de adoquín con adición de 5% de polietileno de alta densidad y 5% de neumático triturado.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Figura 56

Ruptura de adoquín con adición 3% de neumático triturado.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Figura 57
Ruptura de adoquín con adición de 10% de polietileno de alta densidad.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Este adoquín con adición únicamente de neumático en un 10% falla completamente en diagonal.

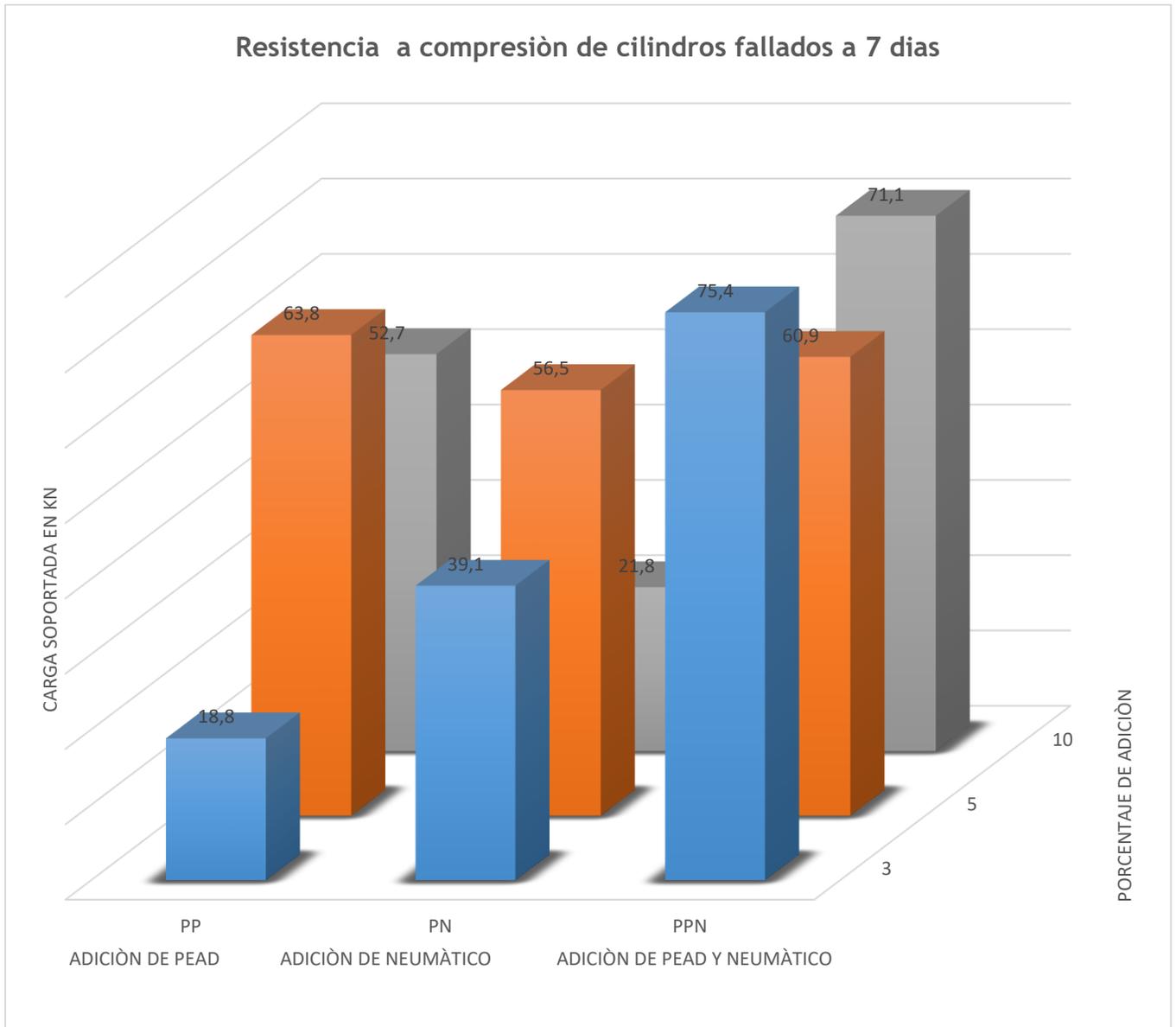
Figura 58
Ruptura de adoquín con adición de 10% de neumático triturado.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Los análisis pueden ser mejor interpretados de la siguiente manera. Gráficamente se evalúa la resistencia a compresión de los especímenes a 7 días obteniendo como resultado que las mejores resistencias las dieron las que tienen adición PEAD y neumático triturado.

