

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	08-07-2021	n B
	Dependencia	Aprobado		Pág.
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA		SUBDIRECTOR ACADEMICO		1 (61)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Cristian Camilo Jácome Contreras Nelson Joshep Maldonado Cerón		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Fernando Jesús Regino Ubarnes Haidee Yulady Jaramillo		
TÍTULO DE LA TESIS	Adoquines para uso peatonal de viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster		
TITULO EN INGLES	Pavers for pedestrian use made of rubber shavings from recycled tires and polyester resin		
RESUMEN (70 palabras)			
<p>Varias empresas se han encargado de recibirlas, procesarlas y hacer una separación de los diferentes materiales que las componen, como el acero, fibras textiles y caucho, los cuales, posteriormente, se venden como materia prima para ser utilizada como base de nuevos productos. La mayoría de los usos que se le ha dado al caucho reciclado de LFU es principalmente para mezclas asfálticas, soportes, adoquines y láminas acústicas, amortiguación y aislamiento.</p>			
RESUMEN EN INGLES			
<p>Several companies have been in charge of receiving them, processing them, and separating the different materials that make them up, such as steel, textile fibers, and rubber, which are later sold as raw material to be used as the basis for new products. Most of the uses that LFU's recycled rubber has been given is mainly for asphalt mixes, supports, paving stones and acoustic sheets, cushioning and insulation.</p>			
PALABRAS CLAVES	Adoquines, caucho, llantas, reciclaje, poliéster.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Pavers, rubber, tires, recycling, polyester.		
CARACTERISTICAS			
PÁGINAS: 61	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:



Vía Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia - Código postal: 546552
 Línea gratuita nacional: 01 8000 121 022 - PBX: (+57) (7) 569 00 88
 atencionalciudadano@ufpso.edu.co - www.ufpso.edu.co

Adoquines para uso peatonal de viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster

Cristian Camilo Jácome Contreras

Nelson Joshep Maldonado Cerón

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña,

Ingeniería Civil

MSc. Fernando Jesús Regino Ubarnes

MSc. Haidee Yulady Jaramillo

Agosto 28 de 2023

Índice

Capítulo 1. Adoquines para uso peatonal de viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Formulación del Problema	11
1.3 Objetivos	12
<i>1.3.1 General</i>	12
<i>1.3.2 Específicos</i>	12
1.4 Justificación	12
1.5 Delimitaciones	14
<i>1.5.1 Geográfica</i>	14
<i>1.5.2 Operativa</i>	14
<i>1.5.3 Temporal</i>	15
Capítulo 2. Marcos Referencial	16
2.1 Marco histórico	16
<i>2.1.1 Reseña de los adoquines</i>	16
<i>2.1.2 Reseña del Caucho</i>	18
<i>2.1.3 La Resina Poliéster</i>	22
2.2 Marco Teórico	22
<i>2.2.1 Los adoquines</i>	23

	3
2.2.2 Consolidación del suelo	24
2.2.3 Explanación	24
2.2.4 Preparación del suelo de fundación de la estructura	24
2.2.5 Bordillo o cinta de confinamiento	25
2.2.6 Capa de arena	26
2.3 Marco conceptual	26
2.4 Marco legal	30
Capítulo 3. Metodología	32
3.1 Tipo de investigación	32
3.2 Población y muestra	32
3.3 Fases del proyecto	32
Capítulo 4. Presentación de resultados	36
4.1 Diseño de experimento que permita la identificación de las proporciones adecuadas de viruta de caucho reciclado y resina poliéster como material aglomerante mediante la variación de parámetros	36
4.2 Producción de adoquines a partir del diseño de mezclas y caracterizar sus propiedades mecánicas mediante pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la compresión	39
4.3 Comparación el comportamiento mecánico de los adoquines de resina poliéster obtenidos contra adoquines en arcilla para colocación como pavimentos articulados de uso peatonal.	49
Capítulo 5. Conclusiones	52
Capítulo 6. Recomendaciones	53

	4
Referencias	54
Apéndices	58

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Conversión de número de malla</i>	37
Tabla 2. <i>Relación densidad, peso, volumen</i>	42
Tabla 3. <i>Densidad de los materiales</i>	42
Tabla 4. <i>Volumen según porcentaje</i>	43
Tabla 5. <i>Peso según porcentaje</i>	43
Tabla 6. <i>Resultados de las pruebas de compresión y flexión</i>	47

Lista de figuras

Figura 1. <i>Diseño experimental</i>	38
Figura 2. <i>Diagrama del proceso de producción del adoquín</i>	40
Figura 3. <i>Molde para adoquines de jardín. Fuente: (Tubayia - 3 moldes de hormigón para encofrado, para jardín, terraza, s. f.)</i>	41
Figura 4. <i>Peso de cada uno de los porcentajes de viruta de caucho</i>	44
Figura 5. <i>Proceso de curado de la resina de poliéster</i>	44
Figura 6. <i>Adoquines para cada una de las fracciones volumétricas</i>	45
Figura 7. <i>Ensayo de resistencia a la compresión</i>	46
Figura 8. <i>Ensayo de resistencia a la flexión</i>	46
Figura 9. <i>a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión</i>	47
Figura 10. <i>a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión</i>	48
Figura 11. <i>a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión</i>	49
Figura 12. <i>Esfuerzo máximo de compresión</i>	50
Figura 13. <i>Esfuerzo de flexión.</i>	51

Lista de apéndices

Apéndice A. Cronograma de actividades	58
Apéndice B. Administración de proyecto	59

Resumen

Las llantas fuera de uso (LFU) se han convertido en una problemática ambiental que está afectando a las comunidades y al medio ambiente. Las leyes colombianas han regulado la recolección y reutilización de las llantas, por parte de proveedores, comercializadores y demás.

Varias empresas se han encargado de recibirlas, procesarlas y hacer una separación de los diferentes materiales que las componen, como el acero, fibras textiles y caucho, los cuales, posteriormente, se venden como materia prima para ser utilizada como base de nuevos productos. La mayoría de los usos que se le ha dado al caucho reciclado de LFU es principalmente para mezclas asfálticas, soportes, adoquines y láminas acústicas, a fin de favorecer la capacidad de amortiguación y aislamiento.

Esta investigación presenta los resultados de un proyecto en el cual se fabricaron adoquines a partir de una mezcla de elastómeros, con base en los parámetros de medida de la norma NTC 2017, incorporando el caucho de LFU. El objetivo del proyecto es presentar una propuesta para adecuar espacios de juegos en los hogares comunitarios, conocidos actualmente como hogares agrupados (HA) o Centros de Desarrollo Infantil (CDI) del Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF), que vele por la seguridad de niños y niñas que asisten a estos lugares.

Introducción

A lo largo del tiempo, las llantas se han convertido en una problemática mundial significativa debido a los altos residuos sólidos que se generados en Estados Unidos son desechadas, aproximadamente, 300 millones de llantas anuales; en Brasil, 30 millones, de 45 millones que son producidas, y en México, 25 millones. En el caso de Colombia, según el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, para el año 2008 el consumo fue de 4.493.092 llantas; de acuerdo con el recambio de llantas realizados cada 18 meses, los residuos generados alcanzan alrededor de 2.995.394 anuales.

Considerando que el elastómero que la compone tarda más de 100 años en degradarse, en Colombia, la mayor parte de las llantas desechadas son almacenadas en depósitos clandestinos, patios de casas, lagos, ríos y calles. El mal almacenamiento genera asentamiento y crecimiento de roedores e insectos que transmiten enfermedades perjudiciales como el dengue, la fiebre amarilla, entre otros.

En cuanto a los rellenos sanitarios, generan inestabilidad química por la degradación que sufren e impiden la compactación de residuos. El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial tiene como función regular y administrar los mecanismos necesarios para el control de los factores de deterioro del ambiente. Estudios realizados por esta entidad muestran que en Colombia se evidencia un problema de medio ambiente debido a la inadecuada disposición de desecho.

Capítulo 1. Adoquines para uso peatonal de viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster

1.1 Planteamiento del problema

En el análisis realizado por (Gerrard & Kandlikar, 2007) sobre los materiales utilizados en los vehículos de pasajeros llegaron a la conclusión que el 3,5% del peso pertenece a las llantas, mientras que el 1,6% representa el resto de productos de caucho dando a entender que la mayor parte de los residuos de caucho generados corresponden a las llantas al final de su vida útil. Según los estudios realizados por (L. Liu et al., 2020), los desechos generados por estos aumentará a 1200 millones de llantas por año hasta 2030, esto significa un aumento del 20% en los próximos 10 años.

Según (Sgobba et al., 2010), en los estados de la Unión Europea, para el año 1992, alrededor del 65% de la cantidad de llantas producida en los entonces 12 estados miembros se almacenaba en vertederos y sólo el 35% se sometía a otras metodologías de regeneración, diez años más tarde, en 2002, la situación cambió por completo en los 15 estados miembros, más del 65% de las llantas pos consumo se preparaban para su reutilización/exportación, reconstrucción, reciclaje y regeneración energética, mientras que menos del 35% se almacenaba en vertederos.

El reciclado de productos energéticos y materiales representó los dos principales tipos de regeneración y supuso el 44% del total. Lo anterior se toma como ejemplo de reutilización y aprovechamiento de los recursos reciclables, en este caso las llantas de vehículos usadas.

Se entiende que en la actualidad existen diferentes formas de disposición final de estos elementos, una forma es la trituración, esta, en 2018 fue la aplicación más recurrente para la reutilización del material, esto para luego aplicar los diversos métodos de reciclaje de neumáticos fuera de uso (Sanukrishna & Jose, 2022).

La reutilización de estos materiales se ha convertido en una oportunidad su reincorporación en los procesos productivos, ya que el aprovechamiento de estos materiales reduce su impacto al medio ambiente y disminuye los costos, y estos se pueden aprovechar en productos que no estén sometidos a un alto impacto en su uso cotidiano, prolongando su vida útil.

