



**CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN  
DE ADOQUINES DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CAUCHO DE  
LLANTAS RECICLADAS CON FINES DE COMERCIALIZACIÓN EN  
LA CIUDAD DE SANTA MARTA, COLOMBIA.**

**FRANCISCO JAVIER TRONCOSO MELENDEZ**

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA**

Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Civil  
Santa Marta D.T.C.H, Colombia  
2020



**CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN  
DE ADOQUINES DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CAUCHO DE  
LLANTAS RECICLADAS CON FINES DE COMERCIALIZACIÓN EN LA  
CIUDAD DE SANTA MARTA, COLOMBIA.**

**FRANCISCO JAVIER TRONCOSO MELENDEZ**

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director (a):

Ing. Albeiro Díaz Valera

Esp. Gerencia de proyectos de Ingeniería, Esp. Análisis y Gestión Ambiental MSc. Ingeniería  
Ambiental

Línea de Investigación:

Grupo de Investigación de Ingeniería Civil

**UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA**

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Santa Marta D.T.C.H, Colombia

2020

## **Nota de aceptación**

**Aprobado por el Consejo de Programa en cumplimiento de los requisitos exigidos por el Acuerdo Superior N°11 DE 2017 y Acuerdo Académico N° 41 de 2017 para optar al título de Ingeniero Civil de la Universidad del Magdalena.**

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Santa Marta, \_\_\_\_ de \_\_\_\_ del \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo no pudo ser realizado sin ayuda de muchas personas a las cuales les brindo este pequeño homenaje:

A él Ingeniero Mario Pinzón Ávila por abrir las puertas de su empresa, por su generosidad al donarnos los materiales para realizar este proyecto, por ser un excelente ser humano y profesional.

A todo el equipo de trabajo de la Comercializadora la Samaria por brindar su ayuda para esta investigación.

Al tutor de la investigación el Ingeniero Albeiro Díaz Valera por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación, así como su apoyo en cualquier cosa que se necesitara.

A los ingenieros Edgardo Diaz, Jaanay Yauro y Kelly Miranda por brindarme su apoyo en el Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil.

A todos mis amigos que estuvieron siempre atentos a como avanzaba en la investigación y el apoyo que me brindaban destacando a Bladimir Villa por brindarme su ayuda.

A mis padres Francisco Troncoso y Rosmery Melendez, por apoyo incondicional en cualquier cosa que necesitara.

A la ingeniera Madeleine Cantillo por siempre brindarme su ayuda.

## RESUMEN

En la actualidad la reutilización y reciclaje de residuos debe contribuir en la incorporación de nuevos productos; un material que se puede aprovechar es el caucho reciclado de llantas usadas, debido a que la acumulación de material puede presentar diferentes problemas, como lo son la contaminación de aguas, inconvenientes cancerígenos cuando se quema, la propagación de hábitat de roedores y la reproducción de moscos transmisores de enfermedades como el dengue, fiebre amarilla y la encefalitis equina (Báez, 2018).

En el presente trabajo de investigación se tiene como objetivo principal evaluar las propiedades mecánicas de adoquines de concreto con adición de caucho de llantas recicladas y el costo de su elaboración para su comercialización en la ciudad de Santa Marta, Colombia. Para cumplir con este objetivo se realizó inicialmente ensayo granulométrico del caucho reciclado para luego realizar mezclas de mortero con adición de material reciclado en diferentes proporciones, teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por la Comercializadora la Samaría S.A.S.

Posteriormente se sometieron a ensayos de resistencia a la flexo-tracción, densidad y absorción de agua. Todos los ensayos fueron basaron en la Norma Técnica Colombiana (NTC).

Luego se realizó una comparación entre los adoquines de concreto convencional y adoquines con adición de material reciclado. Además de elaborar una relación entre el porcentaje de adición de material reciclado con su resistencia, absorción de agua y densidad.

Obteniendo para los adoquines convencionales, con adición de caucho reciclado 5%, 10% y 20% un módulo de rotura promedio a los 27 días, de 2.90 Mpa, 1.91 Mpa, 1.39 Mpa y 0.61 Mpa, respectivamente y una absorción de agua promedio de 7.67%, 10.38%, 12.53% y 15.91%.

Finalmente se realizó una evaluación económica de cada una de las mezclas que se presentaron en el presente trabajo y para ver su potencial de comercialización en la ciudad de Santa Marta.

**Palabras claves:** Material reciclado, adoquines, resistencia a la flexo-tracción, densidad, absorción de agua.

## ABSTRACT

Currently the reuse and recycling of waste should contribute to the incorporation of new products, a material that can be used is recycled rubber from used tires, since this accumulation of material can present different problems, such as contamination of waters, carcinogenic problems when burned, the spread of rodent habitats and the reproduction of mosquitoes that transmit diseases such as dengue, yellow fever and equine encephalitis (Báez, 2018).

The main objective of this research work is to evaluate the mechanical properties of concrete pavers with the addition of rubber from recycled tires and the cost of their elaboration for their commercialization in the city of Santa Marta, Colombia. To meet this objective, a granulometric test of the recycled rubber was initially carried out, and then mortar mixes were added with recycled material in different proportions, taking into account the recommendations given by Comercializadora la Samaría S.A.S.

Subsequently, they underwent flexo-tensile strength, density and water absorption tests. All the trials were based on the Colombian Technical Standard (NTC).

A comparison was then made between conventional concrete pavers and pavers with the addition of recycled material. In addition to elaborating a relationship between the percentage of addition of recycled material with its resistance, water absorption and density.

Obtaining for the conventional paving stones, with the addition of 5%, 10% and 20% recycled rubber, an average modulus of rupture at 27 days, of 2.90 Mpa, 1.91 Mpa, 1.39 Mpa and 0.61 Mpa, respectively, and an average water absorption of 7.67%, 10.38%, 12.53% and 15.91%.

Finally, an economic evaluation of each of the mixtures presented in this work was carried out and to see their commercialization potential in Santa Marta city..

**Keywords:** Recycled material, pavers, flexotraction strength, density, water absorption.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	v
ABSTRACT.....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE GRÁFICOS .....	xii
LISTA DE ILUSTRACIONES.....	xiii
INTRODUCCION .....	14
1. CAPITULO 1 .....	16
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2. JUSTIFICACION .....	17
1.3. OBJETIVOS .....	19
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	19
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	19
2. CAPITULO 2.....	20
2.1. ANTECEDENTES .....	20
2.2. MARCO TEORICO.....	21
2.2.1. ADOQUINES .....	21
2.2.2. GRANULO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS FUERA DE USO .....	30
2.2.3. ENSAYOS PARA ADOQUÍN.....	33
2.2.3.1. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCION.....	33
2.2.3.2. ABSORCIÓN.....	33
3. CAPITULO 3.....	34
3.1. METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	34
3.1.1. DISEÑO DE MEZCLA.....	34
3.1.2. MATERIALES .....	36
3.1.2.1. CEMENTO.....	36
3.1.2.2. AGREGADOS NATURALES .....	36
3.1.2.3. AGREGADO RECICLADO.....	36
3.1.3. METODOS DE ENSAYO .....	37
3.1.3.1. GRANULOMETRIA .....	37
3.1.3.2. RESISTENCIA A FLEXOTRACIÓN.....	39
3.1.3.3. ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD .....	42
3.2. RESULTADOS.....	44



3.2.1.	DIMENSIONES PROMEDIO .....	44
3.2.2.	RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN .....	48
3.2.3.	ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD .....	60
3.2.4.	GRANULOMETRÍA .....	68
3.2.5.	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	68
4.	CAPITULO 4.....	71
4.1.	CONCLUSIONES .....	71
	BIBLIOGRAFÍA .....	72

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de miga de caucho .....	32
Tabla 2 Diseño de mezcla de adoquines de concreto convencionales .....	35
Tabla 3 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 5% de granulo de caucho reciclado .....	35
Tabla 4 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 10% de granulo de caucho reciclado .....	35
Tabla 5 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 20% de granulo de caucho reciclado .....	35
Tabla 6 Etiquetas de diferentes tipos de adoquines.....	39
Tabla 7 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Testigo).....	45
Tabla 8 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 5%) .....	45
Tabla 9 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 10%) .....	45
Tabla 10 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 20%) .....	45
Tabla 11 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Testigo).....	46
Tabla 12 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 5%) .....	46
Tabla 13 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 10%) .....	46
Tabla 14 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 20%) .....	46
Tabla 15 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Testigo).....	47
Tabla 16 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 5%) .....	47
Tabla 17 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 10%) .....	47
Tabla 18 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 20%) .....	47
Tabla 19 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Testigo) .....	48
Tabla 20 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 5%).....	49
Tabla 21 Tabla 15 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 10%) .....	49
Tabla 22 Tabla 15 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 20%) .....	49
Tabla 23 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Testigo) .....	49
Tabla 24 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 5%).....	50
Tabla 25 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 10%).....	50
Tabla 26 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 20%).....	50
Tabla 27 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Testigo) .....	50
Tabla 28 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 5%).....	51
Tabla 29 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 10%).....	51
Tabla 30 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 20%).....	51
Tabla 31 Resultados estadísticos de resistencia a la flextracción a 5 días .....	54
Tabla 32 Resultados estadísticos de resistencia a la flextracción a 13 días .....	55
Tabla 33 Resultados estadísticos de resistencia a la flextracción a 27 días .....	57
Tabla 34 Masas de los especímenes (Testigo) .....	60
Tabla 35 Masas de los especímenes (Caucho 5%).....	60

Tabla 36 Masas de los especímenes (Caucho 10%).....	61
Tabla 37 Masas de los especímenes (Caucho 20%).....	61
Tabla 38 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Testigo).....	62
Tabla 39 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 5%) ...	62
Tabla 40 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 10%) .	62
Tabla 41 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 20%) .	62
Tabla 42 Resultados estadísticos de absorción de agua .....	63
Tabla 43 Resultados estadísticos de densidad .....	66
Tabla 44 Granulometría del granulo de caucho reciclado.....	68
Tabla 45 Costo de materia prima (Adoquín de concreto) .....	69
Tabla 46 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)..	69
Tabla 47 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)..	69
Tabla 48 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)..	70

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Modulo de rotura por espécimen (Testigo) .....	52
Gráfico 2	Modulo de rotura por espécimen (Caucho 5%) .....	52
Gráfico 3	Modulo de rotura por espécimen (Caucho 5%) .....	53
Gráfico 4	Modulo de rotura por espécimen (Caucho 5%) .....	53
Gráfico 5	Resultados de resistencia a la flextracción a 5 días.....	54
Gráfico 6	Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 5 días .....	55
Gráfico 7	Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flextracción a 5 días .....	55
Gráfico 8	Resultados de resistencia a la flextracción a 13 días.....	56
Gráfico 9	Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 13 días .....	56
Gráfico 10	Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flextracción a 13 días ..	57
Gráfico 11	Resultados de resistencia a la flextracción a 27 días.....	58
Gráfico 12	Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 27 días .....	58
Gráfico 13	Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flextracción a 27 días ..	59
Gráfico 14	Resultados de resistencia a la flextracción.....	59
Gráfico 15	Resultados de absorción agua .....	63
Gráfico 16	Absorción vs Adición de caucho reciclado .....	64
Gráfico 17	Línea y Ecuación de Tendencia de absorción de agua.....	64
Gráfico 18	Absorción vs Módulo de Rotura .....	65
Gráfico 19	Línea y Ecuación de Tendencia de Absorción vs Módulo de Rotura .....	65
Gráfico 20	Resultados de absorción agua .....	66
Gráfico 21	Densidad vs Adición de caucho reciclado .....	67
Gráfico 22	Línea y Ecuación de Tendencia de absorción de agua.....	67

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Vía Apia: Pavimento de Piedra .....	23
Ilustración 2 Adoquín Tipo 1: Rectangular recto .....	25
Ilustración 3 Adoquín Tipo 1: Rectangular angulado .....	26
Ilustración 4 Adoquín Tipo 1: Rectangular ondulado .....	26
Ilustración 5 Adoquín Tipo 1: Uni-Decor .....	26
Ilustración 6 Adoquín Tipo 1: Super Decor .....	26
Ilustración 7 Adoquín Tipo 1: Doble hexágono o corbatín .....	27
Ilustración 8 Adoquín Tipo 1: “V” .....	27
Ilustración 9 Adoquín Tipo 2: “I” .....	27
Ilustración 10 Adoquín Tipo 2: “Cruz” .....	28
Ilustración 11 Adoquín Tipo 2: “Volverbund” .....	28
Ilustración 12 Adoquín Tipo 2: “Trebol” .....	28
Ilustración 13 Adoquín Tipo 3: Clásico .....	29
Ilustración 14 Adoquín Tipo 3: Simetría .....	29
Ilustración 15 Adoquín Tipo 3: Figura .....	29
Ilustración 24 Granulo de caucho reciclado .....	38
Ilustración 16 Etiquetado y medición de los adoquines .....	39
Ilustración 17 Adoquines etiquetados .....	40
Ilustración 18 Adoquines antes de inmersión .....	40
Ilustración 19 Adoquín antes de aplicar la carga .....	41
Ilustración 20 Adoquín una vez aplicada la carga última .....	41
Ilustración 21 Adoquines en el horno .....	42
Ilustración 22 Toma de masa de adoquines .....	43
Ilustración 23 Masa sumergida de adoquines .....	44

## INTRODUCCION

Dentro de los diferentes tipos de pavimentos, los pavimentos articulados son una de las alternativas más prácticas tanto para su construcción, así como su mantenimiento. Por ser contruidos con adoquines, estos presentan una alta resistencia a las cargas concentradas, a la abrasión los agentes atmosféricos, además de ser reutilizables cuando se requiere su remoción para ejecutar trabajos subterráneos (Sanchez F.). Debido a su gran variedad de colores y formas, este tipo de pavimentos es muy utilizado por arquitectos en el desarrollo de proyectos paisajísticos; además de ser utilizado ampliamente en la revitalización de centros históricos, como se puede ver en el centro histórico de la ciudad de Santa Marta (Bittencourt, 2012).

Por otro lado, la discusión actual acerca de la problemática ambiental causados por los residuos de la construcción ha llevado a la creación de numerosas investigaciones que involucran la utilización de diferentes materiales en la fabricación de las piezas de adoquines con el fin de tratar de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales.