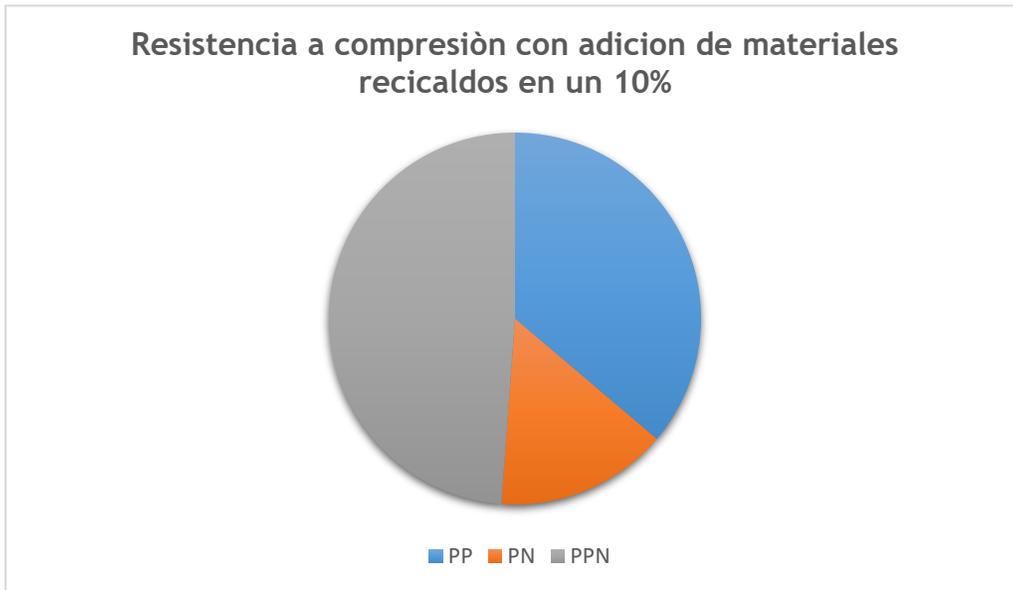
Figura 59
Comportamiento de cilindros de concreto a 7 días.



Nota: Elaboración propia.

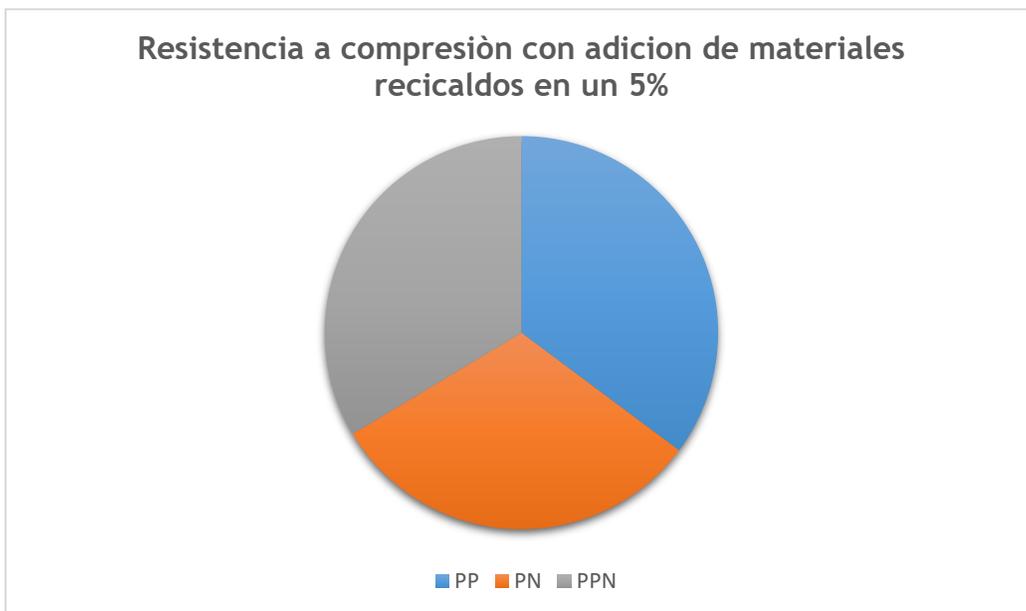
La resistencia de los cilindros que tienen el 10%, 5% y 3% de adiciones PP (solo plástico), PN (solo neumático) y adición de ambos PPN (PEAD y neumático) siendo equivalentes a la mitad de la adición total respectivamente.