Los subproductos de las llantas recicladas como lo es la viruta de cucho, se pueden aprovechar de diferentes formas en el sector de la construcción, como agregado en los morteros o en el hormigón, también se utiliza en las mezclas de asfalto y en las baldosas. En este trabajo se propone el aprovechamiento del material resultado de la trituración de las llantas, mediante el desarrollo de adoquines que utilicen un polímero como aglomerante, como posible prolongación de la vida útil del cucho de las llantas recicladas.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo se puede prolongar la vida útil del caucho de las llantas recicladas en la producción de adoquines peatonales?

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Desarrollar adoquines para uso peatonal con viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster que permita extender la vida útil del cucho.

1.3.2 Específicos

Realizar un diseño de experimento que permita la identificación de las proporciones adecuadas de viruta de caucho reciclado y resina poliéster como material aglomerante mediante la variación de parámetros.

Producir adoquines a partir del diseño de mezclas y caracterizar sus propiedades mecánicas mediante pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la compresión.

Comparar el comportamiento mecánico de los adoquines de resina poliéster obtenidos contra adoquines en arcilla para colocación como pavimentos articulados de uso peatonal.

1.4 Justificación

Este proyecto tiene como propósito, indagar acerca de la aplicación de la combinación de resina de poliéster como aglomerante de la viruta de caucho de llantas recicladas en el desarrollo de adoquines para uso peatonal. Este se justifica, toda vez que a nivel mundial, las llantas de los vehículos se han convertido en un foco de contaminación cuando se da una inadecuada

disposición final de estas, el caucho de las llantas se encuentran dentro de los materiales que se pueden reciclar (Mukherjee & Kumar Mishra, 2021).

En Colombia el almacenamiento en lotes baldíos y botaderos clandestinos es en gran parte el destino de las llantas luego de su uso (Carrillo et al., 2020), las consecuencias ambientales de estas malas prácticas de disposición final se evidencian en el aumento de las diferentes enfermedades producidas por los roedores e insectos que encuentran en estos lugares un hábitat propicio para su reproducción.

Cuando las llantas usadas se almacenan en lugares inadecuados, como lotes baldíos, botaderos clandestinos, entre otros, estas generan contaminación en los suelos, afectando las fuentes hídricas y se convierten en focos de enfermedades, en este mismo sentido, se propone el aprovechamiento de estos residuos mediante la reutilización de la materia prima de las llantas usadas (Formela, 2021).

Teniendo en cuenta que el material triturado tiene diversas aplicaciones como material de absorción de impacto en el césped sintético, como recubrimiento de pisos en parques infantiles, como baldosas en escenarios deportivos como gimnasios entre otros.

Para el desarrollo de este proyecto que propone la reutilización de la viruta de caucho de llantas recicladas es necesario un material que sirva de aglomerante, diferentes investigaciones se ha utilizado la viruta de caucho como agregado en la fabricación de ladrillos utilizando cemento como aglomerante (Angeles Colin, 2015), pero las resinas son polímeros termoestables con un

amplio campo de aplicaciones y de fácil acceso debido a que su costo es relativamente bajo, entre ellas se encuentra la resina epóxica, las poliimidias, poliéster no saturado y el formaldehído, finalmente se obtiene un material rígido y puede soportar temperaturas hasta de 75 °C (Fonseca Ballesteros, 2022).

Por esto se propone el desarrollo de adoquines para uso peatonal construidos principalmente con viruta de caucho y aglomerados con resina poliéster en diferentes proporciones, tratando de identificar el aporte del granulo de caucho en cuanto a su tamaño y proporción respecto a la resina poliéster.

1.5 Delimitaciones

A continuación, se presentan las delimitaciones en las cuales se encuentra el proyecto

1.5.1 Geográfica

Este proyecto se implementó en la Universidad Francisco De Paula Santander seccional Ocaña ubicada en Ocaña, Norte de Santander.

1.5.2 Operativa

Para el diseño de este proyecto se contará con la ayuda y asesoría del ingeniero electrónico Fernando Jesús Regino Ubarnes, Msc. en Automatización Industrial, docente investigador del grupo de investigación GINSTI y director del semillero CAPSI del mismo grupo; también se

contará con la asesoría de la profesional en construcción Haidee Yulady Jaramillo, MSc. En Construcción, docente investigadora del grupo de investigación GINSTI y directora del semillero MASIC del mismo grupo y del laboratorista a cargo del laboratorio de resistencia de materiales de la universidad Francisco de Paula Santander Sede Ocaña.

1.5.3 Temporal

Este proyecto se desarrolló en las instalaciones del laboratorio de resistencia de materiales de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y tuvo una duración aproximada de 4 meses comprendido en el periodo I semestre 2023.

Capítulo 2. Marcos Referencial

2.1 Marco histórico

Este trabajo se enfoca en tres elementos de los cuales dos tienen una larga historia, los tres elementos a los que se hace referencia son, los adoquines, el caucho y la resina poliéster, por eso que el marco histórico apuntará en esa dirección. A continuación, se hace una breve reseña de cada uno de ellos.

2.1.1 Reseña de los adoquines

Los adoquines y las calles empedradas son una parte icónica y muy querida de las zonas antiguas. Estos forman parte del paisaje y son algo que ofrece un calor instantáneo de nostalgia por una época que ya casi no se recuerda.

La propia palabra "cobblestone" viene del inglés "cob" que hace referencia a objeto pequeño, redondo y con forma de bulto. Así que las piedras utilizadas en la construcción de carreteras, esas pequeñas, redondas y con forma de bulto, se conocieran como cobbles. El término se utilizó por primera vez a principios del siglo XV, cuando se construían nuevas carreteras por todo el país. Los trabajadores tenían que vadear ríos y arroyos, sumergirse en las aguas frías y sacar las piedras más redondas y resistentes.

Más tarde, el término "adoquín" pasó a significar cualquier piedra redondeada que tuviera entre 5 y 10 pulgadas de diámetro, pero en la época en que se construyeron las carreteras no se tomaban medidas.

Todo se hacía a ojo, y se encajaba como un largo y arduo rompecabezas. Los caballos y los carros habían subido y bajado por los caminos de tierra originales, entregando sus mercancías, llevando mensajes, viajando paisanos y escuderos sin problemas. Pero ese era el problema en sí. Los viejos caminos de tierra estaban desgastados, llenos de baches, necesitaban ser reparados, y el gobierno (cuando tenía el control), o los propietarios si se trataba de tierras privadas, tenían que hacer frente a grandes facturas de reparación. A menudo, los caminos eran intransitables, lo que imposibilitaba los viajes y el comercio.

Los adoquines eran una forma de asegurar que el camino o al menos una parte de él perdurara, sin importar quién o qué lo atravesara, y sin importar lo que el clima le hiciera. Los adoquines se colocaban en arena o, en algunos casos en los que el propietario era más rico, en un mortero especial.

Cada uno se elegía a mano y se dejaba caer con cuidado en el suelo. No podía haber grandes huecos ni piedras mucho más altas o pequeñas que las demás. El efecto debía ser lo más suave posible, para que los carros pudieran atravesar las calles sin accidentes, las calles adoquinadas también significaban que los peatones podían cruzar las calles sin accidentes.

La mayoría de las veces, en los viejos caminos de tierra, los cascos estruendosos del caballo y las ruedas que giraban locamente del carro se echaban encima de un pobre y desprevenido caminante antes de que éste se diera cuenta de lo que estaba pasando. Al menos, cuando el empedrado caía, el fuerte sonido de los vehículos que se acercaban les permitía apartarse con tiempo. Los adoquines fueron el primer medio de seguridad vial del país, en una época en la que no había leyes de salud y seguridad que cumplir.

Fueron los romanos los que construyeron una impresionante red de más de 80.000 kilómetros de carreteras, todas las cuales conducían realmente a Roma, y su método preferido era el uso de adoquines. Duraderas y fiables, las calles empedradas eran la única forma de viajar en la época romana (a partir del año 250 a.C., cuando se hace la primera mención registrada de lo que hoy se conoce como adoquines).

Aunque la pavimentación de las calles con adoquines ha caído en desuso, ya que los constructores de carreteras han optado por el asfalto, siempre es un placer encontrar una antigua calle adoquinada, oír el sonido de las ruedas al pasar por ella y sentir esa piedra pequeña y redonda debajo de nuestro cuerpo (Historia de los Adoquines, 2014).

2.1.2 Reseña del Caucho

El caucho es uno de los productos más importantes de la selva tropical. Aunque los indígenas de la selva tropical de Sudamérica han utilizado el caucho durante generaciones, no fue hasta 1839 cuando el caucho tuvo su primera aplicación práctica en el mundo industrial.

En ese año, Charles Goodyear dejó caer accidentalmente caucho y azufre sobre una estufa caliente, lo que hizo que se carbonizara como el cuero y siguiera siendo plástico y elástico. La vulcanización, una versión refinada de este proceso, transformó la savia blanca de la corteza del árbol Hevea en un producto esencial para la era industrial.

Con la invención del automóvil a finales del siglo XIX, comenzó el boom del caucho. Al dispararse la demanda de caucho, pequeñas ciudades fluviales como Manaus (Brasil) se transformaron de la noche a la mañana en bulliciosos centros comerciales. Manaus, situada en el Amazonas donde confluye el río Negro, se convirtió en el opulento corazón del comercio del caucho. En pocos años, Manaus contaba con el primer sistema telefónico de Brasil, 16 millas de vías de tranvía y una red eléctrica para una ciudad de un millón de habitantes, aunque sólo tenía 40.000.

La opulencia de los barones del caucho sólo podía ser superada por su brutalidad. Los árboles silvestres de Hevea, como todos los de la selva tropical primaria, están muy dispersos, una adaptación que protege a las especies del tizón de la hoja sudamericano, que se extiende fácilmente y diezma las plantaciones.

Así, para obtener beneficios, los barones tuvieron que adquirir el control de enormes extensiones de tierra. La mayoría lo hizo contratando sus propios ejércitos privados para defender sus reclamaciones, adquirir nuevas tierras y capturar a los trabajadores nativos. La mano de obra era siempre un problema, así que los barones se volvieron creativos. Un barón creó una yeguada, esclavizando a 600 mujeres indias a las que criaba como si fueran ganado. Otros

barones, como Julio César Arana, simplemente utilizaron el terror para adquirir y retener esclavos indios.