Ciertamente, la discusión de la sostenibilidad es resultado de una larga evolución de la precepción que la raza humana ha venido causando transformaciones no previstas en la naturaleza. Algunos temas como el calentamiento global, el agujero en la capa de ozono, sobre los cuales la ciencia ha venido reuniendo una considerable cantidad de evidencias, son ejemplos claros de estas consecuencias. Siendo el hombre parte de la naturaleza, estas transformaciones afectan la calidad de vida e inclusive la supervivencia de la especie.

La construcción civil es uno de los sectores que provocan un mayor impacto ambiental, debido al elevado consumo de materia prima. Por otro lado, las actividades relacionadas con la construcción civil son grandes generadoras de la polución ambiental. Por ejemplo, en la producción de 1 tonelada de

cemento Portland, es emitida 1 tonelada de Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmosfera, siendo este uno de los mayores responsables del efecto invernadero (Bilodeau & Malhotra, 2000).

La meta es la reducción de residuos sólidos generados en la construcción, pero en algunos casos no existe la posibilidad de eliminarlos totalmente. Es por ello, que una alternativa para el problema de la generación de residuos sería la reutilización o el reciclaje, que hace posible la reducción de los residuos, además un ahorro de la energía, sobre todo en el área de la construcción civil.

Con el fin de contribuir a la reducción del problema ambiental, expresada anteriormente se puede considerar la incorporación de caucho reciclado como un componente en las mezclas convencionales de mortero. Es lógico pensar en la fabricación de adoquines con adición de GCR (Grano de caucho reciclado) para ser usados en estructuras que se soporten bajo tráfico vehicular o tráfico peatonal como por ejemplo: andenes, zonas peatonales y plazas, vías internas de urbanización, entre otros.

En este proyecto se evalúan las características más importantes de los adoquines con diferentes porcentajes de material reciclados, como su porcentaje de absorción de agua, densidad y la resistencia a la flexo-tracción, además de realizar una evaluación económica de estos.

# **1. CAPITULO 1**

## **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La generación de neumáticos usados y la dificultad que existe para reciclarlas, es una de las graves problemáticas de contaminación ambiental y salud pública por la que están atravesando muchas de las ciudades de nuestro país (Plazas & Gamba, 2015).

La acumulación de los neumáticos puede causar daños muy serios al medio ambiente, debido a que llegan a tardar varios siglos en degradarse, a su vez genera afectaciones a la salud pública, debido a que por su forma pueden acumular agua lo cual es propenso a la proliferación de vectores biológicos. Una de las soluciones que se les han dado es la incineración del caucho, sin embargo, pueden tardar mucho tiempo en quemarse, además de la contaminación que produce la emisión este tipo de gases (Castro, 2007).

En Colombia actualmente se implementó una resolución 1326 de 2017, la cual tiene por objeto prevenir y controlar la degradación del medio ambiente por el exceso de neumáticos fuera de uso. Esto ha obligado al país al crear nuevas alternativas para el uso neumáticos reciclados, algunos de estas alternativas han sido:

- Su uso en parques como elementos decorativos, pisos, asientos, entre otros.
- Escenarios deportivos
- En carreteras como parte del ligante asfáltico.

No obstante, estas alternativas no son suficiente para cubrir la gran cantidad de residuos que se generan, es por esto que se ha visto la necesidad de desarrollar nuevas alternativas para el reciclaje de este tipo de material.



## 1.2. JUSTIFICACION

En esta era de rápido desarrollo y crecimiento económico, la gestión de los residuos es de gran preocupación para la población, según estadísticas la mayor parte de caucho de desecho se producen debido a los neumáticos fuera de uso, a pesar de eso, solo una parte de estos desechos se recicla.

La opción de utilizar residuos de caucho de neumáticos se justifica principalmente por el impacto ambiental que este produce. Los desechos de llantas se pueden definir como sólidos particularmente intratables, debido a su descomposición lenta, lo que puede desencadenar efectos dañinos y adversos si se queman (Ardila, A. N., & Arriola, E, 2017), además del hecho de que presentan un riesgo potencial de incendio y son visualmente indeseables.

De acuerdo a la guía para el manejo de llantas usadas de la cámara de comercio de Bogotá, la disposición final que se le da a neumáticos fuera de uso contribuye, en la actualidad un muy grave problema ambiental y a la salud pública. Es por esto, que para detener la acumulación de este residuo es indispensable reciclar los neumáticos de una forma ambientalmente segura.

Teniendo en cuenta que en Colombia y en el caso particular de Santa Marta, Según Ruedaverde no existen suficientes recicladoras para hacer frente a la gran cantidad de neumáticos generados y acumulados, así como la incipiente demanda de este tipo de material reciclado. Se ha optado por la implementación de este desecho en adoquines de mortero y así contribuir a la reutilización de este desecho, algunas de las ventajas que puede generar la producción de adoquines con adición de caucho reciclado pueden ser:

- Reducción de un gran volumen de neumáticos fuera de uso.
- Reducción de la emisión de gases contaminantes a la atmosfera, debido a la minoración de la quema de neumáticos.
- Prologar la vida útil de los rellenos sanitarios

Teniendo en cuenta estas ventajas, la elaboración y resultados de este trabajo, pueden resultar muy útiles para que los neumáticos fuera de uso dejen de ser un problema ambiental y a la salud pública, además de pasar a ser una nueva fuente de material alternativo para la construcción civil.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Caracterizar la resistencia a la flexotracción de adoquines de concreto con adición de caucho de llantas recicladas con el fin de su comercialización en la ciudad de Santa Marta, Colombia.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Identificar las características de los materiales a emplear en la mezcla de concreto hidráulico con la que se elaboraran los adoquines.
- Evaluar el comportamiento de los adoquines de concreto con adición de caucho por medio de su absorción, densidad y resistencia a la flexo-tracción.
- Analizar los costos relacionados con la elaboración de adoquines de concreto con adición de caucho para su viabilidad en su comercialización, teniendo las propiedades mecánicas evaluadas.

## **2. CAPITULO 2**

### **2.1. ANTECEDENTES**

Existen varias investigaciones encaminadas a lo mismo, lo cual es la implementación de diferentes tipos de materiales reciclados a adoquines de mortero o concreto. Para la realización de la presente investigación, fueron consultados algunos trabajos referentes a la incorporación de material reciclado a adoquines.

En primer lugar, la investigación cuyo objetivo general es Desarrollar un adoquín que cumpla las características físicas y mecánicas de los adoquines que actualmente se encuentran en el mercado de la construcción, a través del uso de una mezcla de concreto hidráulico que contenga caucho triturado producto del reciclaje de llantas usadas como porción de agregado fino con el fin de crear una alternativa de reúso de este caucho que contribuya a reducir el impacto que estos generan al medio ambiente (Plazas & Gamba, 2015, p15). Esta investigación estaba encaminada en analizar las propiedades mecánicas de adoquines con adición de caucho reciclado en tres proporciones diferentes.

A su vez, la investigación con objetivo Evaluar el comportamiento mecánico en los adoquines de concreto hidráulico, al sustituir el 5,10 y 15% del agregado fino retenido en cada uno de los tamices No 8, 10, 12 y 20 (2,36mm - 0,85 mm), por granulo de caucho de llanta reciclada GCR, en porcentajes de 5, 10 y 15% con adición de polvo de Microsílice respecto al peso del cemento de la mezcla en porcentajes de 3, 6, 9% (Pacheco & Morelo, 2018, p22). En esta investigación además de la adición de caucho reciclado, se adicionó Microsílice, en diferentes proporciones, para luego, realizar ensayos para medir las propiedades mecánicas de los adoquines.

## **2.2. MARCO TEORICO**

### **2.2.1. ADOQUINES**

#### **2.2.1.1. ORIGEN**

Algunos datos históricos muestran que los pueblos al pasar de los siglos se vieron en la necesidad de construir caminos, senderos o atajos con el objetivo de generar algún tipo de comunicación entre los pueblos y colonias.

Los pueblos etruscos dominaron Italia en el período comprendido entre 800 y 350 a. C. A estos pueblos se les atribuye ser pioneros en la construcción de caminos específicos con el fin de transportar personas y carga entre las aldeas y las colonias de la época. Las técnicas utilizadas por los etruscos tenían como objetivo conectar largas distancias, con la preocupación de garantizar la comodidad y la resistencia a través de una superficie más plana posible, utilizando los materiales disponibles y conocidos en ese momento. Las calles de las ciudades etruscas alcanzaron los 15 metros de ancho y en su revestimiento se añadió piedra de mano, junto con un material más fino, con el objetivo de permitir a las personas una mayor seguridad con respecto al tobogán, en presencia de agua en la superficie. (CRUZ, 2003).

Gran parte del conocimiento de los etruscos sobre la construcción de carreteras fue heredado por los romanos, lo que contribuyó en gran medida a la expansión de su Imperio. Los caminos romanos se construyeron de varias maneras, de acuerdo con su importancia y uso esperado, disponibilidad local de materiales para construcción, clima y topografía. Los materiales utilizados como revestimientos para caminos de larga distancia generalmente estaban compuestos de suelos arenosos mezclados con piedras naturales como el guijarro. Piedras cortadas a mano en formas rectangulares y poligonales eran usadas en los revestimientos de las calles más utilizadas de la ciudad. En 500 a.C, Roma había desarrollado con bases granulares estabilizadas y una capa de soporte de piedra (Knapton, 1996; Atlas Globo,1995).

Cruz (2003) relató que los caminos romanos construidos en la región de "Bretaña", ahora conocida como Inglaterra, tenían características únicas. Se construyeron terraplenes en el terreno natural, para obtener una mayor visibilidad contra los posibles ataques de los "británicos", como se conocía a los pueblos que originalmente habitaban "Bretaña", considerados muy hostiles. El material utilizado en el vertedero se extrajo de excavaciones paralelas a los caminos, que indirectamente formaron un canal en ambos lados y a lo largo de todos los caminos, sirviendo como drenaje natural.

Según (Cruz 2003) Los romanos también reconocieron la importancia de los tipos de arena utilizados en la construcción de caminos. Existen informes de clasificación de arenas como arenas fluviales, extraídas de canales y suelos naturales. Hubo una propuesta de mezcla entre ellos, junto con la cal o la piedra caliza, formando así un tipo de mortero en el que más tarde se rodaron guijarros o incluso piedras de mano en el camino. Esta experiencia ya demostró la preocupación con la capacidad estructural de las capas.

En el periodo de 150 a.C, fue descubierto en la ciudad italiana de "Puzzeoli" un material conocido en ese momento como "puzzolana". Rápidamente se dio cuenta de que este material utilizado junto con el mortero de cal y arena tenía una resistencia mecánica considerable con el tiempo. Esto evolucionó hacia lo que ahora se conoce como cemento portland.

En la historia del pavimento romano, la importancia del uso de piedras talladas a mano, que sirvió como el revestimiento final de la carretera, es clara. Un ejemplo de esta tecnología que resiste hoy es el camino de Apia, un precursor del pavimento entrelazado que se muestra en la ilustración 1, que era un camino importante que conectaba la ciudad de Roma con el sur de Italia. Una gran parte del camino de Apia fue pavimentada por los constructores de la época con pequeños pedazos de piedras en forma octogonal (Atlas Globo, 1995)



Ilustración 1 Vía Apia: Pavimento de Piedra  
(Fuente: [www.romasegreta.it](http://www.romasegreta.it))

Con el pasar de los siglos, los caminos fueron utilizados básicamente para fines mercantiles, modificando así las cargas transportadas, exigiendo cada vez más una capa de revestimiento. Luego se pasó a la construcción de caminos con piedras talladas.

De acuerdo con Shackel (1990), la naturaleza de las piezas utilizadas como capa de revestimiento variaba en función de la oferta de los materiales locales. El proceso evolutivo de las piezas puede ser representado básicamente por 4 tipos de materiales:

- Piezas de arcilla
- Piezas de madera
- Piezas de piedra tallada manualmente
- Piezas de concreto

#### **2.2.1.2. DEFINICION**

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 2017 (NTC 2017) un adoquín de concreto es un elemento no aligerado en su masa, de concreto, prefabricado, con forma de prisma recto, cuyas bases son polígonos tales que un conjunto permite conformar una superficie que se utiliza como capa de rodadura en los pavimentos y en algunos casos, en los pisos recubiertos con adoquines de concreto.

### **2.2.1.3. CLASIFICACION**

Según la Norma Técnica Colombiana 2017 (NTC 2017, 2004) los adoquines se clasifican según la geometría general y según la masa de concreto:

#### **2.2.1.3.1. SEGÚN LA GEOMETRIA GENERAL**

##### **2.2.1.3.1.1. DEBIDO A LA UNIDAD**

- Adoquín estándar

Es el adoquín que en conjunto conforma una superficie continua, a excepción de la junta estándar. Por lo general, se denomina simplemente como adoquín.

- Sistema de adoquines

Combinación de dos o más formas o tamaños de adoquines, por razones estéticas o constructivas

- Adoquín drenante

Es el adoquín que dada su forma genera en las juntas, zonas con un ancho mayor que el de la junta estándar para efectos de drenaje de la superficie a través de dichas zonas; o que posee separadores con dimensiones mayores que las especificadas para la junta estándar o que se coloca con separadores con otros materiales.

- Unidad complementaria

Unidad producida con el propósito de generar una junta recta en la capa de adoquines, cuya forma corresponde a una porción precisa de adoquín.

- Unidad especial

Unidad producida con el propósito de generar una junta recta en la capa de adoquines. Cuya forma no necesariamente está asociada a la de un adoquín.



#### 2.2.1.3.1.2. DEBIDO A SUS ARISTAS

- Adoquín biselado

Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en algunas de sus aristas

- Adoquín parcialmente biselado

Es el adoquín en el cual la cara de desgaste está limitada por un bisel en algunas de sus aristas

- Adoquín no biselado, prismático

Es el adoquín sin bisel ni otra modificación en las aristas de la cara de desgaste

#### 2.2.1.3.1.3. DEBIDO A LOS SEPARADORES

- Adoquín con separadores

Es el adoquín producido con separadores

- Adoquín sin separadores

Es el adoquín producido sin separadores

#### 2.2.1.3.1.4. DEBIDO A LA FORMA

- Adoquín tipo 1, adoquín rectangular

Es el adoquín con una forma única, básicamente rectangular, que se puede colocar siguiendo diversos patrones. Algunas de las variantes de forma de adoquín Tipo 1 son los adoquines: recto, angulado, ondulado, octógono más cuadrado, octógono más cuadrado con proyecciones, doble hexágono y el “V”.