Figura 60
Comportamiento de cilindros con adiciones del 10%



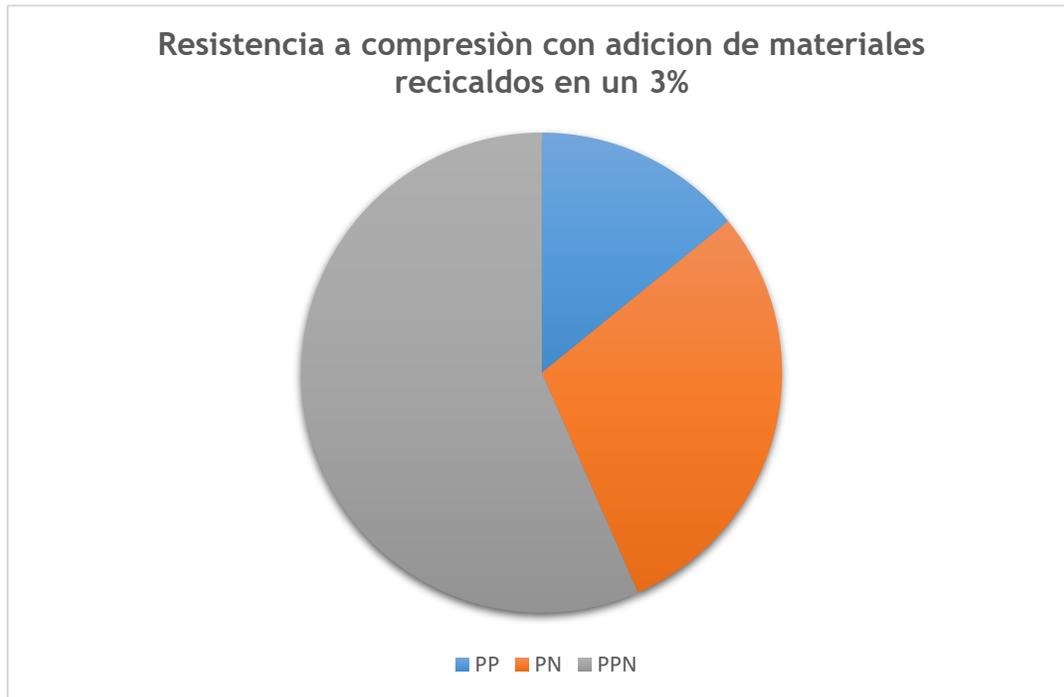
Nota: Elaboración propia.

Figura 61
Comportamiento de cilindros con adiciones del 5%



Nota: Elaboración propia.