Los indios capturados solían someterse porque la resistencia sólo significaba más sufrimiento para las familias. Las chicas jóvenes eran vendidas como putas, mientras que a los hombres jóvenes se les ataba, se les vendaban los ojos y se les arrancaban los genitales. A medida que los indios morían, la producción se disparaba: en los 12 años que Arana operó en el río Putumayo, en Colombia, la población nativa se redujo de más de 30.000 a menos de 8.000, mientras que él exportaba más de 4.000 toneladas de caucho con las que ganaba más de 75 millones de dólares. Lo único que detuvo el holocausto fue la caída del mercado brasileño del caucho.

El mercado brasileño del caucho fue aplastado por el rápido desarrollo de las plantaciones de caucho más eficientes del sudeste asiático. Sin embargo, las perspectivas de desarrollo de las plantaciones no empezaron con buen pie. Las semillas de caucho, ricas en aceite y látex, no podían sobrevivir al largo viaje atlántico desde Brasil.

Finalmente, en 1876, un plantador inglés, Henry Wickham, recogió 70.000 semillas y las envió a Inglaterra. Este envío sigue siendo "una fuente de controversia". Los brasileños, olvidando convenientemente que toda su economía agrícola se basa en cinco plantas importadas -la palma aceitera africana, el café de Etiopía, el cacao de Colombia y Ecuador, la soja de China y la caña de azúcar del sudeste asiático-, siguen hablando del "robo del caucho" como un momento de infamia.

El propio Wickham, en sus memorias, dio una nota de misterio al hecho, sin duda con la intención de elevar su propio perfil a los ojos de sus compañeros.

De hecho, todas las pruebas sugieren que la exportación fue un asunto sencillo llevado a cabo al aire libre y facilitado activamente por las autoridades brasileñas en Belem." En cualquier caso, 2.800 de las semillas germinaron y fueron enviadas a Colombo, Ceilán (actual Sri Lanka).

Tras varios comienzos en falso, incluido el de un plantador del norte de Borneo que taló su plantación al no encontrar bolas de caucho colgando de las ramas, las perspectivas eran sombrías. Uno de los principales obstáculos era que el éxito del té (Ceilán) y del café (Malaya) no daba a los plantadores ninguna razón para probar un cultivo no probado.

Finalmente, en 1895, Henry Ridley, director del jardín botánico de Singapur, convenció a dos cafeteros para que plantaran dos acres (.8 ha) de árboles de Hevea.

Doce años después, más de 300.000 hectáreas de caucho crecían en plantaciones de Ceilán y Malaya.

Las nuevas innovaciones aumentaron la eficiencia y la producción se duplicó cada dos años. El caucho podía producirse a una fracción del coste de la recolección del caucho silvestre en Brasil. En 1910, la producción brasileña había caído un 50%. En 1914, la cuota de mercado de Brasil se redujo a cerca del 30%, en 1918, al 20%, y en 1940 al 1,3%. (Historia del Caucho, 2015)

2.1.3 La Resina Poliéster

Los poliésteres insaturados derivan de la patente de 1933 de Carleton Ellis, el desarrollo comercial de poliésteres para moldeo comenzó en los EE. UU. En 1941 con la introducción de una resina de colada alquímica de curado por calor. A esto le siguió una resina de laminación a baja presión (CR-39) basada en carbonato de alildiglicol y utilizada para radomos reforzados con tejido de vidrio para aeronaves.

En 1946, las resinas de poliéster que contenían estireno se utilizaron con un peróxido catalizado, lo que permitió el curado a temperatura ambiente, el llamado sistema de "curado en frío". Dichos plásticos también eran transparentes al radar y encontraron un uso inmediato para aplicaciones en tiempos de guerra. Los laminados de GRP (poliéster reforzado con fibra de vidrio) encontraron más tarde un amplio uso en la fabricación de cascos de barcos, carrocerías de vehículos de transporte por carretera y aplicaciones de construcción.

2.2 Marco Teórico

En la actualidad existen diferentes tipos de adoquines con diferentes materiales y para diferentes aplicaciones, que van desde los de arcilla hasta los de concreto. A continuación, se describen las bases teóricas acerca de adoquines, elastómeros y resinas que sustentan este trabajo.

2.2.1 Los adoquines

Los adoquines se definen según la (RAE, 2022) como “Piedra labrada en forma de prisma rectangular para empedrados y otros usos” la norma NTC 3829 establece los tipos de adoquines para pavimentar vías de tránsito liviano de acuerdo a la severidad de las condiciones de uso. Los adoquines para pavimentar vías de tránsito liviano se clasifican de acuerdo con la severidad de las condiciones de uso.

TIPO I Adoquines expuestos a alta abrasión, estos son usados en edificios públicos y comerciales. TIPO II Adoquines expuestos a una abrasión intermedia, estos son usados en lugares tales como tiendas y las calzadas exteriores. TIPO III Adoquines expuestos a una abrasión baja, estos son usados en pisos o patios de casas unifamiliares (ICONTEC, 2004).

Adoquinados modernos. Se les añaden colorantes buscando un mejor resultado estético.

Adoquín corbatín. Posibilita diferentes formas de colocación para tráfico vehicular pesado en muelles estacionamiento, vías internas y externas.

Adoquín antideslizante. Para recuperación de centros históricos. Colocado en forma de "espina de pescado" se consiguen pavimentos omnidireccionales.

Adoquín rectangular. Ideal para caminos, plazoletas y vías en donde la forma rectangular admite su mejor uso. Su sencillez en el diseño permite economías en la mano de

obra, para su colocación y a la vez flexibilidad.

Adoquín guitarra. Original por ser la más novedosa forma de adoquín en el mundo. Rompe con la monotonía de los pavimentos porque combina 2 figuras, el cuadrado y el octágono dando lugar a un pavimento con varias formas.

Adoquín ecológico gramoquin. Pavimento ideal para estacionamientos vehiculares donde se necesite tener verde y mantener el entorno. Sirve para estabilización de taludes y revestimiento de canales.

2.2.2 Consolidación del suelo

La consolidación de suelos es un proceso de disminución volumétrica de suelos de arcillas y limos plásticos, al aplicar cargas sobre su masa en un tiempo prolongado.

2.2.3 Explanación

Es la superficie uniforme en don se construirá el camino, dicha área se despeja se los desechos, rocas y escombros que impidan la uniformidad del terreno.

2.2.4 Preparación del suelo de fundación de la estructura

Se define como la base sobre la que se construirá el sendero, como parámetro de evaluación de esta capa se utiliza la capacidad de soporte o resistencia a la deformación debida

al esfuerzo cortante bajo cargas de tráfico. Las propiedades requeridas de la capa de fundación incluyen resistencia, drenaje, fácil compactación, retención de la compactación, estabilidad volumétrica, etc.

El proceso de construcción consiste en la compactación mediante una máquina de cilindros o rodillos, tras lo cual debe tomarse una muestra de la superficie para garantizar su densidad y, por último, suelen colocarse geotextiles sobre la superficie de fundación para evitar que el suelo contamine las capas granulares de la fase siguiente.

2.2.5 Bordillo o cinta de confinamiento

Las vías de adoquines necesitan un sistema de contención lateral que evite el corrimiento de las piezas, la apertura de las juntas y la pérdida de enganche entre los adoquines; Este elemento, que puede ser un bordillo, una cuneta o cualquier otra pieza similar, debe apoyarse al menos 15 cm. bajo los adoquines para conseguir una correcta fijación.

Aunque existen diversas propuestas al respecto, para este caso de investigación se propondrán bordillos prefabricados de hormigón.

Estos generalmente se extienden por todo el espesor del material base.

Pueden colocarse sobre suelo compactado (no sujeto a hinchamiento), material granular compactado o un relleno de hormigón.

2.2.6 Capa de arena

Una es una capa de arena con una pala, con el fin de obtener un asiento uniforme sin compactar, cuyo espesor varía de 3 a 5 cm. La arena es conveniente que sea de buena calidad, sin arcillas, preferiblemente lavada y más bien gruesa.

2.3 Marco conceptual

(Özalp, 2022) investigó el uso de escorias de hornos de arco eléctrico obtenidas como residuos de la industria siderúrgica en la producción de diversos elementos de hormigón en lugar de áridos naturales. Aunque hay muchos estudios sobre el uso de agregados EAF en el concreto, los estudios sobre el uso de estos agregados en la producción de elementos industriales de concreto son muy limitados.

En este contexto, se determinaron las propiedades físicas de los agregados del horno eléctrico de arco, que se separaron en tamaño de agregado natural, y se compararon con los agregados naturales. En la segunda parte del estudio, se produjeron diferentes mezclas de concreto premezclado y de consistencia seca (revenimiento cero) con agregados naturales y escorias EAF en el laboratorio, y se determinaron las propiedades del concreto fresco y endurecido de estas mezclas de concreto.

En la última parte, Se realizaron estudios sobre el uso de escorias EAF en la producción de adoquines, adoquines de concreto, en lugar de agregados naturales según los estándares de productos relacionados. Se determinó que la resistencia a la tracción por hendimiento de los

adoquines producidos con escoria EAF fue de 4,5 MPa, la resistencia a la flexión de los adoquines fue de 5,3 MPa, los valores de abrasión de todos los elementos de hormigón variaron entre 19 y 22 mm.

Los valores de absorción de agua de los adoquines fueron inferiores a los productos de referencia. Estos valores corresponden en la mayoría de los casos a las clases más altas de flexión y abrasión en las normas de productos relevantes.

Como resultado de los estudios, se pueden producir elementos industriales como adoquines con las propiedades deseadas en las normas relacionadas mediante el uso de agregados EAF. Por lo tanto, es posible contribuir al uso efectivo de los recursos naturales y la sostenibilidad mediante la producción de elementos de hormigón de alto rendimiento mediante el uso de agregados EAF.