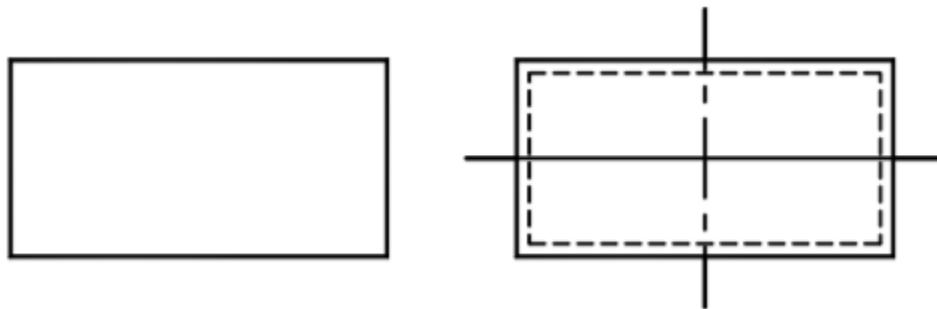


Ilustración 2 Adoquín Tipo 1: Rectangular recto  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

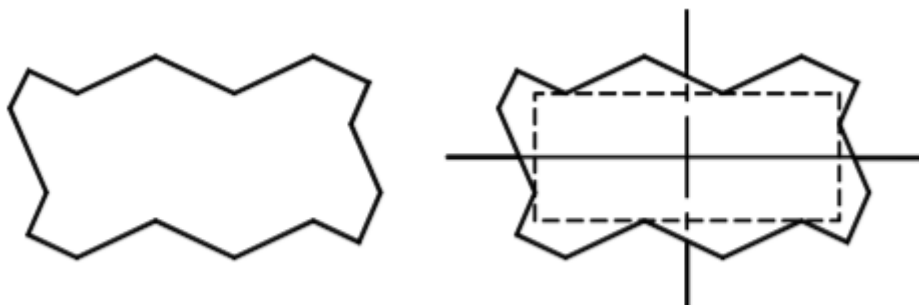


Ilustración 3 Adoquín Tipo 1: Rectangular angulado  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

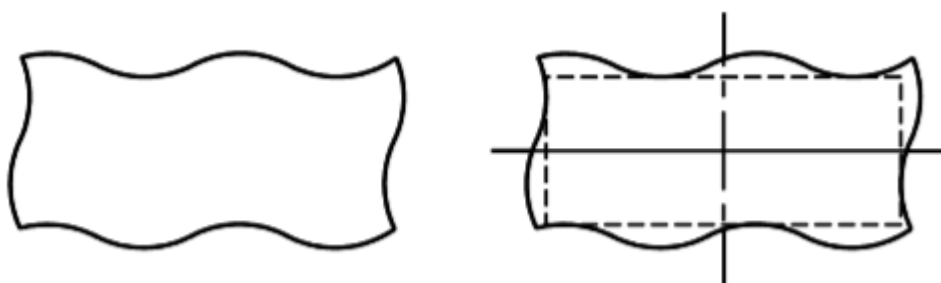


Ilustración 4 Adoquín Tipo 1: Rectangular ondulado  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

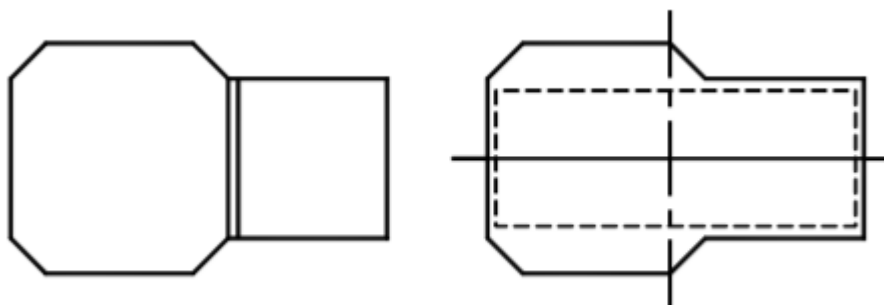


Ilustración 5 Adoquín Tipo 1: Uni-Dekor  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

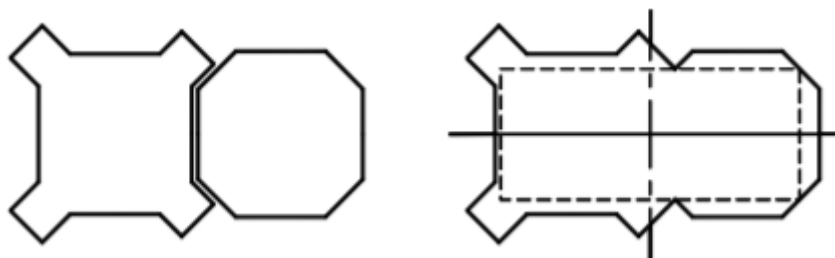


Ilustración 6 Adoquín Tipo 1: Super Dekor  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

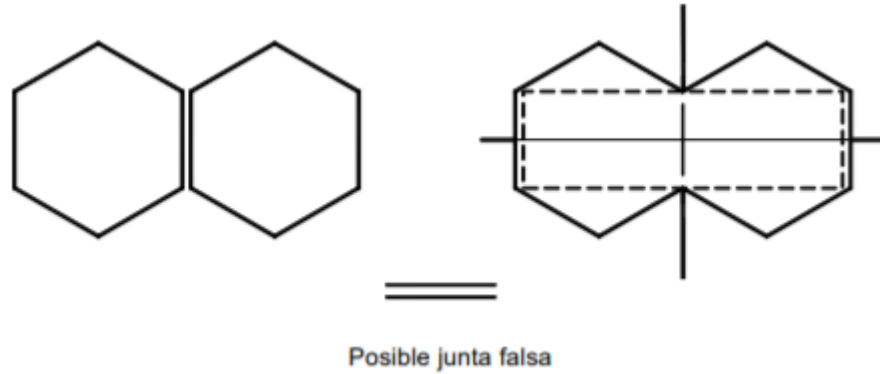


Ilustración 7 Adoquín Tipo 1: Doble hexágono o corbatín  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

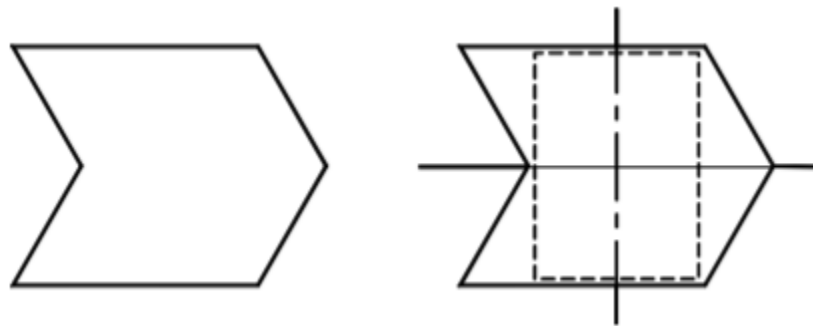


Ilustración 8 Adoquín Tipo 1: "V"  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

- Adoquín tipo 2, adoquín no rectangular

Es el adoquín con forma única, diferente a la rectangular, que solo se puede colocar siguiendo un patrón de colocación de hiladas. Algunas de las variantes del adoquín Tipo 2 son los adoquines con forma de: "I", "Cruz", "Vollverbund", "S" y "Trébol".

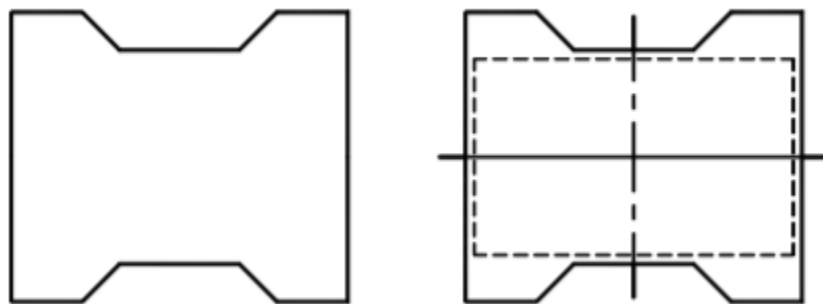


Ilustración 9 Adoquín Tipo 2: "I"

(Fuente: NTC 2017, 2004)

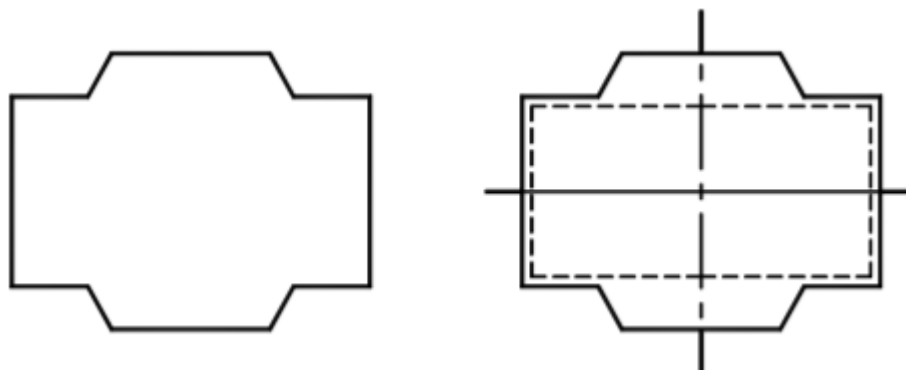


Ilustración 10 Adoquín Tipo 2: “Cruz”  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

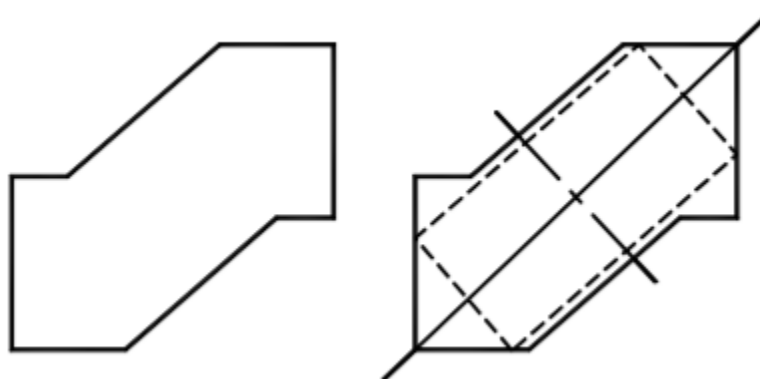
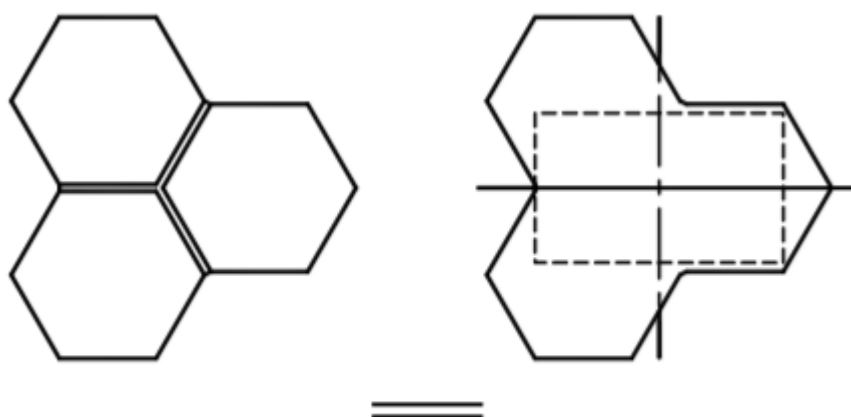


Ilustración 11 Adoquín Tipo 2: “Volverbund”  
(Fuente: NTC 2017, 2004)



Posible junta falsa

Ilustración 12 Adoquín Tipo 2: “Trebol”  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

- Adoquín tipo 3, sistema de adoquines

Son los adoquines de dos o más formas que conforman una superficie completa siguiendo uno o varios patrones de colocación. Algunas de las variantes de forma del adoquín Tipo 3 son los sistemas: “Clásico”, “Simetría” y “Figura”

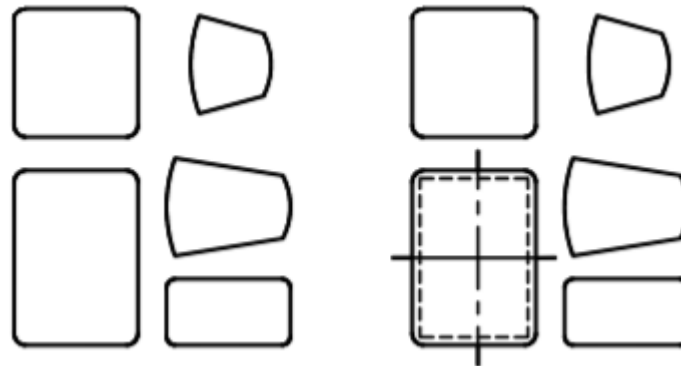


Ilustración 13 Adoquín Tipo 3: Clásico  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

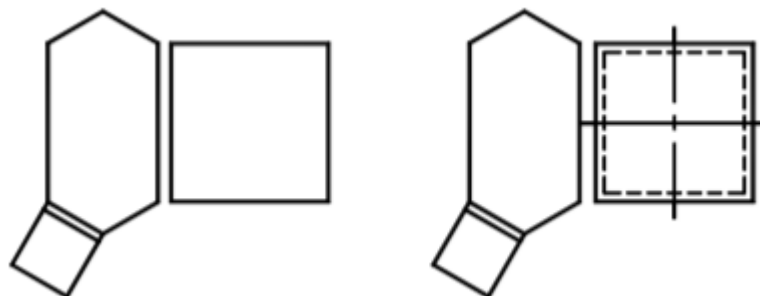


Ilustración 14 Adoquín Tipo 3: Simetría  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

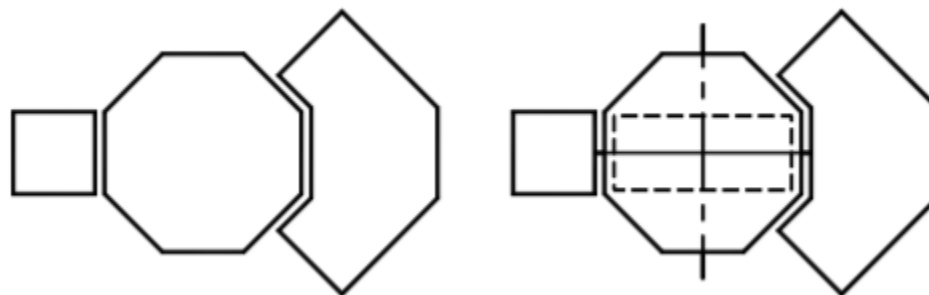


Ilustración 15 Adoquín Tipo 3: Figura  
(Fuente: NTC 2017, 2004)

#### **2.2.1.3.2. SEGÚN LA MASA DE CONCRETO**

- Adoquín monocapa

Es el adoquín cuya masa está constituida por una sola capa de concreto de características uniformes.