Figura 62
Comportamiento de cilindros con adiciones del 3%

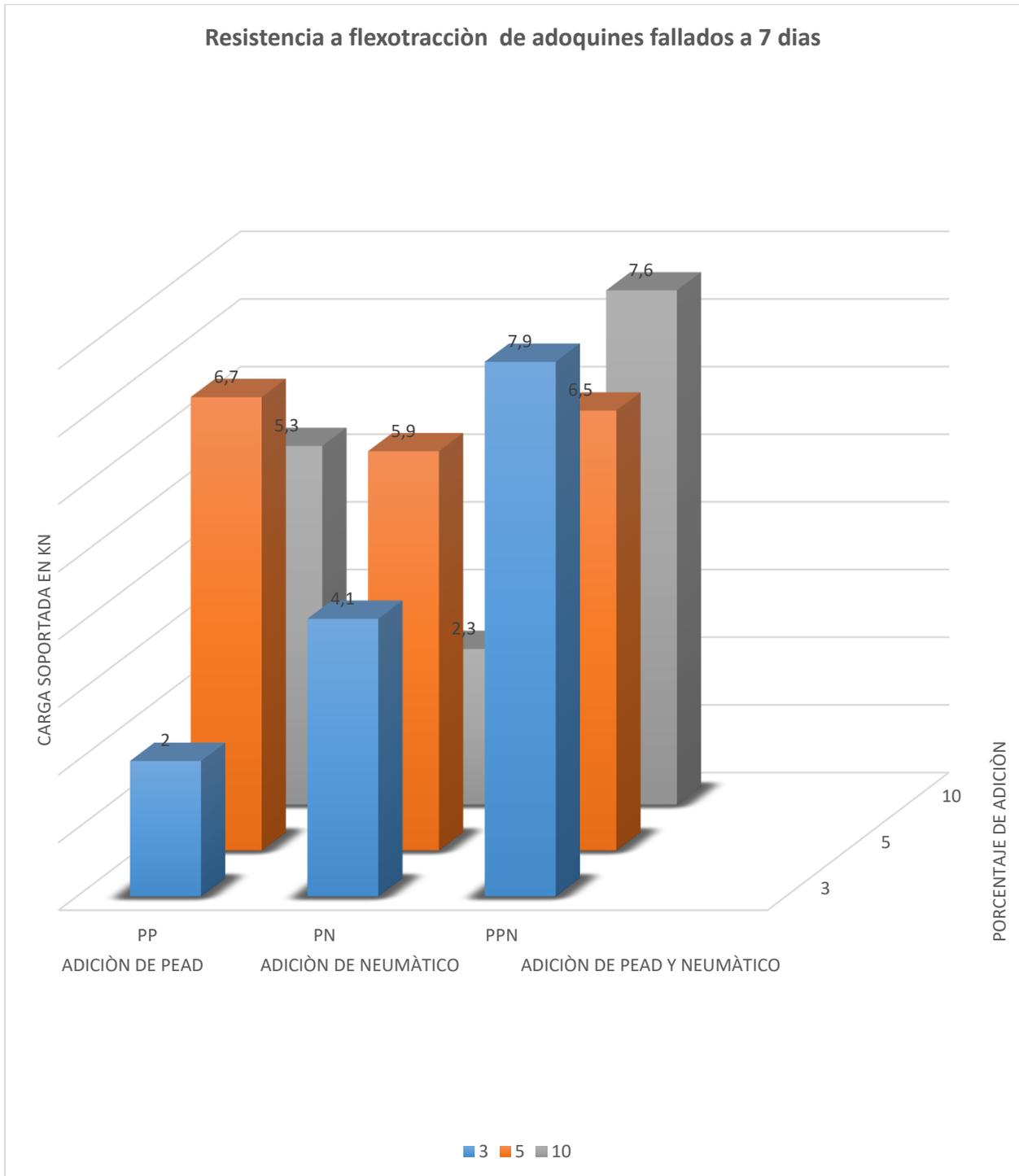


Nota: Elaboración propia.

Los especímenes también fueron hechos en forma de rectángulo dando forma a los adoquines para pavimento articulado vehicular, contaron con dimensiones de 20*8*10 cm. De igual manera que los cilindros contaron con diferentes dosificaciones 10%, 5% y 3% de adiciones PP (solo plástico), PN (solo neumático) y adición de ambos PPN (PEAD y neumático) siendo equivalentes a la mitad de la adición total respectivamente.

Las dosificaciones redujeron el porcentaje de agregado fino en reemplazo de PEAD y/o neumático triturado, de tal manera que no se viera afectada la cantidad de agregado grueso ni la relación agua cemento. Los análisis pueden ser mejor interpretados de la siguiente manera. Gráficamente se evalúa la resistencia a flexotracción de los especímenes a 7 días obteniendo como resultado que las mejores resistencias las dieron las que tienen adición PEAD y neumático triturado.

Figura 63
Comportamiento de adoquines de concreto a 7 días.