(Y. Liu et al., 2013) habla acerca de los materiales de los adoquines de piedra, incluidos los agregados no ligados, el concreto asfáltico y el concreto de cemento Portland, juegan un papel importante en la ingeniería de pavimentos. Por lo general, se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, estacionamientos y pasarelas.

Aunque cada uno de esos materiales tiene sus propias propiedades estructurales y mecánicas únicas, todos ellos están contruidos de manera similar con un esqueleto de agregados, un medio de unión y vacíos de aire. Por lo tanto, existen algunos vínculos potenciales

entre esos materiales y algunos enfoques o teorías unificados que son adecuados para todos los materiales.

Este documento presenta una revisión exhaustiva de los esfuerzos de investigación existentes en el modelado y simulación de materiales de los adoquines de piedra con el propósito de buscar posibles vínculos entre los estudios individuales y brindar recomendaciones para estudios futuros.

La revisión incluye estudios en el área de simulación y análisis de hormigón asfáltico, hormigón de cemento Portland y materiales de base no ligados con varios métodos, incluido el método de elementos discretos, el método de elementos finitos y algunos enfoques analíticos.

A través de esta revisión, se concluyó que se han desarrollado varios métodos para modelar o simular materiales de los adoquines de piedra y la mayoría de ellos se utilizaron con fines de predicción y validación. Se esperan esfuerzos de investigación adicionales para unificar los métodos existentes y desarrollar una teoría mecánica fundamental que pueda usarse para analizar todo tipo de materiales a base de piedra y algunos enfoques analíticos.

(Hussain et al., 2021) habla acerca de que la compactación por vibro prensado de hormigón seco ha aumentado la tasa de producción de adoquines, ya que eliminó la necesidad de encofrado para mantener la mezcla de hormigón fresco en forma después del moldeado. Esta técnica también optimizó la relación costo-beneficio ya que ayuda a lograr bloques de alta resistencia con la mínima utilización de agua y cemento.

En este estudio, se estudió el efecto del polvo de escoria de acero (SSP) como material de reemplazo del cemento en las propiedades físicas y mecánicas de los adoquines. El cemento se reemplazó con SSP al 5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30% en masa. La incorporación de SSP mejoró el acabado de los adoquines.

Los resultados de las pruebas de compresión revelaron que los bloques de pavimentación que incorporan 5–15 % de SSP como reemplazo del cemento mostraron mayor resistencia que el adoquín de control. Esta mejora se atribuye enteramente al mejor empaquetamiento de las partículas constituyentes causado por el efecto de relleno de SSP.

El aumento en la velocidad del pulso ultrasónico también confirmó que 5–15 % de SSP mejoró la densidad de los adoquines. Sin embargo, la resistencia al impacto de los adoquines se redujo con el aumento del porcentaje de SSP por encima del 5%.

(Espín Lagos et al., 2018) realizaron una investigación para obtener un material compuesto de matriz resina poliéster reforzado con partículas de caucho de neumáticos reciclados con tres granulometrías diferentes variando su fracción volumétrica de 10%, 20%, 30%, 35% y 40%.

Concluyendo que la resistencia a tracción, flexión y compresión de los materiales compuestos disminuyen al aumentar el contenido de partículas de caucho, así como también el módulo de elasticidad a tracción tiende a disminuir al aumentar el contenido de las partículas y al disminuir el tamaño de partícula, mientras que el módulo de elasticidad a flexión en la

concentración volumétrica de 10%, se evidencia un incremento del 84,11% para la granulometría 1; 91,16% para la granulometría 2, y 155,93% para granulometría 3, comparado con la resina poliéster pura (sin refuerzo), por lo tanto, también se determina que aumenta su módulo de elasticidad a flexión si mayor es el tamaño de la partícula.

2.4 Marco legal

Ley 99 de 1993. “Por la cual se creó el Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial), se reordena el Sector Público 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 General Ambiental de Colombia, 1993).

“**Que el artículo 2°** de la citada ley, establece que el Ministerio es el organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables y el medio ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible” (Ley General Ambiental de Colombia, 1993).

“**Que el párrafo 2° del artículo 5°** de la citada ley, establece que le corresponde al Ministerio ejercer las demás funciones que en materia de protección del medio ambiente y los recursos naturales renovables, venían desempeñando el Instituto Nacional de los Recursos

Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA), el Ministerio de Agricultura (hoy ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural), el Ministerio de Salud (hoy Ministerio de la Protección Social), el Ministerio de Minas y Energía y el Departamento Nacional de Planeación” (República, 2010).

Decreto 1594 de 1984. En su momento reglamentó la prevención y control de la contaminación, no obstante mediante sentencia del Consejo de Estado de agosto 14 de 1992, se declararon nulos varios de sus artículos en función de los conflictos de competencias previstas en los mismos, fraccionando, desarticulando y limitando su aplicación, en la medida en que por la simple referencia de estos artículos a la sigla EMAR, los mismos fueron sacados del ordenamiento jurídico restando eficiencia y efectividad en la aplicación de este decreto (República, 2010).

Y finalmente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, crea la Resolución 1326 de 2017, en esta se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas, esta dictamina que las llantas usadas no son consideradas como un residuo peligroso; sin embargo, requieren ser devueltas a los productores mediante los mecanismos de recolección implementados, para favorecer principalmente el rencauche, el aprovechamiento y el reciclaje evitando que sean quemadas en espacios a cielo abierto y como combustible en actividades informales (Resolución 1326, 2017).

Capítulo 3. Metodología

3.1 Tipo de investigación

Para el desarrollo de este proyecto, se llevó a cabo una investigación con enfoque cuantitativo ya que presenta un orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica (Hernández et al., 2014).

Esta investigación es de carácter Científico-Experimental debido a que permite manipular y controlar las variables de investigación. El diseño de esta investigación se cataloga como una investigación aplicada, puesto que se utilizarán los conocimientos adquiridos en la etapa de formación profesional para el desarrollo de este.

3.2 Población y muestra

Para este proyecto sugirió como mínimo 3 muestras del material, con el fin de obtener resultados con mayor certeza.

3.3 Fases del proyecto

El proyecto estuvo contemplado para desarrollarse en tres fases, una por cada objetivo específico. La idea es que en cada fase se detallan las actividades necesarias para alcanzar el

objetivo correspondiente, asumiendo que la correcta realización de dichas actividades conlleva a alcanzar el respectivo objetivo.

Para lograr los objetivos se propone un diseño experimental debido a que será posible obtener la información requerida a través de una descripción exacta de las actividades y procesos para realizar los diseños necesarios, especificando las propiedades importantes y relevantes para el desarrollo experimental del sistema, en el cual se analizan los datos obtenidos por medio de las pruebas físico- mecánicas del material compuesto a realizar en este proyecto.

Para el cumplimiento de los objetivos de este proyecto y de esta metodología se establecen 3 fases a desarrollar:

Fase 1: Realizar *un diseño de experimento que permita la identificación de las proporciones adecuadas de viruta de caucho reciclado y resina poliéster como material aglomerante mediante la variación de parámetros*. En esta fase se hace la relación de los conceptos teóricos, científicos y matemáticos correspondientes al problema planteado. Para esto de plantean las siguientes actividades:

Actividad 1. Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de adoquines.

Actividad 2. Realizar un diseño de experimento que permita establecer las proporciones de los materiales en sus respectivas fracciones volumétricas

Actividad 3. Realizar la caracterización del caucho a utilizar y establecer los tamaños de la fibra (granulometría)

Actividad 4. Establecer la forma y las medidas de los adoquines.

Fase 2: Producir adoquines a partir del diseño de mezclas y caracterizar sus propiedades mecánicas mediante pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la compresión.

En esta fase se determinará cual es el sistema más adecuado para realizar el proceso de construcción de las probetas con los materiales y las cantidades seleccionadas teniendo en cuenta las fracciones volumétricas previamente establecidas.

Actividad 1. Recopilación de información científica sobre los diferentes tipos de construcción de muestras de resina.

Actividad 2. Realización de las probetas con diferentes porcentajes de material ya establecidos.

Actividad 3. Construcción de los moldes de los adoquines según la geometría establecida

Fase 3: Comparar el comportamiento mecánico de los adoquines de resina poliéster obtenidos contra adoquines en arcilla para colocación como pavimentos articulados de uso peatonal.

En esta fase se valida el sistema de probetas propuesto, para ello se plantean las siguientes actividades.

Actividad 1. Realizar pruebas de resistencia a la compresión, módulo de rotura y absorción de agua, según lo establece la norma NTC 5282

Actividad 2. Análisis de desempeño de las muestras obtenidas en las pruebas físicas realizadas, teniendo en cuenta los criterios de la norma NTC 5282.

Capítulo 4. Presentación de resultados

Como respuesta a la pregunta problema ¿Cómo se puede prolongar la vida útil del caucho de las llantas recicladas en la producción de adoquines peatonales? Se propuso desarrollar adoquines para uso peatonal con viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster que permita extender la vida útil del cucho. Se realizaron tres fases, las cuales llevaron a responder la pregunta inicial al desarrollar adoquines de viruta de caucho y resina poliéster.

4.1 Diseño de experimento que permita la identificación de las proporciones adecuadas de viruta de caucho reciclado y resina poliéster como material aglomerante mediante la variación de parámetros

En la primera fase se estableció como objetivo realizar un diseño de experimento que permita la identificación de las proporciones adecuadas de viruta de caucho reciclado y resina poliéster como material aglomerante mediante la variación de parámetros. Teniendo en cuenta que del material tamizado se obtuvieron tres tamaños de muestras, se realizó un diseño de experimento para desarrollar las pruebas.

Diseño de experimento

La granulometría en la determinación del tamaño de la viruta de caucho, esto se hace, pasando el material particulado a través de tamices de diferentes medidas (Ver tabla 1), separando las partículas por tamaño. Para el caso de estudio se realizó dicho proceso dando como

resultado tres tamaños de muestras las cuales corresponden a las mallas número 6, 8 y 10. Del proceso de tamizado se obtuvieron tres clases de muestras las cuales se denominaron G1 para las partículas de 3.35mm de tamaño aproximado, G2 a las de 2.38mm y G3 a las de 2 mm, según la tabla 1.