- Adoquín bicapa

Es el adoquín cuya masa está constituida por dos capas de concreto de características diferentes, la inferior contra la cara de apoyo de concreto gris; y la superior contra la cara de desgaste de un concreto de diferentes características que el anterior por su dosificación, textura, color, o por la incorporación de diversos tipos de agregados.

- Adoquín permeable

Es el adoquín elaborado con mezclas de concreto, por lo general con granulometrías discontinuas que hacen que el volumen del adoquín sea permeable, para efectos de drenaje.

#### **2.2.2. GRANULO DE CAUCHO RECICLADO DE LLANTAS FUERA DE USO**

##### **2.2.2.1. HISTORIA**

El caucho tal como lo conocemos es proveniente en su mayoría de un árbol de América del Sur llamado “Hevea Brasiliensis”. De acuerdo a Gonzales (2015) El caucho es proveniente del látex que producen este tipo de plantas como defensa ante heridas en la corteza de su tronco. Es una mezcla de grasas, ciertas proteínas, hidrocarburos y azúcares de origen vegetal.

La extracción del látex se remonta a año 1600<sup>a</sup>.C, y a la cavilación mesoamericana de los “Olmekas”. Los Olmekas practicaban un sofisticado juego con una pelota de látex que fabricaban introduciendo la pegajosa sustancia en agua hirviendo.

Al pasar de los años la demanda por el caucho iba cada vez más en aumento y llegó a tal punto que únicamente con el caucho natural no era suficiente, por lo que se vio la necesidad de crear algo que tuviese propiedades físicas muy parecidas al caucho, respondiendo a esto, empieza a emerger lo que en la actualidad se conoce como caucho sintético.

La historia del caucho sintético según Lund (1993) tiene el siguiente desarrollo:

- En 1826, Faraday estableció la fórmula empírica para el caucho sintético -  $C_5H_8$ ;
- En 1841, el norteamericano Charles Goodyear, al dejar caer una pequeña cantidad de azufre en la savia calentada, descubrió accidentalmente el proceso de vulcanización del caucho;
- En Alemania, más tarde, el caucho sintético del petróleo comenzó a industrializarse;
- Greville Willians aisló el isopreno por destilación en seco de caucho natural, en 1860;
- Bouchard Dat, al calentar el isopreno con ácido clorhídrico en un tubo sellado, obtuvo en 1879 una masa similar al caucho natural;
- En Irlanda, en 1887, Dunlop creó el primer neumático de bicicleta;
- En 1897, Euler logró iniciar y completar la síntesis del caucho, obteniendo, de forma sintética, isopreno;
- En 1895, los hermanos Michelin, pioneros de una mega industria, actualmente en todo el mundo, instalaron neumáticos en los automóviles;
- En la década de 1930, después de la Primera Guerra Mundial, el trabajo de investigación continuó desarrollándose, con la aparición de polisulfuros, neopreno, gomas de nitrilo, capaces de sufrir vulcanización e incluso producir material similar al caucho como producto final. natural

- En las últimas décadas del siglo pasado, se produjeron nuevos tipos de cauchos sintéticos, tales como butilo, silicona, fluorados, poliuretano sólido, polietileno clorosulfonado y etileno fluorado, entre otros.
- En la última década del siglo pasado se produjeron: poliisopreno - elastómero sintético similar al caucho; polibutadieno; la síntesis de isopreno, por medio de catalizadores estereoespecíficos, y los cauchos de etileno / propileno, que siguen los moldes de los cauchos naturales.

#### **2.2.2.2. DEFINICIÓN**

Es el material obtenido a partir de la trituration del caucho obtenido de las llantas usadas desechas de vehículos de transporte se le conoce como grano de caucho reciclado GCR, está compuesto por caucho vulcanizado proveniente de la trituration mecánica y separación de materiales de las llantas usadas, no es tóxico.

Se obtiene mediante procesos de molienda de llantas usadas, disminuido en tamaño, este material es utilizado en diferentes obras de ingeniería civil, como lo son en rellenos de terraplenes, materiales de contención, pisos de parques, como modificador en las mezclas asfálticas, entre otros (Correa. C, 2018).

#### **2.2.2.3. CLASIFICACIÓN**

Para la elaboración del presente trabajo se toma como referencia la clasificación del “Texas Department of Transportation”

TAMAÑO DEL TAMIZ (% PASA)	GRADO A		GRADO B		GRADO C	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
#8	100	-	-	-	-	-
#10	95	100	100	-	-	-
#16	-	-	70	100	100	-
#30	-	-	25	60	90	100
#40	-	-	-	-	45	100
#50	0	10	-	-	-	-
#200	-	-	0	5	-	-

Tabla 1 Clasificación de miga de caucho  
(Fuente: TxDOT specification)



### **2.2.3. ENSAYOS PARA ADOQUÍN**

#### **2.2.3.1. RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCION**

Según (Plazas & Gamba, 2015):

La propiedad más importante de los adoquines es la resistencia a la flexo-tracción. Esta característica mide el esfuerzo en la fibra externa que se desarrolla al someter un adoquín a la flexión.

Los diseñadores de pavimentos utilizan una teoría basada en la resistencia a la flexión, por lo tanto, los adoquines que son la capa de rodadura, deben cumplir con esta propiedad. Cuando los adoquines de concreto hidráulico son sometido a flexo-tracción se genera un efecto llamado momento flector que tiene mucha importancia para el estudio de resistencia de estos elementos.

#### **2.2.3.2. ABSORCIÓN**

La absorción según la normativa se define como el proceso por el cual un líquido es arrastrado dentro de un cuerpo solido poroso y tiende a llenar los poros permeables del mismo. En el caso del concreto y agregados, el líquido es el agua y el incremento de masa de expresa como porcentaje, referido a la masa seca del cuerpo, el cual se considera seco cuando ha sido tratado por un medio apropiado, para remover el agua no combinada, tal como el secado hasta masa constante, a una temperatura entre 100 y 110 grados centígrados (Barrantes & Holguin, 2015).

Cuando la porosidad de espécimen es baja, mejores podrán ser sus propiedades mecánicas.

### **3. CAPITULO 3**

#### **3.1. METODOLOGÍA Y MATERIALES**

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo, se desarrollaron diferentes procedimientos para analizar la respuesta que tienen los adoquines con la incorporación en diferentes proporciones de granulo de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso.

Para diferenciar cada uno de los especímenes se les asignaron la siguiente designación:

- TESTIGO: Adoquín convencional de mortero.
- CAUCHO 5%: Adoquín de mortero con adición de caucho reciclado de 5%.
- CAUCHO 10%: Adoquín de mortero con adición de caucho reciclado de 10%.
- CAUCHO 20%: Adoquín de mortero con adición de caucho reciclado de 20%.

##### **3.1.1. DISEÑO DE MEZCLA**

Para la realización del diseño de mezcla se tomó como base las recomendaciones brindadas por la empresa en prefabricados de concreto Comercializadora la Samaria S.A.S. en la ciudad de Santa Marta, Colombia.

Se realizaron diferentes tipos de mezclas de concreto, tomando como punto de partida una mezcla para adoquín convencional de concreto. Las proporciones de caucho tuvieron una proporción de 5%, 10% y 20%, con respecto a la masa total de la mezcla sin incluir la masa del cemento y reemplazando dicho porcentaje de arena blanca por este.

A continuación, se presentará las cantidades de cada uno de los diseños de mezcla empleados.

- Diseño de mezcla para adoquines convencionales de concreto

Con este diseño de mezcla se podrían producir una cantidad aproximada de 60 adoquines.

DISEÑO DE MEZCLA						
	CEMENTO	ARENA BLANCA	ARENA AMARILLA	GRAVA 3/8	AGUA	GRANO DE CAUCHO
MASA (Kg)	21.25	90.50	60.00	10.75	10.00	0.00

Tabla 2 Diseño de mezcla de adoquines de concreto convencionales

Fuente: Autor

- Diseño de mezcla para adoquines con adición de granulo de caucho reciclado en un 5%

Con este diseño de mezcla se podrían producir una cantidad aproximada de 65 adoquines.

DISEÑO DE MEZCLA						
	CEMENTO	ARENA BLANCA	ARENA AMARILLA	GRAVA 3/8	AGUA	GRANO DE CAUCHO
MASA (Kg)	21.25	81.94	60.00	10.75	10.00	8.56

Tabla 3 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 5% de granulo de caucho reciclado

Fuente: Autor

- Diseño de mezcla para adoquines con adición de granulo de caucho reciclado en un 10%

Con este diseño de mezcla se podrían producir una cantidad aproximada de 72 adoquines.

DISEÑO DE MEZCLA						
	CEMENTO	ARENA BLANCA	ARENA AMARILLA	GRAVA 3/8	AGUA	GRANO DE CAUCHO
MASA (Kg)	21.25	73.38	60.00	10.75	10.00	17.13

Tabla 4 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 10% de granulo de caucho reciclado

Fuente: Autor

- Diseño de mezcla para adoquines con adición de granulo de caucho reciclado en un 20%

Con este diseño de mezcla se podrían producir una cantidad aproximada de 80 adoquines.

DISEÑO DE MEZCLA						
	CEMENTO	ARENA BLANCA	ARENA AMARILLA	GRAVA 3/8	AGUA	GRANO DE CAUCHO
MASA (Kg)	21.25	56.25	60.00	10.75	10.00	34.25

Tabla 5 Diseño de mezcla de adoquines con adición de 20% de granulo de caucho reciclado

Fuente: Autor

### **3.1.2. MATERIALES**

#### **3.1.2.1. CEMENTO**

Para el presente trabajo fue utilizado cemento Argos Estructural Max cedido por la empresa Comercializadora la Samaria, el cual es un cemento especialmente diseñado para la producción industrializada de concreto, que ofrece una mayor eficiencia y un alto desarrollo de resistencias a edades iniciales y finales de acuerdo con la ficha técnica de ARGOS.

#### **3.1.2.2. AGREGADOS NATURALES**

Los agregados empleados fueron cedidos por la empresa Comercializadora la Samaria, lo cuales fueron:

- Arena blanca proveniente de Triturados Tayrona
- Arena amarilla proveniente de “GM Barranquilla”
- Triturado 3/8” de Triturados Tayrona

#### **3.1.2.3. AGREGADO RECICLADO**

El agregado reciclado utilizado de caucho, producto derivado de la trituración de neumáticos fuera de uso.

Existen muchas empresas en Colombia dedicadas a la trituración de neumáticos fuera de usos, empresas que en su mayor parte se encuentran ubicadas en ciudades principales. Infortunadamente en la actualidad en la ciudad de Santa Marta no hay empresa dedicada a esto, es por esto que se optó por solicitarla a Bogotá D.C. Saliendo un poco más costosa por gastos de envío, sin embargo, al solicitar grandes cantidades el precio se compensa, debido a que hay empresas dedicadas a la trituración de neumáticos en ciudades cercanas como lo es Barranquilla.

### **3.1.3. METODOS DE ENSAYO**

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo es el analizar el comportamiento de los adoquines con adición de caucho reciclado, se definen estos ensayos a realizar para los adoquines: absorción de agua y resistencia a la flexotracción; basándose en la “NTC 2017” para su correcta ejecución, a su vez se analizarán sus características físicas. Se realizarán ensayos de granulometría al material reciclado para su respectiva clasificación.

#### **3.1.3.1. GRANULOMETRIA**

El presente ensayo solo se realizó al agregado reciclado, a pesar no existir normativa para este tipo de material, se basó en lo expuesto en la NTC 77 (2007): Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, para clasificarlo de acuerdo lo expuesto en el numeral 2.1.2.3. Los procedimientos expuestos en la norma anteriormente mencionada son:

- Se lavó el material para eliminar cualquier suciedad que pudiese tener.
- Luego de lavado se procedió a dejarlo en el horno a una temperatura de aproximadamente 110 °C durante 24 horas.



Ilustración 16 Granulo de caucho reciclado

Fuente: Autor

- Se realizó la selección de los tamices los cuales fueron tamiz #8, #10, #16, #20, #30, #40, #50 y #200.
- Se procedió a pesar el agregado reciclado, en los cuales fueron pesados aproximadamente 500g.
- Una vez pesado el material se introduce en el primer tamiz, para proceder con el tamizado. Se tamizó de manera continua durante aproximadamente 2 minutos de manera manual.
- Seguidamente se procedió a pesar el material que retuvo cada uno de los tamices.

### 3.1.3.2. RESISTENCIA A FLEXOTRACIÓN

Para la realización de este ensayo se tuvo en cuenta todo lo expuesto en la NTC 2017 (2004) y se siguieron todos los procedimientos establecidos en este. Dichos procedimientos son los siguientes:

- Se marcaron cada uno de los especímenes a 1 cm hacia adentro de los lados menores del rectángulo inscrito, además de una línea en el eje menor del rectángulo inscrito y se tomaron las dimensiones reales promedio de cada uno, Para la identificación de cada uno de los especímenes se les etiquetó con una letra acompañado de un número.



Ilustración 17 Etiquetado y medición de los adoquines

Fuente: Autor

ETIQUETA	TIPO DE ADOQUÍN
T(XX)	ADOQUIN DE CONCRETO
X(XX)	ADOQUIN DE CONCRETO CON ADICION DE 5% GRANULO DE CAUCHO RECICLADO
Y(XX)	ADOQUIN DE CONCRETO CON ADICION DE 10% GRANULO DE CAUCHO RECICLADO
Z(XX)	ADOQUIN DE CONCRETO CON ADICION DE 20% GRANULO DE CAUCHO RECICLADO

Tabla 6 Etiquetas de diferentes tipos de adoquines

Fuente: Autor

Nota: la denominación “XX” hace referencia al número del espécimen de ese lote.