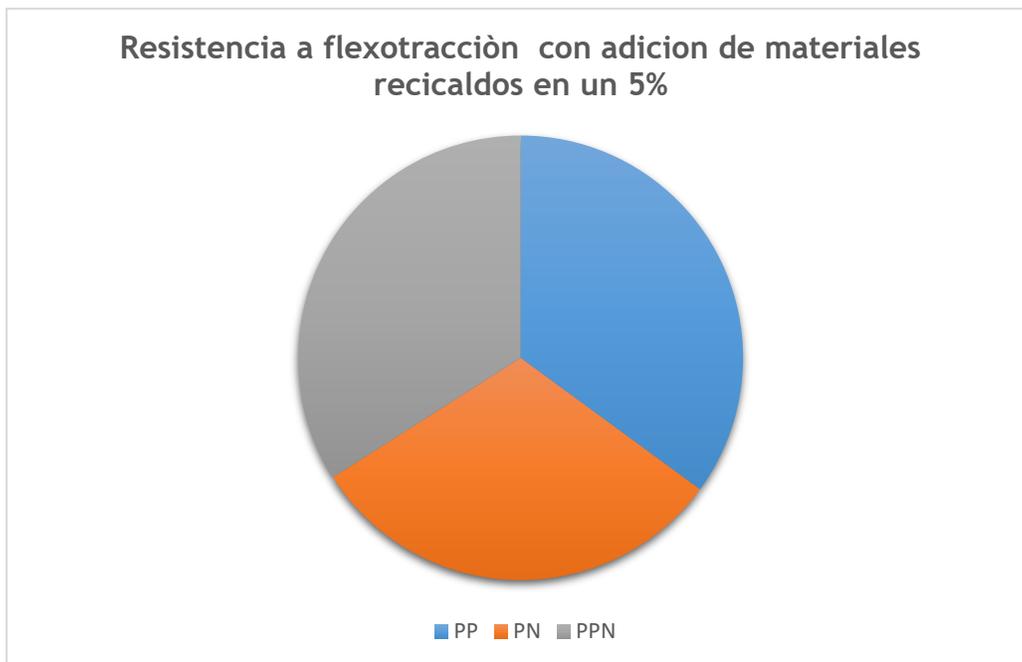
Nota: Elaboración propia.

Figura 64
Comportamiento de adoquines con adiciones del 10%



Nota: Elaboración propia.

Figura 65
Comportamiento de adoquines con adiciones del 5%



Nota: Elaboración propia.

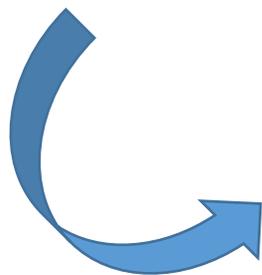
Figura 66
Comportamiento de adoquines con adiciones del 3%



Nota: Elaboración propia.

Luego de hacer el análisis de los resultados ya vistos anteriormente se elabora una tabla de comparación con especímenes elaborados durante la investigación con adoquines que se encuentran actualmente en el mercado, las resistencias aquí relacionadas son las 3 mejores de las 19 hechas, sin embargo, se hace debe aclarar que los adoquines con adiciones de materiales reciclados fueron fallados a los 7 días edad por el contrario los adoquines que se encuentra en el mercado fueron fallados con 28 días de edad.

Figura 67 y 68
Ruptura de adoquín con 28 días de edad encontrado en el comercio actual.



Nota: Toma propia. Laboratorio de suelos Duitama 2023.

Tabla 19: Comparación de fallas a flexotracción de especímenes con adiciones y sin adiciones de materiales reciclados.

Tabla comparativa de especímenes con adiciones VS sin adiciones						
Nombre de espécimen	Peso seco	Carga Kn	Kn/cm ²	Carga MPa	Tipo de adición	Edad al momento de fallado
PPN 3%	3063	7,9	0,052	0,5	1,5% de polietileno y 1,5% de neumático	7 días
PPN 10%	2761	7,6	0,049	0,4	5% de polietileno y 5% de neumático	7 días
PP 5%	3285	6,7	0,044	0,4	5% de polietileno	7 días
1	3365	29,5	4720	4,72	N/A	28 días
2	3232	20,9	3344	3,3	N/A	28 días
3	3228	27,3	4313	4,3	N/A	28 días