Tabla 1

Conversión de número de malla

Número Malla (U.S. STD. Sieve)	Abertura (mm)	Abertura (pulg)
4	4.76	0.187
5	4.00	0.157
6	3.35	0.132
8	2.38	0.0937
10	2.00	0.0787
12	1.68	0.0661
14	1.41	0.0555
16	1.19	0.0469
18	1.00	0.0394
20	0.841	0.0331
25	0.707	0.0278
30	0.595	0.0234
35	0.500	0.0197
40	0.420	0.0165
45	0.354	0.0139
50	0.297	0.0117
60	0.250	0.0098
70	0.210	0.0083
80	0.177	0.0070
100	0.149	0.0059
200	0.074	0.0029
325	0.044	0.0017
400	0.037	0.0014

Nota. Autores del proyecto

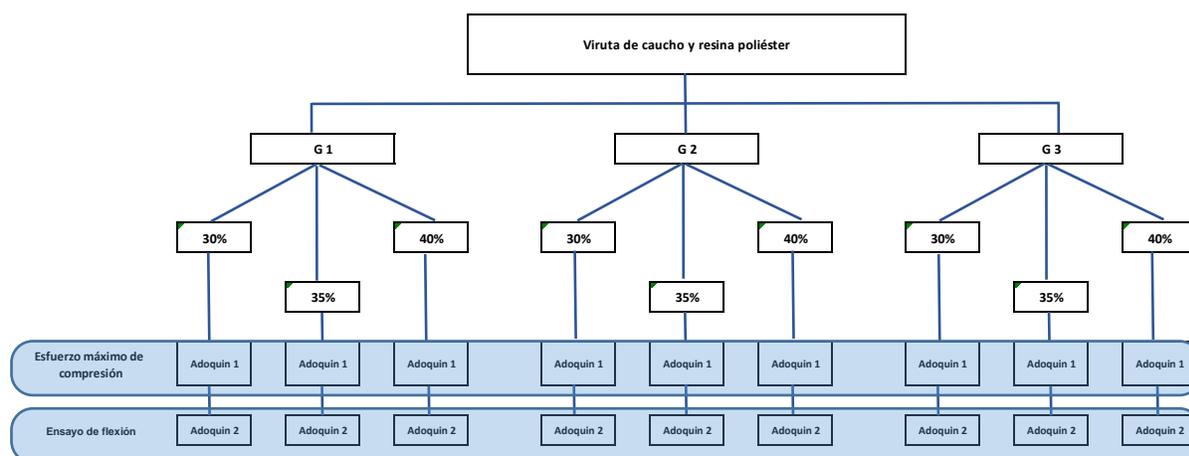
Según el tamaño de las muestras se organizó el experimento de la siguiente manera:

Lo primero es determinar la relación volumétrica entre resina y viruta de caucho, de acá se establecen tres proporciones 70%-30%, 65%-35% y 60%-40% en donde el menor porcentaje corresponde al material de viruta de caucho, estas proporciones se tomaron como referencia de acuerdo a lo establecido por (Acosta Benavides, 2018).

Establecido los tres tamaños de las muestras y las tres proporciones de resina poliéster y viruta de caucho y se construyen dos muestras, una para las pruebas correspondientes y se tabulan los resultados, la figura 1 muestra el diagrama de organización del diseño de experimento.

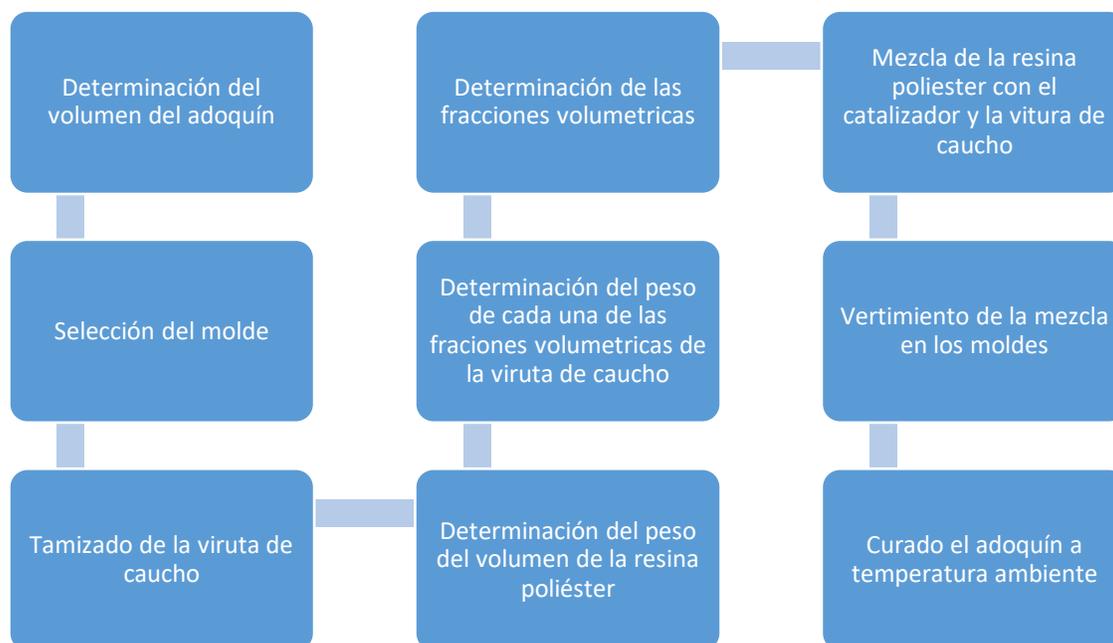
Figura 1.

Diseño experimental



Nota. Autores del proyecto

4.2 Producción de adoquines a partir del diseño de mezclas y caracterizar sus propiedades mecánicas mediante pruebas de resistencia a la flexión y resistencia a la compresión

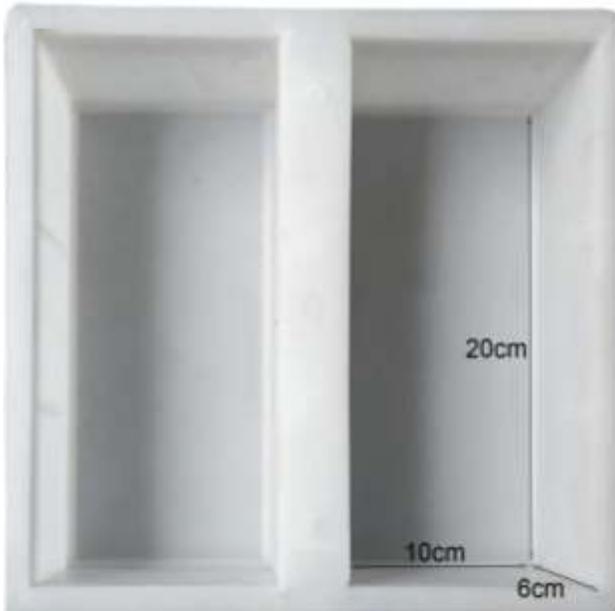
Figura 1.*Diagrama del proceso de producción del adoquín*

Nota. Autores del proyecto

En esta fase se presentan los resultados iniciando con la determinación del tamaño del adoquín, para ello se utilizó un molde para adoquines de jardín (figura3), teniendo en cuenta que el uso final es peatonal, y la NTC3829 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004) establece que los adoquines tipo III son los usados en pisos o patios de casas unifamiliares y sus medidas son de 0.2m x 0.1m x 0.06m para un volumen de $1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

Figura 2.

Molde para adoquines de jardín. Fuente: (Tubayia - 3 moldes de hormigón para encofrado, para jardín, terraza, s. f.)



Nota. Autores del proyecto

La determinación del volumen es el primer paso para la determinación de las fracciones volumétricas, estas se determinan teniendo en cuenta las densidades de los materiales.

La tabla 2, presenta la relación existente entre densidad, peso y volumen de un material compuesto como lo establece (Acosta Benavides, 2018): “Por definición la relación entre el volumen y el peso del compuesto van a ser igual a la densidad del material compuesto, por lo tanto, los pesos y volúmenes tanto de las partículas y la matriz están vinculados por las siguientes relaciones.”

Tabla 2.*Relación densidad, peso, volumen*

Relación Densidad - Peso - Volumen	
$p_c = \rho_c v_c$ (1)	Donde: ρ_c : densidad del compuesto ρ_p : densidad de las partículas ρ_m : densidad de la matriz
$p_p = \rho_p v_p$ (2)	
$p_m = \rho_m v_m$ (3)	

Nota. Autores del proyecto

De las relaciones anteriormente mencionadas se tiene que:

$$P_p = \frac{(\rho_m + \rho_p)}{\rho_p} V_p \quad (4)$$

$$P_m = \frac{(\rho_m + \rho_p)}{\rho_p} V_m \quad (5)$$

En primer lugar, se estableció la densidad de cada uno de los componentes las cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3.*Densidad de los materiales*

Material	Densidad en $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
Viruta de caucho	450
Resina poliéster	1200
Material compuesto	1650

Nota. Autores del proyecto

Con los datos mostrados anteriormente, se tiene que si el volumen del adoquín es de $1.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ se halla los pesos de casa una de los porcentajes requeridos. Lo primero es indicar a que volumen hace referencia el 30, 35 y 40% en relación al volumen total, y se tiene que:

Tabla 4.

Volumen según porcentaje

Porcentaje	Volumen (mm³)
30%	0.36
35%	0.42
40%	0.48

Nota. Autores del proyecto

Lo segundo que se realizó fue hallar los pesos según los volúmenes previamente establecidos, para esto se utilizaron las relaciones densidad masa volumen de las ecuaciones 4 y 5, por lo que el peso de la viruta de caucho según su porcentaje en la relación volumétrica se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.