Ilustración 18 Adoquines etiquetados

Fuente: Autor

- Los especímenes permanecieron saturados, por inmersión, durante las  $24h \pm 2h$  antes del ensayo, a una temperatura entre  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Luego, se secaron superficialmente con un paño seco.



Ilustración 19 Adoquines antes de inmersión

Fuente: Autor

- Los especímenes se colocaron en la Máquina Universal de la Universidad del Magdalena, como una viga simplemente apoyada.





Ilustración 20 Adoquín antes de aplicar la carga  
Fuente: Autor

- Se aplica la carga a una velocidad aproximada de 0.5MPa/s hasta llevar a su falla.



Ilustración 21 Adoquin una vez aplicada la carga última  
Fuente: Autor

### 3.1.3.3. ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD

Para la realización de este ensayo se tuvo en cuenta todo lo expuesto en la NTC 2017 (2004) y se siguieron todos los procedimientos establecidos en este, dichos procedimientos son los siguientes:

- Se dejaron los especímenes en el horno a una temperatura aproximada de 110 °C durante 24 horas.



Ilustración 22 Adoquines en el horno

Fuente: Autor

- Luego de sacarlos del horno, se pesaron cada uno de los especímenes para así obtener su masa seca (Ms). A continuación, se dejaron enfriar hasta llegar a su temperatura ambiente.



Ilustración 23 Toma de masa de adoquines

Fuente: Autor

- Una vez los especímenes se encuentran temperatura ambiente, se sumergen durante  $24h \pm 2h$ .
- Pasado el tiempo mencionado anteriormente se procede a pesar los especímenes en agua suspendidos mediante un alambre para obtener su masa inmersa en agua ( $M_a$ ).



Ilustración 24 Masa sumergida de adoquines

- Luego se retira del agua y se dejaron escurrir durante 1 minuto. Seguidamente se secó el agua superficialmente con un paño seco y se pesó inmediatamente para determinar su masa saturada (Mh).

## **3.2. RESULTADOS**

### **3.2.1. DIMENSIONES PROMEDIO**

A continuación, se mostrarán las dimensiones reales promedio de cada uno de los especímenes, las cuales fueron tomadas con un calibrador digital. Para ello, se realizó un promedio de mediciones de cada una de las dimensiones de los adoquines. Las dimensiones que aquí se muestran están expresadas en milímetros.

Adoquines de edad 5 días:

TESTIGO			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
T1	200.60	99.73	81.01
T2	200.51	100.27	81.13
T3	200.14	99.40	83.63
T4	200.83	99.96	81.08
T5	200.67	100.02	79.58

Tabla 7 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Testigo)  
Fuente: Autor

CAUCHO 5%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
X1	200.16	99.74	81.52
X2	198.49	99.36	79.86
X3	200.25	100.67	79.62
X4	199.59	100.77	79.76
X5	200.41	100.21	80.03

Tabla 8 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 5%)  
Fuente: Autor

CAUCHO 10%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Y1	200.75	100.39	80.62
Y2	199.87	99.66	79.97
Y3	200.81	99.68	79.98
Y4	200.58	100.77	80.39
Y5	199.75	100.52	79.36

Tabla 9 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 10%)  
Fuente: Autor

CAUCHO 20%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Z1	201.01	101.40	81.63
Z2	200.28	100.47	81.30
Z3	200.78	100.33	81.30
Z4	200.28	101.37	81.65
Z5	199.95	101.10	79.27

Tabla 10 Dimensión real de adoquines de edad 5 días (Caucho 20%)  
Fuente: Autor

Adoquines de edad 13 días:

TESTIGO			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
T6	200.34	99.44	80.57
T7	199.93	99.51	81.15
T8	200.05	100.14	79.92
T9	199.62	100.27	81.35
T10	200.59	100.28	80.76

Tabla 11 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Testigo)

Fuente: Autor

CAUCHO 5%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
X6	200.18	100.19	80.51
X7	200.76	99.34	82.42
X8	200.75	99.49	79.91
X9	200.18	100.60	80.41
X10	200.71	99.60	81.20

Tabla 12 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Y6	200.26	100.22	80.53
Y7	199.74	99.35	80.07
Y8	200.43	100.53	80.50
Y9	200.47	100.33	80.00
Y10	199.34	99.69	79.78

Tabla 13 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 10%)

Fuente: Autor

CAUCHO 20%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Z6	200.95	100.86	82.07
Z7	201.77	100.88	82.36
Z8	201.47	100.01	82.05
Z9	201.61	101.44	79.79
Z10	200.74	100.16	80.36

Tabla 14 Dimensión real de adoquines de edad 13 días (Caucho 20%)

Fuente: Autor

Adoquines de edad 27 días:

TESTIGO			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
T11	200.01	100.09	81.46
T12	200.07	99.33	79.70
T13	200.12	99.37	80.22
T14	200.11	99.81	81.14
T15	200.10	100.27	80.78

Tabla 15 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Testigo)

Fuente: Autor

CAUCHO 5%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
X11	199.75	100.42	80.89
X12	200.07	100.32	80.92
X13	200.33	99.92	81.56
X14	201.04	99.97	80.57
X15	199.62	100.88	80.77

Tabla 16 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Y11	199.71	99.99	79.92
Y12	199.96	99.99	79.38
Y13	200.21	99.38	80.27
Y14	200.26	99.50	78.64
Y15	199.79	99.81	80.55

Tabla 17 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 10%)

Fuente: Autor

CAUCHO 20%			
No	LONGITUD	ANCHO	ESPESOR
Z11	200.72	99.04	79.60
Z12	200.09	100.74	80.30
Z13	200.57	100.06	80.64
Z14	199.60	99.70	81.61
Z15	200.41	99.86	79.10

Tabla 18 Dimensión real de adoquines de edad 27 días (Caucho 20%)

Fuente: Autor

### 3.2.2. RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos al someter al espécimen a la flexión, estos resultados son arrojados por la maquina universal perteneciente al Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil (LIIC) de la Universidad del Magdalena.

Para el cálculo del módulo de rotura ( $M_r$ ) se utiliza la fórmula establecida en la NTC 2017 (2004) la cual es la siguiente:

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

Donde

$M_r$  = Módulo de rotura,  $N/mm^2$ , en MPa

$C_{\max}$  = Carga máxima, de rotura, en N

$l_i$  = Longitud del rectángulo inscrito, en mm

$a_r$  = Ancho real del espécimen, en mm

$a_i$  = Ancho del rectángulo inscrito, en mm

$e_r$  = Espesor real del espécimen, en mm

Los resultados obtenidos son:

Adoquines de edad 5 días:

TESTIGO					
ESPÉCIMEN	T1	T2	T3	T4	T5
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	5107.88	5099.46	5515.42	4535.68	4289.95
MODULO DE ROTURA (MPa)	2.11	2.09	2.14	1.87	1.84

Tabla 19 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Testigo)

Fuente: Autor



CAUCHO 5%					
ESPÉCIMEN	X1	X2	X3	X4	X5
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	4282.00	4310.45	4491.65	3699.30	3986.20
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.75	1.82	1.90	1.55	1.68

Tabla 20 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 5%)  
Fuente: Autor

CAUCHO 10%					
ESPÉCIMEN	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	3941.38	2862.29	3211.50	3884.32	3076.39
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.64	1.21	1.37	1.62	1.31

Tabla 21 Tabla 15 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 10%)  
Fuente: Autor

CAUCHO 20%					
ESPÉCIMEN	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	968.62	1432.90	1397.45	1314.48	1002.95
MODULO DE ROTURA (MPa)	0.39	0.58	0.57	0.53	0.43

Tabla 22 Tabla 15 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 5 días (Caucho 20%)  
Fuente: Autor

Adoquines de edad 13 días:

TESTIGO					
ESPÉCIMEN	T6	T7	T8	T9	T10
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	6856.76	7208.82	8744.24	7944.74	9723.66
MODULO DE ROTURA (MPa)	2.87	2.97	3.69	3.23	4.03

Tabla 23 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Testigo)  
Fuente: Autor

CAUCHO 5%					
ESPÉCIMEN	X6	X7	X8	X9	X10
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	4695.57	5505.88	5271.75	3873.98	4704.63
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.95	2.21	2.25	1.61	1.94

Tabla 24 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%					
ESPÉCIMEN	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	3081.32	3200.78	4713.54	3943.30	3487.91
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.28	1.35	1.96	1.66	1.48

Tabla 25 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 10%)

Fuente: Autor

CAUCHO 20%					
ESPÉCIMEN	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	728.29	1029.81	1068.59	1105.15	1075.75
MODULO DE ROTURA (MPa)	0.29	0.41	0.43	0.47	0.45

Tabla 26 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 13 días (Caucho 20%)

Fuente: Autor

Adoquines de edad 27 días:

TESTIGO					
ESPÉCIMEN	T11	T12	T13	T14	T15
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	6563.98	8371.83	6641.71	5910.24	7267.32
MODULO DE ROTURA (MPa)	2.67	3.58	2.81	2.43	3.00

Tabla 27 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Testigo)

Fuente: Autor

CAUCHO 5%					
ESPÉCIMEN	X11	X12	X13	X14	X15
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	4598.78	5253.47	5138.08	4991.37	3238.36
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.89	2.16	2.09	2.09	1.33

Tabla 28 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%					
ESPÉCIMEN	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	3347.56	3671.81	3441.49	2852.44	3065.27
MODULO DE ROTURA (MPa)	1.41	1.57	1.45	1.25	1.28

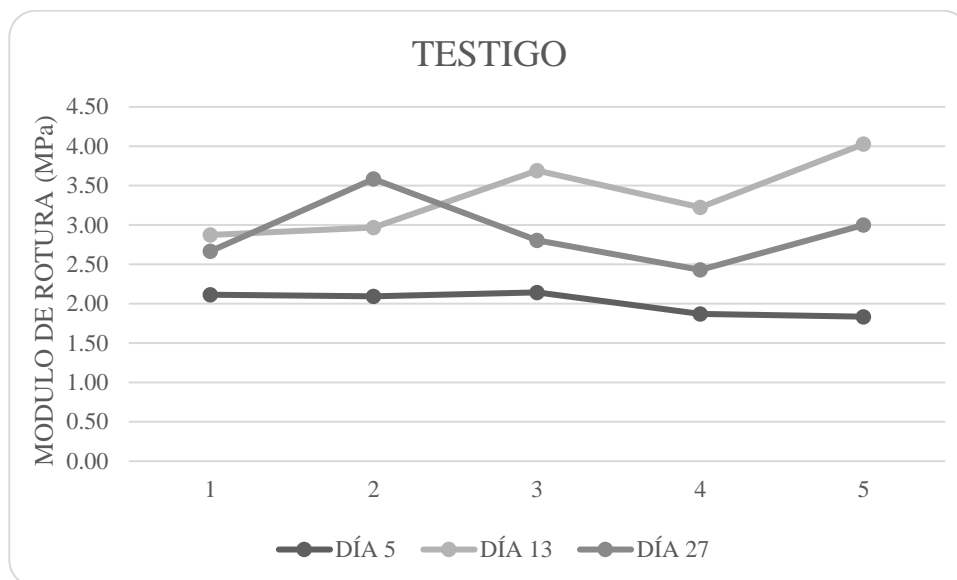
Tabla 29 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 10%)

Fuente: Autor

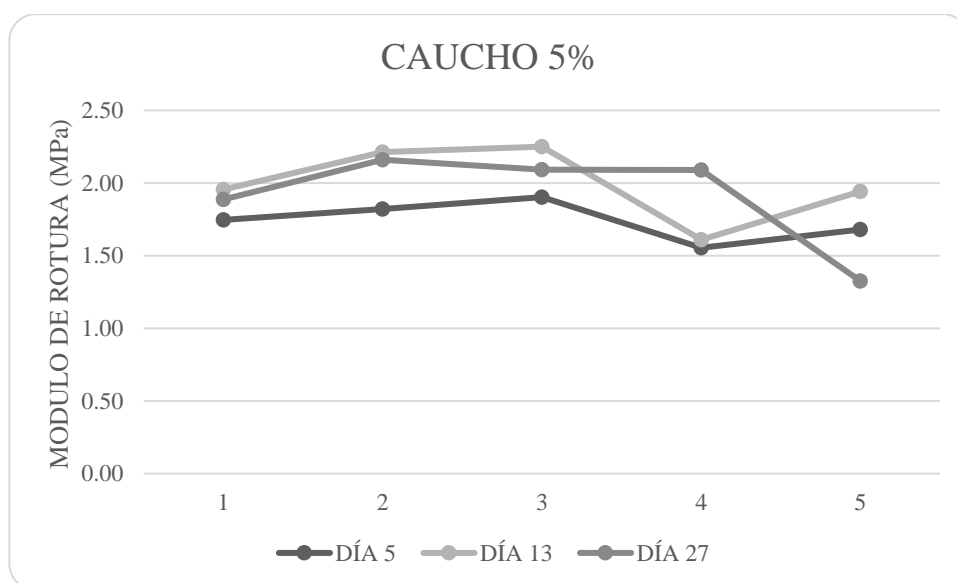
CAUCHO 20%					
ESPÉCIMEN	Z11	Z2	Z3	Z4	Z5
CARGA MAXIMA DE ROTURA (N)	1636.98	1445.29	1379.81	1366.14	1366.77
MODULO DE ROTURA (MPa)	0.71	0.60	0.57	0.55	0.59

Tabla 30 Resistencia a Flexotracción de adoquines de edad 27 días (Caucho 20%)