Nota: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Según la política de sostenibilidad para la infraestructura de INVIAS, se buscan productos para una construcción vial resiliente y con vida útil más extensa, dando paso al aumento del desarrollo económico y social para población rural del país, por tanto, este proyecto propone una nueva alternativa amigable con el medio ambiente y la segunda vida útil de residuos industriales como el PEAD y el neumático reciclado triturado.
- Con la caracterización mecánica de los agregados disponibles se encontró que estos cumplen con las especificaciones definidas por las normas vigentes INVIAS para trabajar durante el desarrollo del proyecto.
- La dosificación de los componentes para los especímenes de prueba se elabora de acuerdo con la norma ACI 211.1 para concreto hidráulico teniendo como referencia la resistencia de 21 Mpa para falla a compresión y según NTC 2017 para flexotracción de adoquines entre 5 y 3 Mpa individualmente.
- Los adoquines para se elaboran en máquina de vibrado durante 2 min por cada 8 adoquines, su fallado se realiza a los 7 días de fabricación obteniendo resultados cualitativos y cuantitativos de los mismos, con valores bajos desde 0.5 Mpa de resistencia a flexotracción.
- Se realiza la comparación de los parámetros de diseño obtenidos para los especímenes de la investigación y a los adoquines encontrados en el comercio, encontrando que estos reportan a la edad de 28 días un MR de 4.7 Mpa encontrándose dentro los rangos establecidos en la NTC 2017.
- Observando los resultados de los valores de falla de los especímenes adicionado con altos porcentajes de PEAD o mezclas de PEAD, se obtiene más vacíos en la mezcla esto dificulta la adherencia y compactación total en el espécimen.
- De la inspección visual a los especímenes con adición de neumático muestran una mejor aparente adherencia y permiten que la compactación en las mezclas seas más rápida y sin vacíos ya que reportaban unos pesos unitarios mayores.
- Los resultados obtenidos para las especificaciones de los especímenes permitieron tener un aspecto visual similar a los elementos convencionales.
- las adiciones de polietileno y neumático permitieron la reducción del peso unitario del concreto pasando de un valor teórico 2.280 kg/m³ alrededor de 1.500 kg/ m³.
- Para que los resultados de las cargas de falla sean confiables es necesario garantizar que los especímenes elaborados cumplan con las especificaciones de fraguado y forma.

- Los adoquines con mezcla de PEAD y neumático (PPN) que tienen un 3% soportan más carga con 7.9 KN y los que tienen un 3% de solo PEAD (PP) con 2 KN al momento de ser fallados a flexotracción, presentando poca adherencia entre los agregados y poca compactación.
- El polietileno de alta densidad tiene propiedades físicas como el hecho de ser hidrófugo o impermeable es decir repelente al agua, por tanto, los especímenes que únicamente contaron con esta adición fallaron rápidamente y se desplomaron por si solos una vez fallados a compresión.
- En los especímenes que contaban con adición de ambos componentes, se evidenció que el neumático corregía la adherencia que no era permitida por que polietileno.

CONTRIBUCIONES Y RECOMENDACIONES

- Se recomienda no utilizar polietileno de alta densidad (PEAD) ya que para mezclas de adoquines para pavimento articulado vehicular la dosificación de agua es muy baja y el PEAD evita la adherencia entre los agregados.
- Dejar que el tiempo de fraguado cumpla los 28 días podría mejorar la resistencia de los mismos al momento de fallar a flexotracción.
- No se debe modificar la relación agua/cemento ni la dosificación del agregado grueso.
- Se recomienda que los especímenes tengan dimensiones exactas y que tengan optimas características geométricas para evitar mala distribución de cargas al momento de fallar y estas sean de una manera más equilibrada.
- A partir de la información presentada en los resultados de la investigación se recomienda continuar indagando para hacer caracterizaciones más exhaustivas y con mayor intensidad ya que se observa potencial importante en el comportamiento de los adoquines con adiciones de materiales reciclados.
- Seguir investigando en la adición de neumático para prefabricados, ya sea para adoquines, losetas, bordillos, tope llantas entre otros.
- Teniendo en cuenta los valores obtenidos en la resistencia de los adoquines con adiciones en comparación con los adoquines de concreto que se encuentran en el mercado como se puede ver en la tabla 19 no se recomienda el uso de polietileno de alta densidad.

REFERENCIAS

- AA Fotiadi, S. G. (31 de July de 2020). *SpringerLink*. Obtenido de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-54652-6_50#citeas
- ACI. (2023). *acicolombia*. Obtenido de <https://www.acicolombia.org.co/>
- American Concret institute. (1991). *Standard Practice for selecting proportions for normal heavyweigh and mass concrete*. Unites States.
- Arroyo, P. (2018). *Un nuevo enfoque para la integración de factores ambientales, sociales y económicos para evaluar mezclas asfálticas con o sin neumático desecho*.
- astm. (1996 - 2013). *astm .org*. Obtenido de <https://www.astm.org/>
- Boada Marcano, M. d., & Reyes Lizcano, F. A. (2012). *Comportamiento a la fatiga de una mezcla de concreto MR-*. Venezuela: Ciencia e ingeniería.
- Carlos Santos, S. C. (2020). *Evaluación del asfalto modificado a base de caucho reciclado de neumáticos en comparación del asfalto convencional*.