Peso según porcentaje

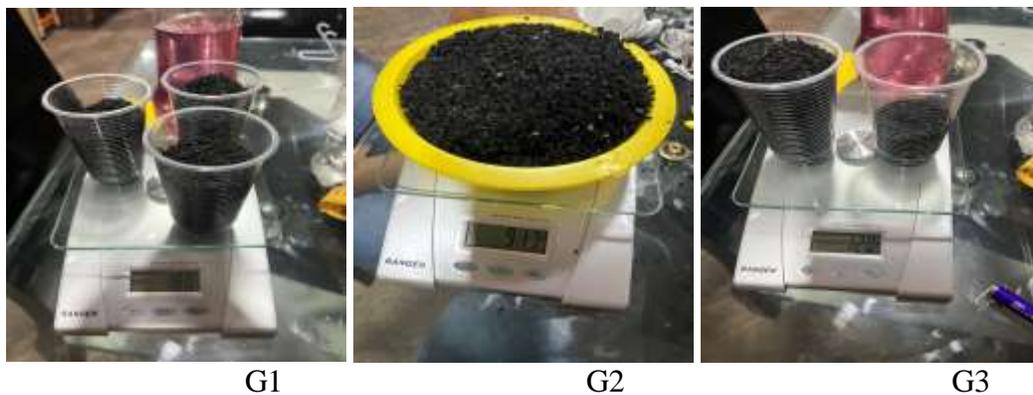
Porcentaje	Peso (Kg)
30%	1.32
35%	1.54
40%	1.76

Nota. Autores del proyecto

Ya establecido el peso de cada uno de los porcentajes de viruta de caucho (figura 4) se procedió a armar los adoquines.

Figura 3.

Peso de cada uno de los porcentajes de viruta de caucho

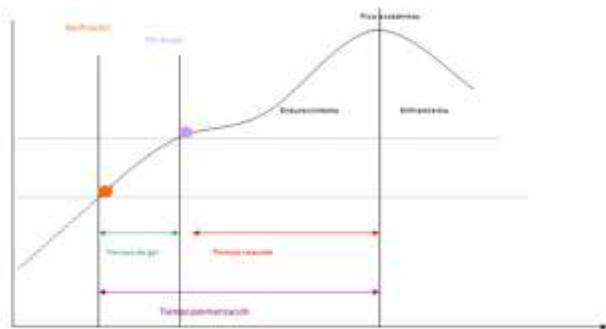


Nota. Autores del proyecto

El proceso de curado de la resina poliéster consta de dos etapas la primera es la gelificación en donde el material tiene la consistencia de un gel y toma la forma del contenedor, luego pasa la etapa de endurecimiento o tiempo de reacción de donde se desprende calor hasta que el material queda totalmente curado.

Figura 4.

Proceso de curado de la resina de poliéster

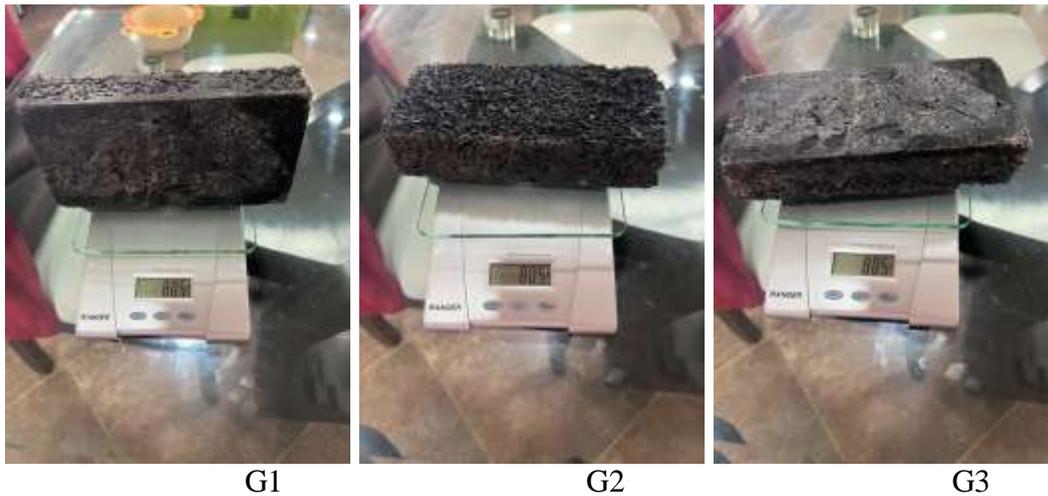


Nota. Autores del proyecto

Teniendo claro el proceso de curado de la resina se arman los adoquines mezclando las proporciones de viruta de caucho y resina poliéster en el molde con las medidas establecidas, la figura 5 muestra los adoquines con cada una de las granulometrías (G1, G2, G3).

Figura 5.

Adoquines para cada una de las fracciones volumétricas



Nota. Autores del proyecto

Armados los adoquines se realizan las pruebas de resistencia a la compresión y a flexión, el ensayo de compresión es un procedimiento enfocado a determinar la resistencia de un material, así como su deformación ante un esfuerzo de compresión.

Este ensayo se realiza en concretos y metales, o en cualquier material al que se desee medir su resistencia, para este caso se realizó a una velocidad de 0.05MPa/s. La finalidad de este ensayo comprende en medir la resistencia a la compresión, como se muestra en la figura 7.

A la hora de realizar el ensayo se tuvo en cuenta la posición del adoquín, buscando el lado más débil de este sobre el cual se pudiese ejercer mayor presión, de ahí que se ubicó sobre su área menor como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6.

Ensayo de resistencia a la compresión

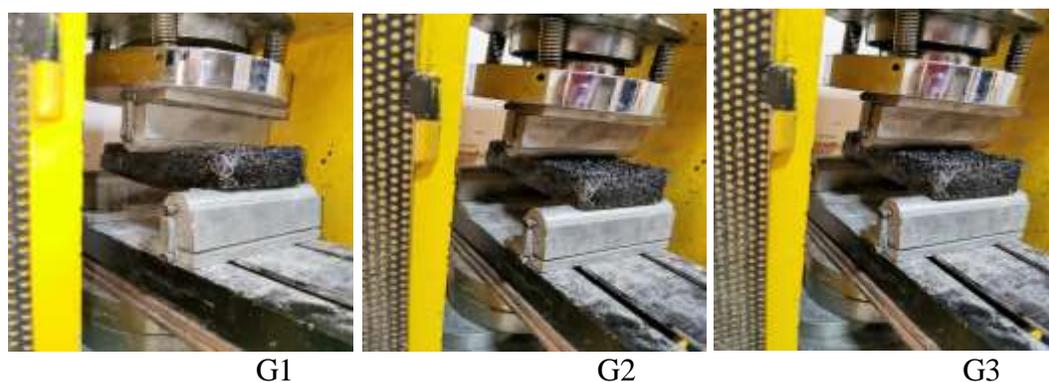


Nota. Autores del proyecto

El ensayo de flexión permite evaluar el comportamiento ante la flexión de un material, se considera flexión a la deformación que presenta un elemento sobre dirección perpendicular a su eje longitudinal como se observa en la figura.

Figura 7.

Ensayo de resistencia a la flexión



Nota. Autores del proyecto

Los resultados a las pruebas realizadas se muestran listados en la tabla 6.

Tabla 6.

Resultados de las pruebas de compresión y flexión

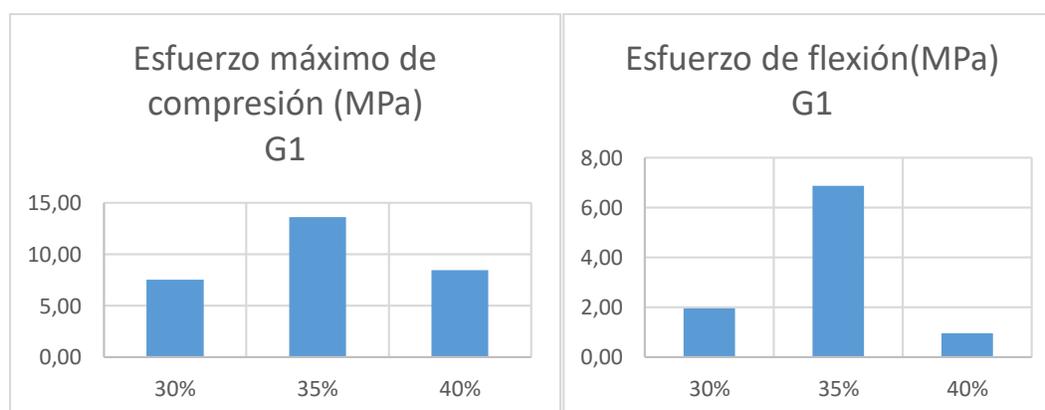
Granulometría	Concentración Volumétrica del caucho	Esfuerzo máximo de compresión (MPa)	Esfuerzo de flexión (MPa)
G1	30%	7,56	1,96
	35%	13,60	6,88
	40%	8,46	0,96
G2	30%	10,29	2,95
	35%	7,57	3,15
	40%	9,26	2,87
G3	30%	8,80	1,13
	35%	9,76	0,87
	40%	7,92	0,18

Nota. Autores del proyecto

La figura 9 se muestran los datos para el tamaño de viruta G1, para este tamaño de granulo presenta mejores resultados la fracción volumétrica de 35% de viruta de caucho.