Fuente: Autor



**Gráfico 1** Modulo de rotura por espécimen (Testigo)  
Fuente: Autor



**Gráfico 2** Modulo de rotura por espécimen (Caucho 5%)  
Fuente: Autor

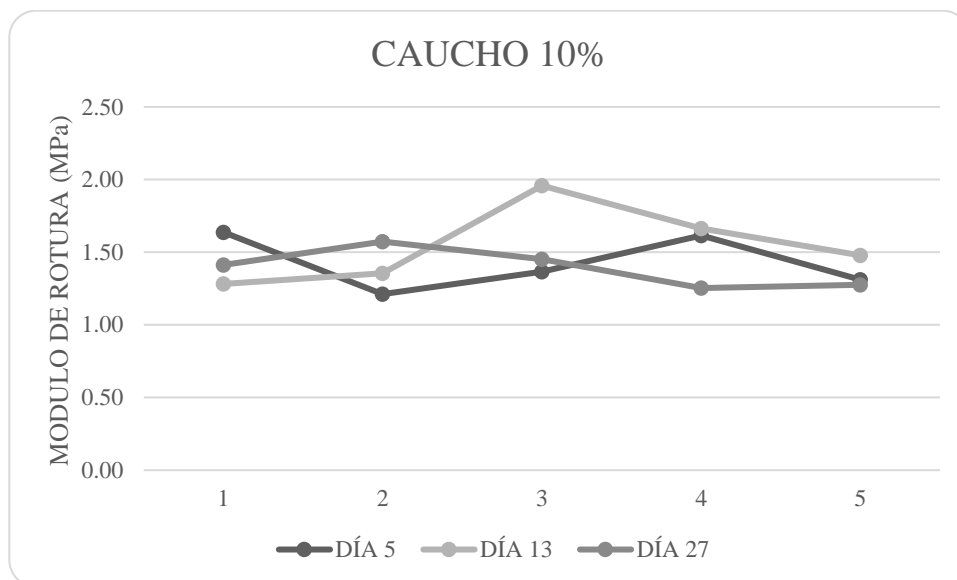


Gráfico 3 Módulo de rotura por espécimen (Caucho 5%)

Fuente: Autor

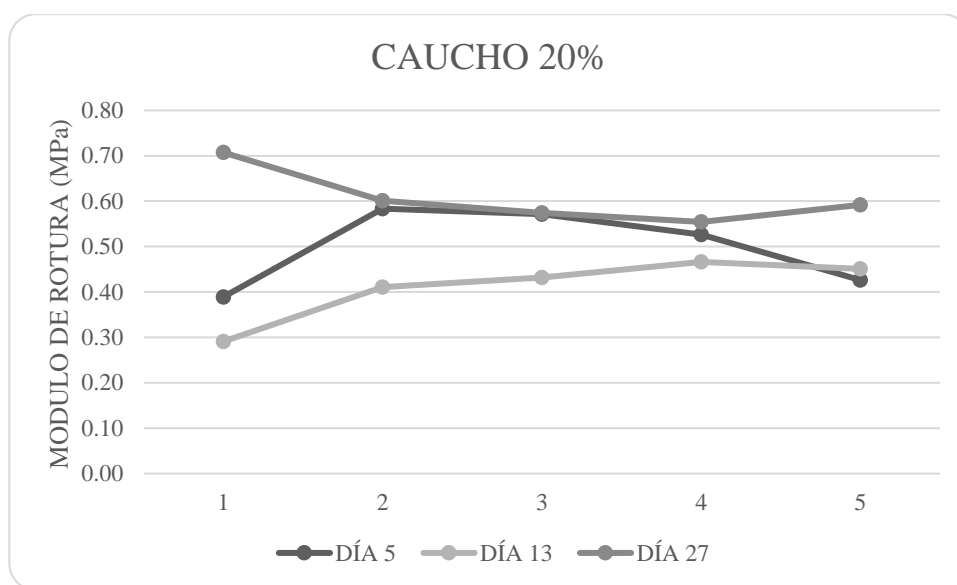


Gráfico 4 Módulo de rotura por espécimen (Caucho 5%)

Fuente: Autor

A continuación, se mostrará los resultados estadísticos como la media aritmética, desviación estándar y la varianza, así como gráficos de módulo de rotura contra adición de caucho reciclado y su línea de tendencia con su respectiva fórmula. Esto para cada uno de los días a los en los que se realizó el ensayo.

Adoquines de edad 5 días:

MÓDULO DE ROTURA (Mpa)				
ESPÉCIMENES	TESTIGO	CAUCHO 5%	CAUCHO 10%	CAUCHO 20%
MEDIA ARITMETICA	2.01	1.74	1.43	0.50
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.15	0.13	0.19	0.09
VARIANZA	0.0213	0.0178	0.0359	0.0076

Tabla 31 Resultados estadísticos de resistencia a la flexotracción a 5 días

Fuente: Autor

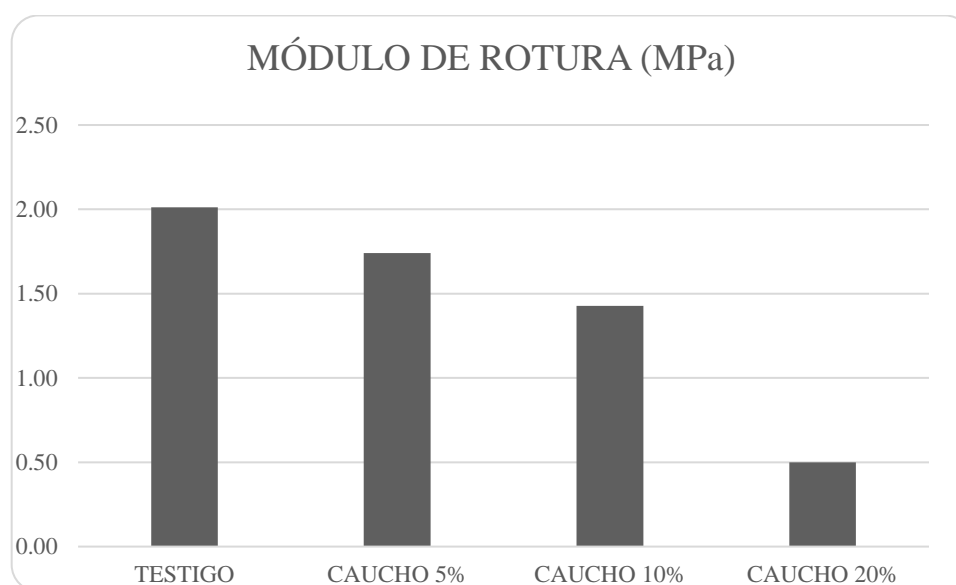


Gráfico 5 Resultados de resistencia a la flexotracción a 5 días

Fuente: Autor

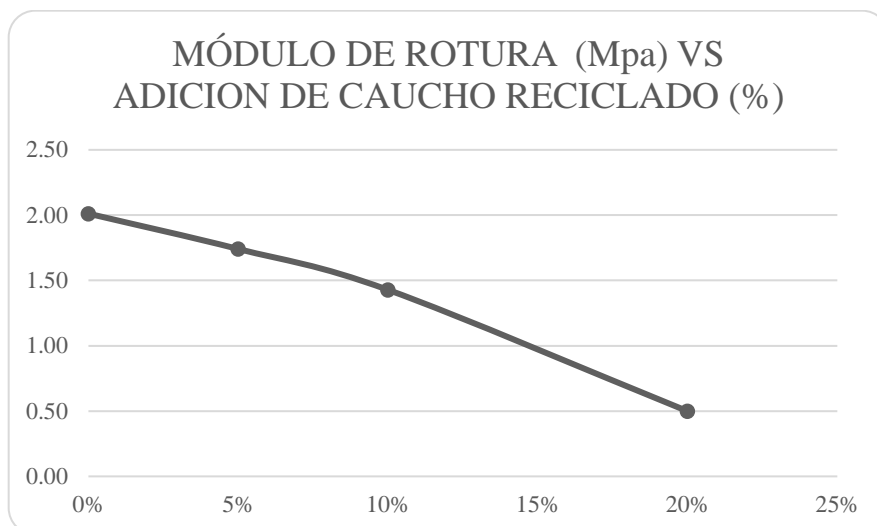


Gráfico 6 Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 5 días  
Fuente: Autor

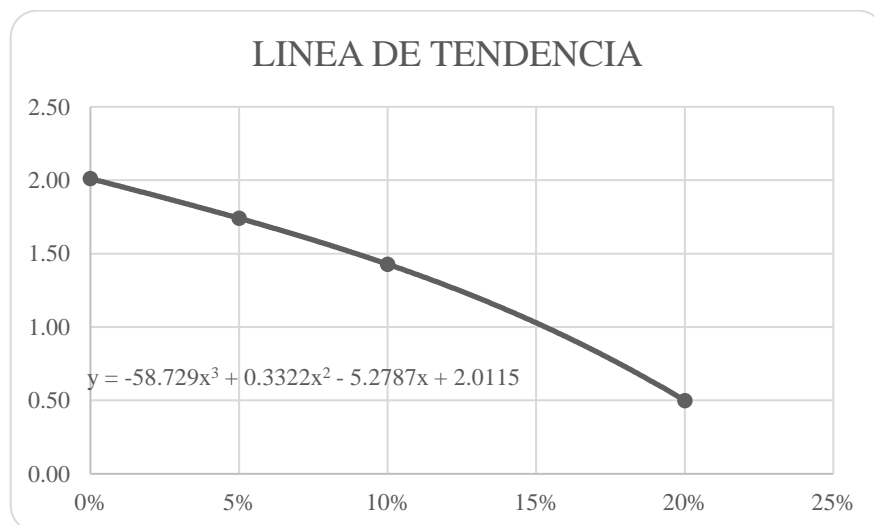


Gráfico 7 Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flextracción a 5 días  
Fuente: Autor

Adoquines de edad 13 días:

MÓDULO DE ROTURA (Mpa)				
ESPÉCIMENES	TESTIGO	CAUCHO 5%	CAUCHO 10%	CAUCHO 20%
MEDIA ARITMETICA	3.36	1.99	1.55	0.41
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.49	0.26	0.27	0.07
VARIANZA	0.2410	0.0663	0.0736	0.0049

Tabla 32 Resultados estadísticos de resistencia a la flextracción a 13 días

Fuente: Autor

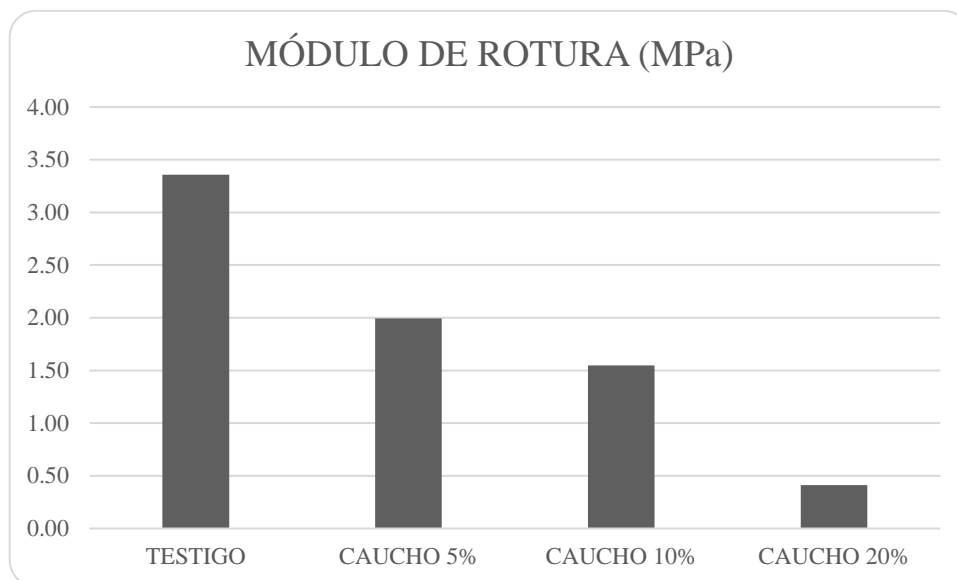


Gráfico 8 Resultados de resistencia a la flexotracción a 13 días  
Fuente: Autor

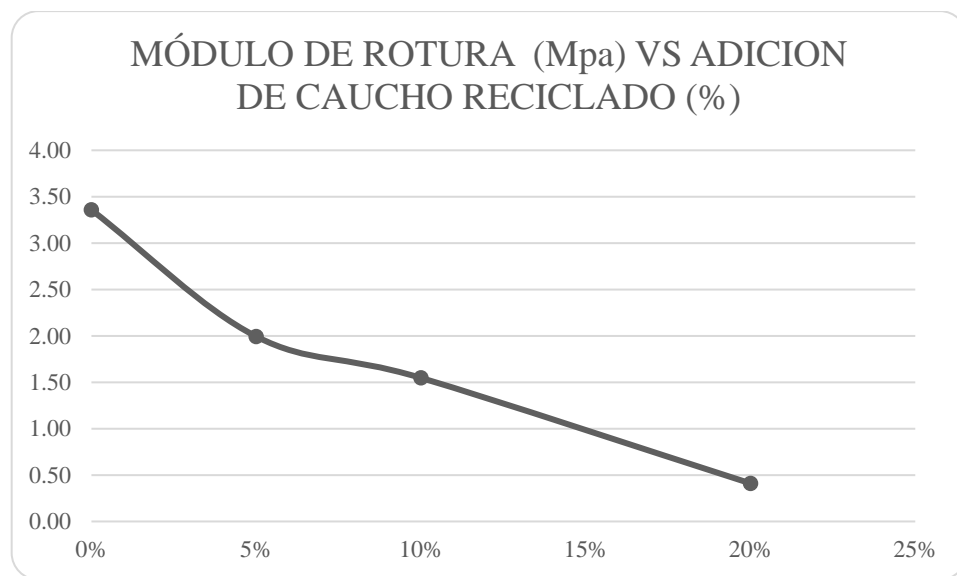
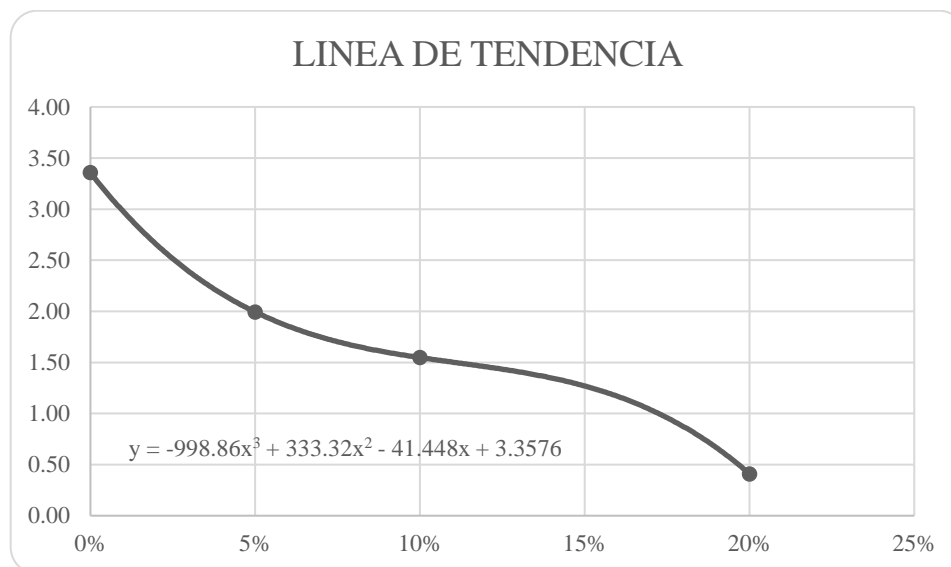