- Castillo, A. (2017). *Fallas y causas en los pavimentos articulados de las vías urbanas en la ciudad de Jaén*.
- CEMEX. (s.f.). *Concreto cemex*. Obtenido de <https://www.cemexcolombia.com/concretos/pavimentos-modulo-rotura>
- David, d. l. (2017). *trabajo final de master evaluación ambiental y económica de la utilización de materiales reciclados para la producción del hormigón estructural y no estructural en cataluña*. barcelona , españa: universidad politècnica de catalunya.
- Dayana de la Caridad Fuentes Alpizar, C. P. (22 de Julio de 2022). *redalyc.org*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1939/193971847007/193971847007.pdf>
- Defensa juridica. (1991). *Defensa juridica.gov.co*. Obtenido de <https://ekogui.defensajuridica.gov.co/SiteCollectionDocuments/Normatividad%20General/constitucion%20politica/Articulo%20189%20Constitucion%20Politica%20de%20Colombia%201991%20numerales%2014%20y%2015.pdf>
- Fernandez, F. (2019). *Estudio de un asfalto con adición de caucho de neumático reciclado como polímero base*.
- Función pública . (20 de Noviembre de 2013). *Función pública.gov.co*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=66749>
- Función pública. (30 de Diciembre de 1993). *Función pública.gov.co*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=296>
- Garzón, E. A. (2021). *Evaluación de conductividad hidráulica y eficiencia drenante en capas granulares para pavimentos articulados permeables*.
- ICONTEC. (2004). *ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS NTC 2017*. Bogotá DC: ICONTEC.
- INVIAS. (2012). *Findeter*. Obtenido de https://www.findeter.gov.co/system/files/convocatorias/PAF-ATJAMUNDI-O-021-2022/capitulo_5_1.pdf
- Invias. (2022). *Invias.gov.co*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/normativa/politicas-y-lineamientos/9989-politica-de-sostenibilidad-para-la-infraestructura-de-transporte/file>
- Invias. (2023). *Instituto nacional de vías* . Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/biblioteca-virtual/leyes-ordenanzas-y-acuerdos?format=html>
- Jorge Bobadilla, F. T. (2021). *Uso de polímeros en asfalto*.
- Medalith, S. (2018). *La revaloración de la performance funcional y estructural de los pavimentos articulados en la ciudad de Jaén*.
- Ning Xie a b, M. A. (10 de February de 2019). *ScienceDirect*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618335376>
- Norma técnica colombiana . (2017). *ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS*. Colombia .
- Norma técnica colombiana. (S,f.). *Norma técnica colombiana*.
- ONU. (sf). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Rodrigo, J. A. (Junio de 2017). *Ciencia de datos*. Obtenido de https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis#:~:text=Princi

pal%20Component%20Analysis%20(PCA)%20es,vez%20que%20conserva%20su%20informaci%C3%B3n.

Rodrigo, J. A. (Junio de 2017). *cienciadedatos.net*. Obtenido de [https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis#:~:text=Principal%20Component%20Analysis%20\(PCA\)%20es,vez%20que%20conserva%20su%20informaci%C3%B3n](https://www.cienciadedatos.net/documentos/35_principal_component_analysis#:~:text=Principal%20Component%20Analysis%20(PCA)%20es,vez%20que%20conserva%20su%20informaci%C3%B3n).

Salomè Galeas, V. G. (2015). *Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores*.

Shreyas Pranav a, S. A.-H. (marzo de 2022). *ScienceDirectx*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819330612>

Singh, S. (September de 2022). Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920922002620>

Universidad de Santiago de Compostela. (2009). *Servicio de prevención de riesgos*.

Wikipedia. (2023). *Wikipedia*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Duitama#Demograf%C3%ADa>

Wikipedia. (2023). *Wikipedia enciclopedia libre*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Colombia#Geograf%C3%ADa>

Wikipedia. (2023). *Wikipedia enciclopedia libre*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Boyac%C3%A1#Geograf%C3%ADa>

wikipedia. (2023). *Wikipedia la enciclopedia libre* . Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/NSR-10>

Wikipedia. (s.f). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>

Universidad de Santiago de Compostela. (2009). *Servicio de prevención de riesgos*.