Figura 8

a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión



a)

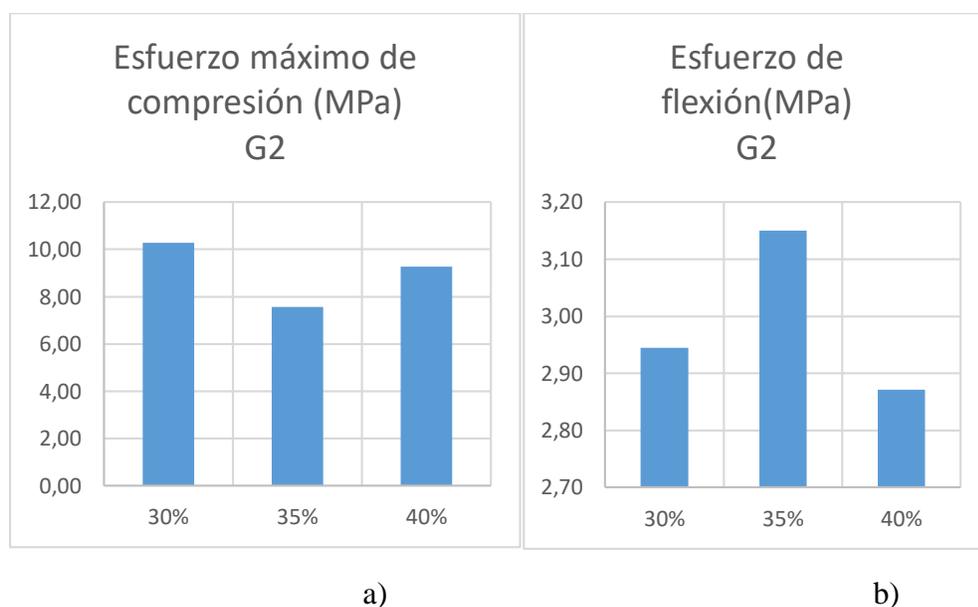
b)

Nota. Autores del proyecto

La figura 10 se muestra los datos para el tamaño de viruta G2, para este tamaño de granulo presenta mejores resultados la fracción volumétrica de 30% de viruta de caucho para la compresión, pero la fracción volumétrica de 35% de viruta de caucho presenta mejor resultado en la flexión.

Figura 9

a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión

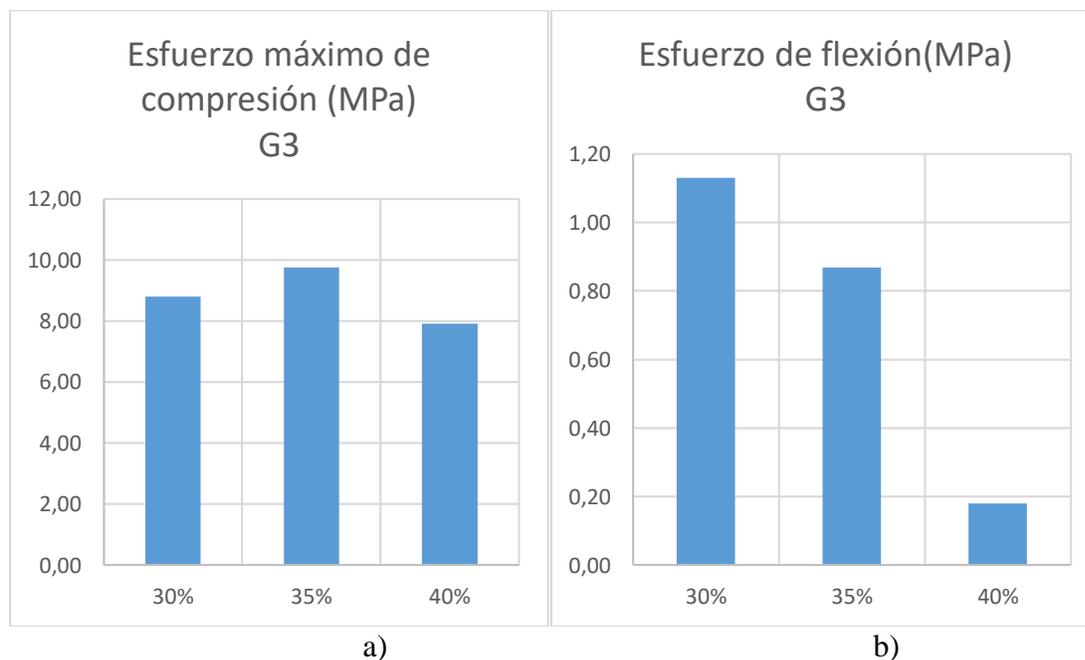


Nota. Autores del proyecto

La figura 11 se muestran los datos para el tamaño de viruta G3, para este tamaño de granulo presenta mejores resultados la fracción volumétrica de 35% de viruta de caucho para la compresión, pero la fracción volumétrica de 30% de viruta de caucho presenta mejor resultado en la flexión.

Figura 10

a) Esfuerzo máximo de compresión b) Esfuerzo de flexión



Nota. Autores del proyecto

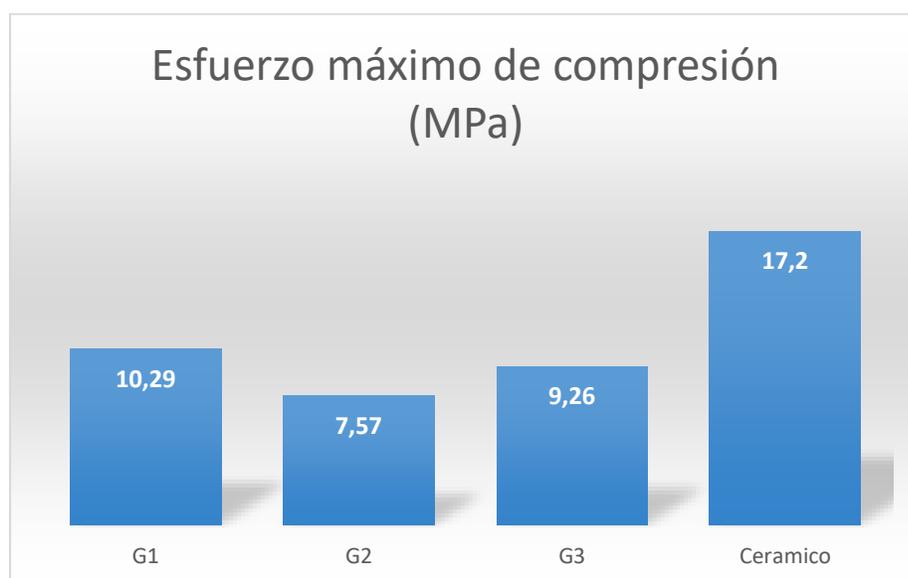
4.3 Comparación el comportamiento mecánico de los adoquines de resina poliéster obtenidos contra adoquines en arcilla para colocación como pavimentos articulados de uso peatonal

En la tercera fase se estableció como objetivo, comparar el comportamiento mecánico de los adoquines de resina poliéster obtenidos contra adoquines en arcilla para colocación como pavimentos articulados de uso peatonal. En esta fase se presentan los resultados de la comparación de los mejores resultados.

En la figura 12 se presenta la comparación de los mejores resultados de la resistencia a la compresión, respecto a la fracción volumétrica G1, G2, G3 con un adoqueín convencional de arcilla cocida según la norma NTC3829 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2004). La diferencia en los resultados se da debido a la composición de cada uno de los adoquines de muestra, por su parte los adoquines de resina poliéster se espera que tengan un buen resultado debido a sus propiedades plásticas que mejoran su desempeño al mezclarse con el caucho, aun así, en cuanto a la resistencia a la compresión no alcanzan el estándar de la norma NTC3829.

Figura 11.

Esfuerzo máximo de compresión



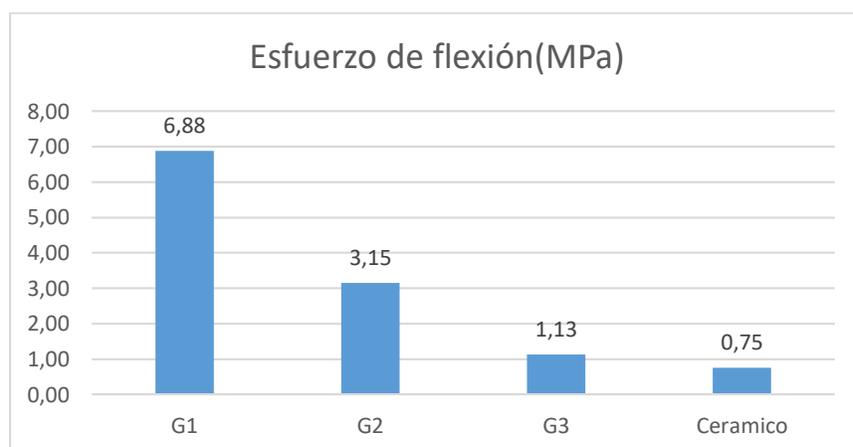
Nota. Autores del proyecto

En la figura 13 se presenta la comparación de los mejores resultados de la resistencia a la flexión, respecto a la fracción volumétrica G1, G2, G3 con un adoqueín convencional de arcilla cocida según la norma NTC3829. La diferencia evidente en los resultados se da debido a la

composición de cada uno de los adoquines de muestra, por su parte los adoquines de resina poliéster se espera que tengan un mejor resultado debido a sus propiedades plásticas que mejoran su desempeño al mezclarse con el caucho.

Figura 12.

Esfuerzo de flexión.



Nota. Autores del proyecto

Teniendo en cuenta que la norma técnica colombiana NTC3829 clasifica los adoquines de acuerdo a el rigor de las condiciones de uso en tres categorías, la de uso peatonal es de tipo III, dicha norma establece las condiciones físicas que estos deben cumplir, y establece dos ensayos en particular, resistencia a la compresión y absorción de agua durante 24 horas a temperatura ambiente. Para los adoquines tipo III la resistencia mínima a la compresión es de 17.2MPa, y no presenta límites en el porcentaje de absorción de agua, se hace énfasis que la norma no exige el ensayo de flexión a tres puntos, pero este se realizó ya que estaba exequible.

Capítulo 5. Conclusiones

La problemática planteada inicialmente, en cuanto a la extensión de la vida útil del caucho de las llantas usadas el objetivo desarrollar adoquines para uso peatonal con viruta de caucho de llantas recicladas y resina de poliéster que permita extender la vida útil del cucho. En cuanto a esto se puede decir que se cumplió a cabalidad con el objetivo, ya que se construyó un prototipo de adoquín, el cual utiliza resina poliéster y viruta de caucho.