Gráfico 9 Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 13 días  
Fuente: Autor



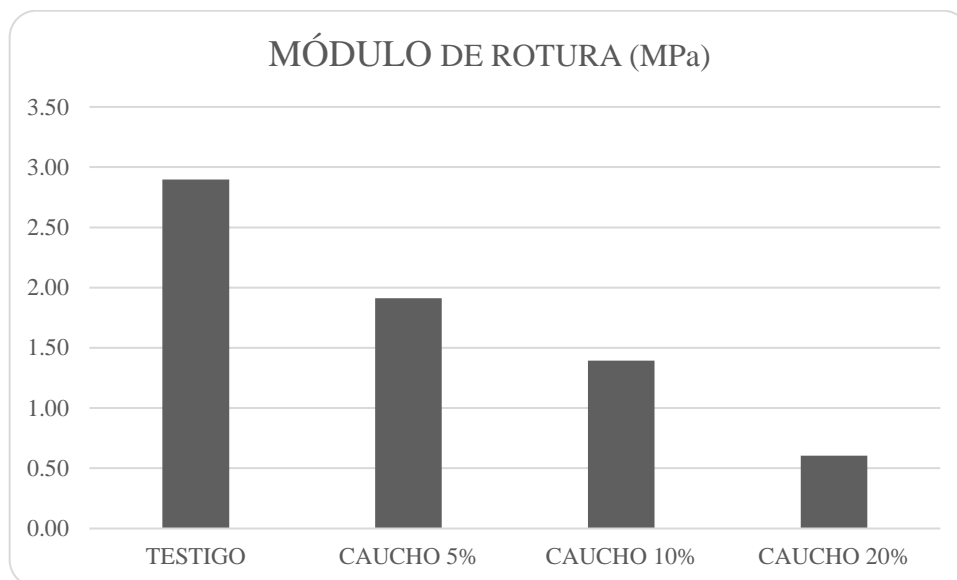


**Gráfico 10 Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flexotracción a 13 días**  
Fuente: Autor

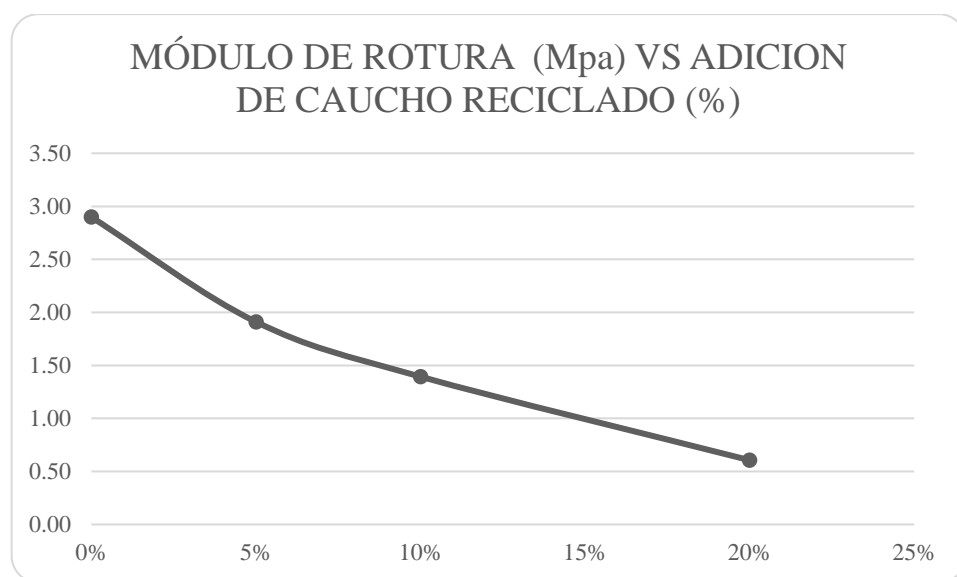
Adoquines de edad 27 días:

MÓDULO DE ROTURA (Mpa)				
ESPÉCIMENES	TESTIGO	CAUCHO 5%	CAUCHO 10%	CAUCHO 20%
MEDIA ARITMETICA	2.90	1.91	1.39	0.61
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.44	0.34	0.13	0.06
VARIANZA	0.1903	0.1173	0.0174	0.0035

**Tabla 33 Resultados estadísticos de resistencia a la flexotracción a 27 días**  
Fuente: Autor



**Gráfico 11 Resultados de resistencia a la flexotracción a 27 días**  
Fuente: Autor



**Gráfico 12 Módulo de rotura vs Adición de caucho reciclado a 27 días**  
Fuente: Autor

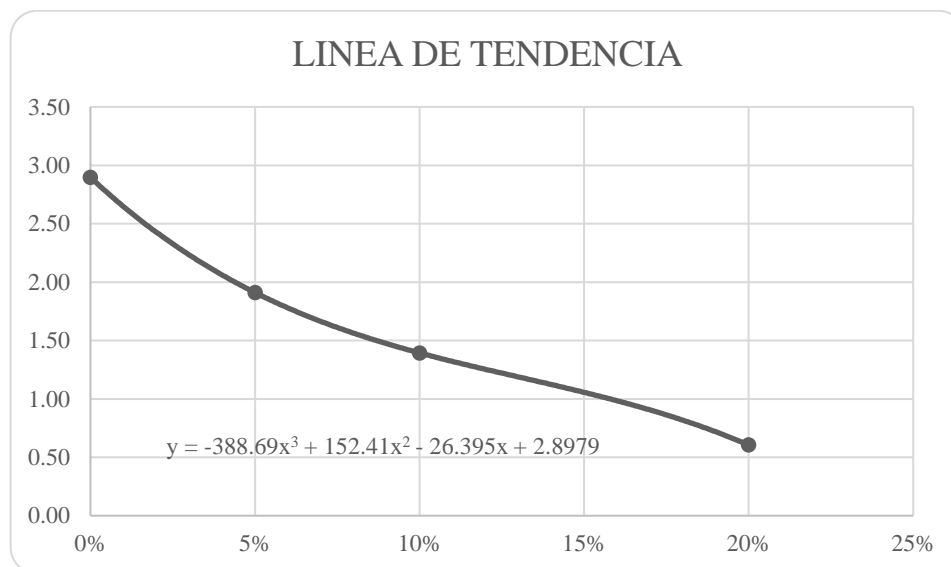


Gráfico 13 Línea y Ecuación de Tendencia de Resistencia a la Flexotracción a 27 días

Fuente: Autor

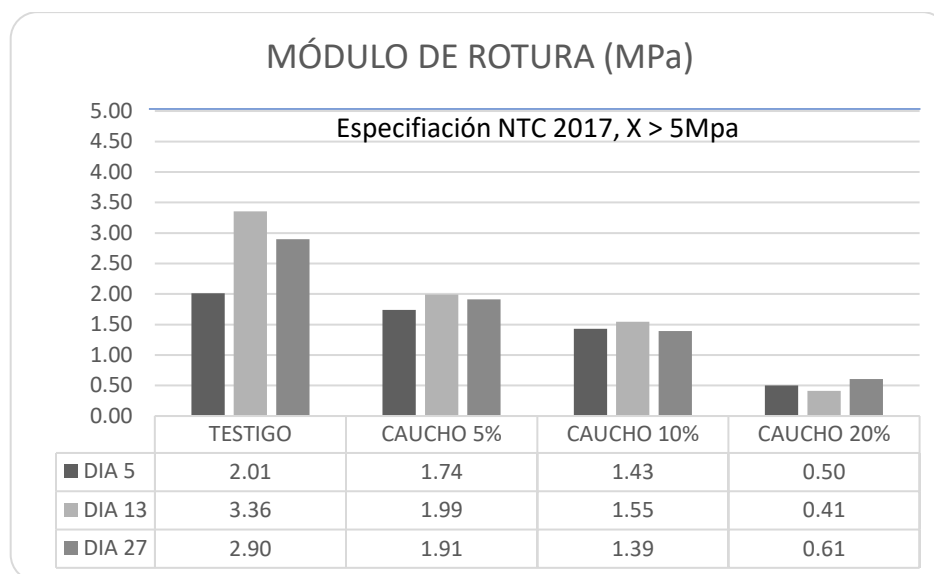


Gráfico 14 Resultados de resistencia a la flexotracción

Fuente: Autor

Al comparar la media aritmética de los tipos de especímenes se puede observar que no cumple con las especificaciones de la NTC 2017 la cual establece un módulo de rotura mayor a 5 Mpa, además que no solo el cambio es poco significativo entre los especímenes con edad de 13 o 27 días como se mencionó anteriormente, sino que tiende a decrecer del día 13 al día 27, yendo en contra del comportamiento regular. Esto pudo ser por las condiciones a las cuales fueron sometidas los adoquines de edad 27 días, a

los cuales se les realizó el ensayo de densidad y absorción, lo que lleva a someterlos a cambios de temperatura significativos.

Además se observa que la línea de tendencia es decreciente para las edades ensayadas, es decir, a medida que se le adicione un mayor porcentaje de granulo de caucho reciclado, la resistencia a la flexotracción tiende a disminuir.

### 3.2.3. ABSORCIÓN DE AGUA Y DENSIDAD

A continuación, se mostrarán las masas secas, húmeda (saturada) y sumergida obtenidas para cada uno de los especímenes.

TESTIGO			
No	MASA SECA (g)	MASA HÚMEDA (g)	MASA SUMERGIDA (g)
T11	3305.0	3551.0	1937.5
T12	3257.0	3474.0	1910.0
T13	3213.0	3468.0	1891.5
T14	3192.0	3466.0	1875.5
T15	3342.5	3600.5	1989.0

Tabla 34 Masas de los especímenes (Testigo)

Fuente: Autor

CAUCHO 5%			
No	MASA SECA (g)	MASA HÚMEDA (g)	MASA SUMERGIDA (g)
X11	2978.5	3301.5	1709.0
X12	3021.5	3321.5	1739.5
X13	3037.0	1742.5	3348.5
X14	3061.0	1750.0	3350.0
X15	2961.5	1713.5	3300.5

Tabla 35 Masas de los especímenes (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%			
No	MASA SECA (g)	MASA HÚMEDA (g)	MASA SUMERGIDA (g)
Y11	2717.5	1490.5	3063.5
Y12	2744.0	1519.5	3073.0
Y13	2728.5	1506.5	3061.5
Y14	2673.5	1480.5	3016.5
Y15	2709.5	1495.5	3058.5

Tabla 36 Masas de los especímenes (Caucho 10%)

Fuente: Autor

CAUCHO 20%			
No	MASA SECA (g)	MASA HÚMEDA (g)	MASA SUMERGIDA (g)
Z11	2447.0	1240.5	2806.0
Z12	2425.0	1228.0	2821.0
Z13	2398.0	1221.5	2796.0
Z14	2407.0	1229.5	2793.0
Z15	2399.0	1224.0	2780.5

Tabla 37 Masas de los especímenes (Caucho 20%)

Fuente: Autor

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de densidad y absorción tomando como base las masas mostradas anteriormente.

Para el cálculo de la densidad (D) y absorción (Aa) se utilizan la fórmula establecida en la NTC 2017 numeral 6.3.4. la cuales son expresadas a continuación:

$$Absorcion (Aa\%), \% = \left[ \frac{(Mh - Ms)}{Ms} \right] * 100$$

$$Densidad (D), Kg/m^3 = \left[ \frac{Ms}{Mh - Ma} \right] * 1000$$

Donde:

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

Ms = Masa seca del espécimen, en g.

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

TESTIGO					
ESPÉCIMEN	T11	T12	T13	T14	T15
ABSORCION DE AGUA (%)	7.44%	6.66%	7.94%	8.58%	7.72%
DENSIDAD (kg/m3)	2048.34	2082.48	2038.06	2006.92	2074.15

Tabla 38 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Testigo)

Fuente: Autor

CAUCHO 5%					
ESPÉCIMEN	X11	X12	X13	X14	X15
ABSORCION DE AGUA (%)	10.84%	9.93%	10.26%	9.44%	11.45%
DENSIDAD (kg/m3)	1870.33	1909.92	1891.03	1913.13	1866.10

Tabla 39 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 5%)

Fuente: Autor

CAUCHO 10%					
ESPÉCIMEN	Y11	Y12	Y13	Y14	Y15
ABSORCION DE AGUA (%)	12.73%	11.99%	12.20%	12.83%	12.88%
DENSIDAD (kg/m3)	1727.59	1766.33	1754.66	1740.56	1733.53

Tabla 40 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 10%)

Fuente: Autor

CAUCHO 20%					
ESPÉCIMEN	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15
ABSORCION DE AGUA (%)	14.67%	16.33%	16.60%	16.04%	15.90%
DENSIDAD (kg/m3)	1563.08	1522.28	1523.02	1539.49	1541.28

Tabla 41 Resultados de ensayo de densidad y absorción por espécimen (Caucho 20%)

Fuente: Autor

A continuación, se evidencias los resultados estadísticos como la media aritmética, desviación estándar y la varianza, así como gráficos de absorción y densidad contra adición de caucho reciclado, su línea de tendencia y su respectiva formula.