Wikipedia. (s.f). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Polipropileno>

Analytical consideration of voids in mortar and concrete," Proceedings, ASTM, v. 21, 1921, p. 940.

Goldbeck, AT, and Gray, JE ", A Method of Concrete batching for strength, workability and durability" Bulletin No. 11, National Crushed Stone Association, Washington, DC, December 1942, 30 pp. December, 30 pp.

Canon, Robert W. ", Concrete Dosing Fly Ash Dosage Mixtures for Strength and Economy", ACI Journal, Proceedings V. 65, No. 11, November 1968, pp 969-979. 28. Butler, WB, "Economical Folder.

Swayze, Myron A., and Gruenwald, Ernst, "Concrete Mix Design - A Modification of the Fineness Modulus Method". Mix Design - A Modification of the Modulus of Finesse Method," ACI Journal, Proceedings V. 43, No. 7, March 1947, pp. 829-844.

Townsend, Charles L., "Control of Cracking Temperature in Mass Concrete" Causes, Mechanism, and Control of Cracking in Concrete, SP-20, American Concrete Institute, Detroit, 1968, pp. 119-139.

ACI Committee 207, "Effect of restraint, volume change, and Reinforcement of Mass Concrete Cracking," ACI Journal, Proceedings V. 70, No. 7, July 1973 pp. 445-470. Also, ACI Handbook of Practical concrete, Part 1.

Townsend, CL, 'Cracking Control in Mass Concrete Structures' Engineering Monograph No. 34, US Bureau of Reclamation, Denver, 1965.

ACI Committee 207, "Mass Concrete of Dams and Other Massive Structures," ACI Journal, Proceedings V. 67, No. 4, Apr. 1970 pp. massive structures," ACI Journal, Proceedings V. 67, No. 4, Apr. 1970 pp. 273-309. Also, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1.

"Standard Practice for Concrete," EM 1110-2-2000 Office, Chief of Engineers, Army Corps of Engineers, Washington, DC, June 1974.

Hansen, Kenneth, "Cost of Mass Concrete in Dams," Publication No. MS260W, Portland Cement Association, Skokie, 1973, 4 pp.

Powers, Treval C., The Properties of Fresh Concrete, John Wiley and Sons, New York, 1968, pp. 246-256. Wiley and Sons, New York, 1968, pp. 246-256.

ACI Committee 207, "Cooling and Insulating Systems for Mass Concrete," (ACI 207.4R-80). Mass Concrete," (ACI 207.4R-80) *International Concrete - Des & N and Construction*, V.2, No. 5, May 1980, pp. 45-64. *Construction*, V.2, No. 5, May 1980, pp. 45-64.

Gaynor, Richard D., "High Strength Air-Incorporated Concrete," Joint Research Laboratory Publication No. 17, National Ready Mixed Concrete/National Sand and Gravel Association, Silver Spring, 1968, 19 pp. Association, Silver Spring, 1968, 19 pp.

Talbot, AN, "A Proposed Method for Estimating Density and Strength of Concrete and Dosage of Materials by Experimental and Analytical materials by Experimental and analytical consideration of voids in mortar and concrete," Proceedings, ASTM, v. 21, 1921, p. 940.

Townsend, CL, "Control of Cracking in Mass Concrete Structures" Engineering Monograph No. 34, US Bureau of Reclamation, Denver, Denver, 1965. Reclamation, Denver, 1965.

Fuller, William B., and Thompson, Sanford E., "The Concrete Batching Laws," Proceedings, ASCE, V. 59, December 1907, pp. 67-143.

Powers, Treval C., The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, New York, 1968, pp. 246-256.

Weymouth, CAG, "A study of fines in. Freshly Mixed Mortars and Concretes," Proceedings, ASTM, V. 38, Part 2, 1938, pp. 354-372.

Canon, Robert W. ", Concrete Dosing Fly Ash Dosage Mixtures for Strength and Economy", ACI Journal, Proceedings V. 65, No. 11, November 1968, pp 969-979.

Butler, WB, "Economical Folder Batching with Cement Substitute Materials". with Cement Substitute Materials" *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, V. 10, No. 1, Summer 1988, pp. 45-47.