En cuanto al diseño de experimento, este se realizó de tal forma que se pudiera evaluar las diferentes características, se realizó una revisión bibliográfica y se determinaron tres porcentajes de fracciones volumétricas para cada tamaño (G1, G2, G3) las fracciones determinadas fueron 30%-70%, 35%-65%, 40%-60% siendo el porcentaje menor de la relación el correspondiente a la viruta de caucho de llantas usadas.

La producción de los adoquines se realizó con las medidas volumétricas de los adoquines de jardín, ya que estos son de uso peatonal, se aplicaron las pruebas de resistencia a la compresión, y resistencia a la flexión, concluyendo que la granulometría G1 presenta los mejores resultados, es decir que a mayor tamaño de la viruta de refuerzo mejoran las propiedades mecánicas.

Capítulo 6. Recomendaciones

Al comparar los resultados de los ensayos realizados a los adoquines de resina poliéster y viruta de caucho de llantas usadas con los adoquines de arcilla cocida, se ve claramente que las propiedades de los adoquines propuestos no son mejores que los de arcilla si se hace referencia a lo establecido por la norma NTC3829, ya que para la finalidad de estos solo establece el ensayo de resistencia a la compresión como único requisito.

Analizando los resultados del ensayo de resistencia a la flexión los adoquines de resina poliéster y viruta de caucho superan a los de arcilla cocida, esto debido a las propiedades elásticas de la resina poliéster las cuales se ven mejoradas con la adición del refuerzo de viruta de caucho.

Referencias

- Acosta Benavides, C. N. (2018). *Análisis de las características mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con partículas de caucho de neumáticos reciclados y su incidencia en las propiedades mecánicas.*
- Angeles Colin, S. (2015). *ELABORACIÓN DE LADRILLOS A PARTIR DE NEUMÁTICOS DE REUSO.* INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- Carrillo, J., Lizarazo-Marriaga, J., & Lamus, F. (2020). Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Either Industrial or Recycled Fibers from Waste Tires. *Fibers and Polymers*, 21(9), 2055–2067. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1076-1>
- Espín Lagos, S. M., Guamanquispe, J., Acosta, C., Jara Olmedo, A., León, G., & Sevilla, M. (2018). CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO DE RESINA POLIESTER CON PARTÍCULAS DE CAUCHO RECICLADO Y SU APLICABILIDAD EN CARROCERIAS. *Ciencia Digital*, 2(2), 47–61. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v2i2.72>
- Fonseca Ballesteros, H. C. (2022). *ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO POR UNA MATRIZ DE RESINA POLIÉSTER Y FIBRA NATURAL DE COCO PARA SU CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TENSIÓN Y FLEXIÓN* [FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA]. [https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8974/1/4171252-2022-2-IM .pdf](https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8974/1/4171252-2022-2-IM.pdf)

- Formela, K. (2021). Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4(3), 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.004>
- Gerrard, J., & Kandlikar, M. (2007). Is European end-of-life vehicle legislation living up to expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on ‘green’ innovation and vehicle recovery. *Journal of Cleaner Production*, 15(1), 17–27.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.06.004>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación. Capítulos ampliados*. (P. Baptista (ed.)). Online Learning Center; McGraw-Hill Education.
https://books.google.com/books/about/Metodología_de_la_investigación.html?id=oLbjoQEACAAJ
- Historia de los Adoquines. (2014). *Historia de los adoquines*. 11 julio, 2014.
<https://civilgeeks.com/2014/07/11/historia-de-los-adoquines/>
- Historia del Caucho. (2015, agosto 10). *Historia del Caucho*.
<https://globalrubbercorporation.com/blog/119-historia-del-caucho>
- Hussain, I., Ali, B., Rashid, M. U., Amir, M. T., Riaz, S., & Ali, A. (2021). Engineering properties of factory manufactured paving blocks utilizing steel slag as cement replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00755.

<https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00755>

ICONTEC. (2004). *Ntc 5282 Adoquin De Arcilla Para Trafico Vehicular Pesado*. 1–12.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). *Ntc 3829*.

Ley General Ambiental de Colombia, (1993).

https://www.oas.org/dsd/fida/laws/legislation/colombia/colombia_99-93.pdf

Liu, L., Cai, G., Zhang, J., Liu, X., & Liu, K. (2020). Evaluation of engineering properties and environmental effect of recycled waste tire-sand/soil in geotechnical engineering: A compressive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *126*, 109831.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109831>

Liu, Y., You, Z., Li, L., & Wang, W. (2013). Review on advances in modeling and simulation of stone-based paving materials. *Construction and Building Materials*, *43*, 408–417.

<https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.02.043>

Resolución 1326, 1 (2017). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>

Mukherjee, K., & Kumar Mishra, A. (2021). Recycled waste tire fiber as a sustainable reinforcement in compacted sand–bentonite mixture for landfill application. *Journal of*

Cleaner Production, 329, 129691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129691>

Özalp, F. (2022). Effects of electric arc furnace (EAF) slags on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 329, 127159. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127159>

RAE. (2022). *adoquín* | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE. <https://dle.rae.es/adoquín>

Sanukrishna, S. S., & Jose, V. M. (2022). Evaluation of thermal and rheological characteristics of CNT-PAG nanolubricant for the development of energy efficient refrigeration systems. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.080>

Sgobba, S., Marano, G. C., Borsa, M., & Molfetta, M. (2010). Use of rubber particles from recycled tires as concrete aggregate for engineering applications. *2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, March 2021*, 465–475.

Tubayia - 3 moldes de hormigón para encofrado, para jardín, terraza. (s. f.). Amazon. Recuperado 2 de agosto de 2023, de <https://www.amazon.es/Tubayia-moldes-hormig%C3%B3n-encofrado-terraza/dp/B07Y1K59Q3>

Apéndices

Apéndice A. Cronograma de actividades

En la tabla 1, se muestra el tiempo destinado para cada una de las actividades de las fases del proyecto a realizar. El tiempo del cronograma se encuentra dado en meses.

ACTIVIDADES	M1	M2	M3	M4
Fase 1				
Recopilación de información científica sobre el proceso de producción de adoquines				
Realizar un diseño de experimento que permita establecer las proporciones de los materiales en sus respectivas fracciones volumétricas				
Realizar la caracterización del caucho a utilizar y establecer los tamaños de la fibra (granulometría)				
Fase 2				
Recopilación de información científica sobre los diferentes tipos de construcción de muestras de resina.				
Realización de las probetas con diferentes porcentajes de material ya establecidos.				
Construcción de los moldes de los adoquines según la geometría establecida				
Fase 3				
Realizar pruebas de resistencia a la compresión, módulo de rotura y absorción de agua, según lo establece la norma NTC 5282				
Análisis de desempeño de las muestras obtenidas en las pruebas físicas realizadas, teniendo en cuenta los criterios de la norma NTC 5282.				

Fuente: Autores del proyecto

Apéndice B. Administración de proyecto

Recursos Humanos.

El proyecto está liderado por los estudiantes **Cristian Camilo Jácome Contreras** y **Nelson Joshep Maldonado Cerón**, contando con el apoyo del docente **Fernando Jesús Regino Ubarnes Msc.** en Automatización Industrial, docente investigador del grupo de investigación GINSTI y director del semillero CAPSI del mismo grupo; también se contará con la asesoría de la profesional en construcción Haidee Yulady Jaramillo, MSc. En Construcción, docente investigadora del grupo de investigación GINSTI y directora del semillero MASIC del mismo grupo y del laboratorista a cargo del laboratorio de resistencia de materiales de la universidad Francisco de Paula Santander Sede Ocaña.

Recursos Financieros.

El desarrollo de esta investigación, requiere de un presupuesto de dos millones doscientos cuarenta mil pesos (\$ 2.240.000,00) los cuales fueron aportados por los estudiantes del proyecto por ende se distribuyeron como se muestra en la tabla 8, la cual se divide en equipos y materiales que se muestran en la tabla 9 y 10 respectivamente.

Valor global del proyecto

RUBRO	UFPSO	CONTRAPARTIDA		TOTAL
	Efectivo	Efectivo	Especies	
Materiales e insumos				
Adquisición o arrendamiento de herramientas y equipos no disponibles para el desarrollo del proyecto de investigación.	\$ -	\$ -	\$ 1.800.000,00	\$ 1.800.000,00
Reactivos y material de laboratorio	\$ -	\$ 390.000,00	\$ -	\$ 390.000,00

Papelería y útiles de escritorio	\$ -	\$ 50.000,00	\$ -	\$ 50.000,00
TOTAL	\$ -	\$ 440.000,00	\$ 1.800.000,00	\$ 2.240.000,00

Nota. Fuente. Autores del proyecto.

Equipos y herramientas

EQUIPOS Y HERRAMIENTAS	UFPSO	CONTRAPARTIDA		TOTAL
	Efectivo	Efectivo	Especies	
Computador portátil	\$ -		\$ 1.800.000,00	\$ 1.800.000,00
TOTAL	\$ -	\$ -	\$ 1.800.000,00	\$ 1.800.000,00

Nota. Fuente. Autores del proyecto.

Reactivos y materiales

REACTIVOS Y MATERIALES	UFPSO	CONTRAPARTIDA		TOTAL
	Efectivo	Efectivo	Especies	
Resina poliéster		\$ 150.000,00		\$ 150.000,00
Viruta de caucho		\$ 70.000,00		\$ 70.000,00
Formaleta en madera		\$ 90.000,00		\$ 90.000,00
Materiales varios		\$ 80.000,00		\$ 80.000,00
TOTAL	\$ -	\$ 390.000,00	\$ -	\$ 390.000,00

Nota. Fuente. Autores del proyecto.

Papelería y Útiles de escritorio

Papelería y Útiles de escritorio	UFPSO	CONTRAPARTIDA		TOTAL
	Efectivo	Efectivo	Especies	
Papelería e impresiones		\$ 50.000,00		\$ 50.000,00
TOTAL	\$ -	\$ 50.000,00	\$ -	\$ 50.000,00

Nota. Fuente. Autores del proyecto.