#### ABSORCIÓN:

ABSORCIÓN DE AGUA				
ESPÉCIMENES	TESTIGO	CAUCHO 5%	CAUCHO 10%	CAUCHO 20%
MEDIA ARITMETICA	7.67%	10.38%	12.53%	15.91%
DESVIACIÓN ESTANDAR	0.70%	0.78%	0.40%	0.74%
VARIANZA	0.0049%	0.0061%	0.0016%	0.0055%

Tabla 42 Resultados estadísticos de absorción de agua

Fuente: Autor

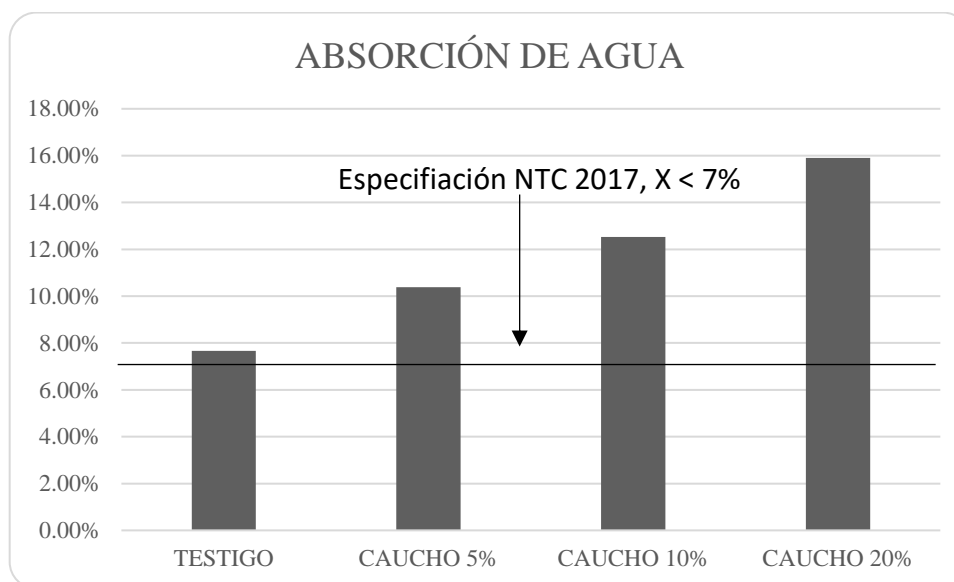


Gráfico 15 Resultados de absorción agua

Fuente: Autor

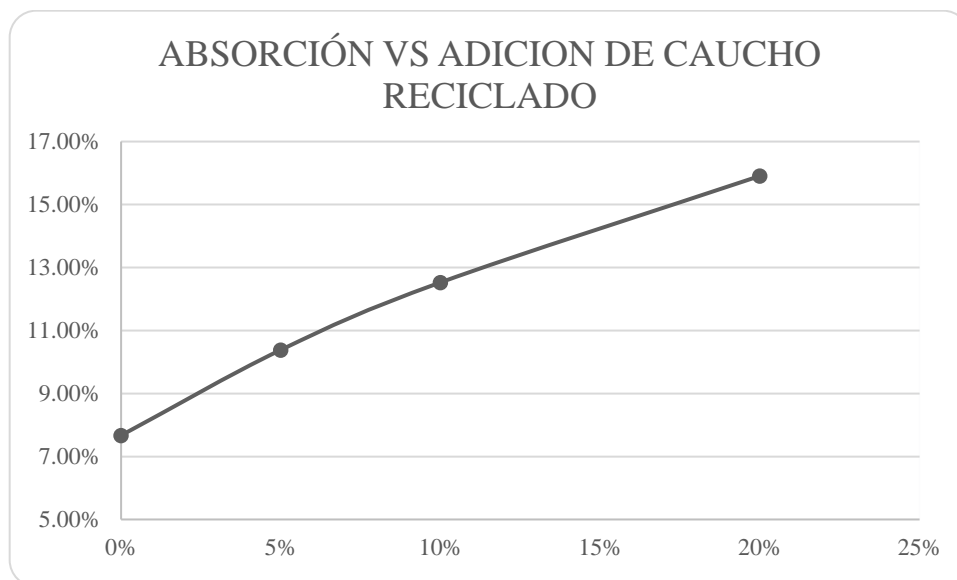


Gráfico 16 Absorción vs Adición de caucho reciclado  
Fuente: Autor

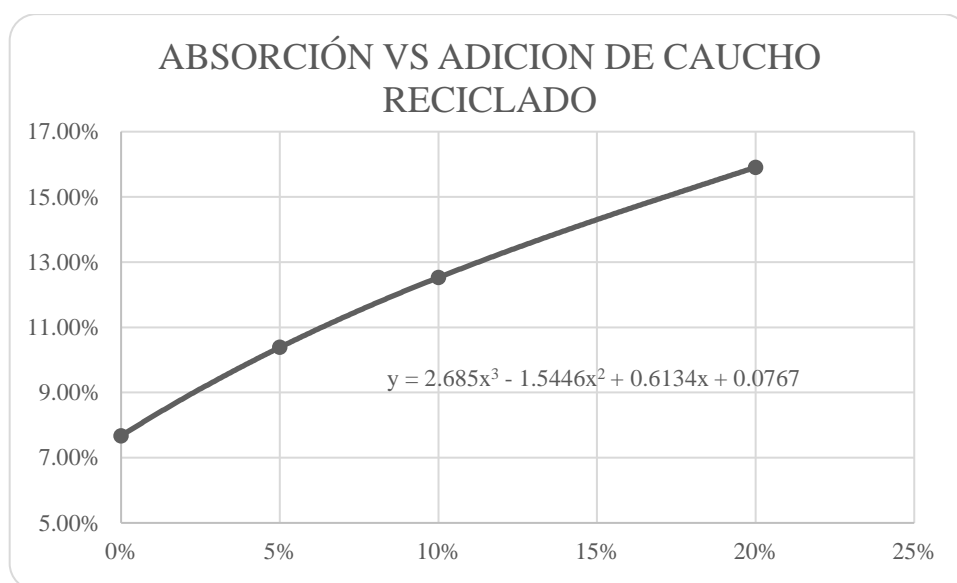


Gráfico 17 Línea y Ecuación de Tendencia de absorción de agua  
Fuente: Autor

La línea de tendencia posee un pendiente creciente, es decir, al añadir un mayor porcentaje de granulo de caucho la absorción de agua tiende a aumentar.



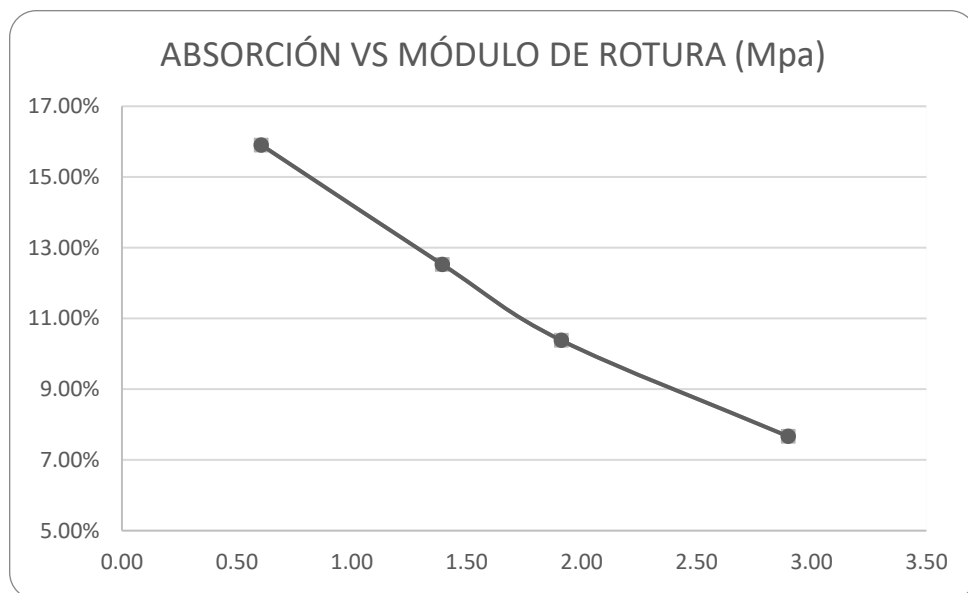


Gráfico 18 Absorción vs Módulo de Rotura  
Fuente: Autor

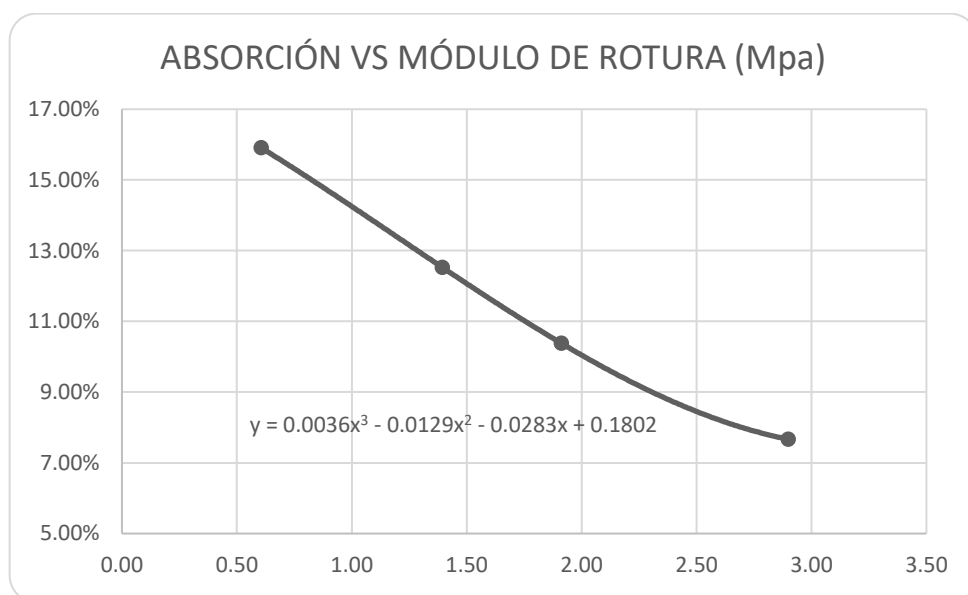


Gráfico 19 Línea y Ecuación de Tendencia de Absorción vs Módulo de Rotura  
Fuente: Autor

La línea de tendencia posee un pendiente decreciente al comparar la absorción con la resistencia por lo que al tener una menor absorción de agua, la resistencia a la flexotracción tiene a aumentar.

DENSIDAD:

DENSIDAD (kg/m3)				
ESPÉCIMENES	TESTIGO	CAUCHO 5%	CAUCHO 10%	CAUCHO 20%
MEDIA ARITMETICA	2049.99	1890.10	1744.53	1537.83
DESVIACIÓN ESTANDAR	30.17	21.74	15.83	0.01
VARIANZA	910.00	472.73	250.47	278.26

Tabla 43 Resultados estadísticos de densidad

Fuente: Autor

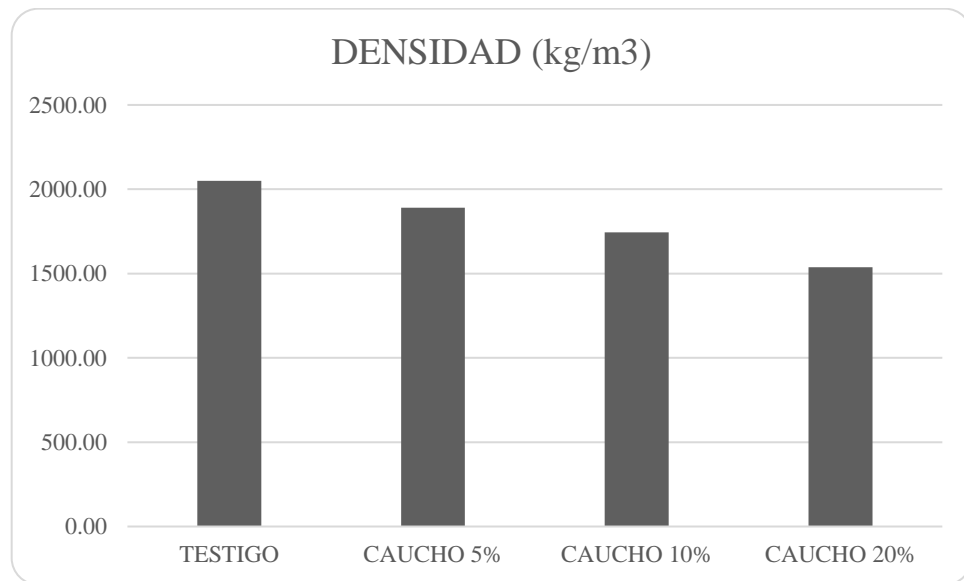


Gráfico 20 Resultados de absorción agua

Fuente: Autor

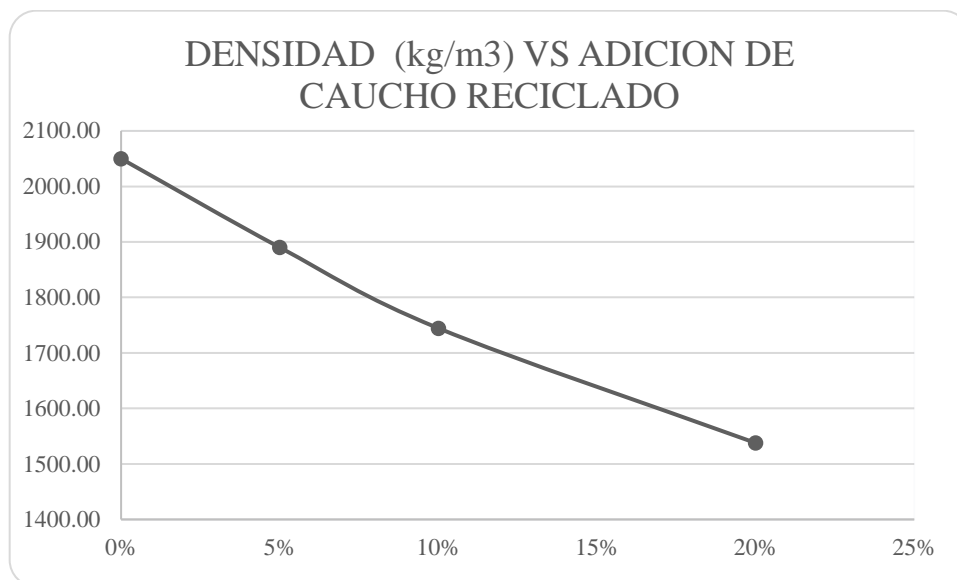


Gráfico 21 Densidad vs Adición de caucho reciclado

Fuente: Autor

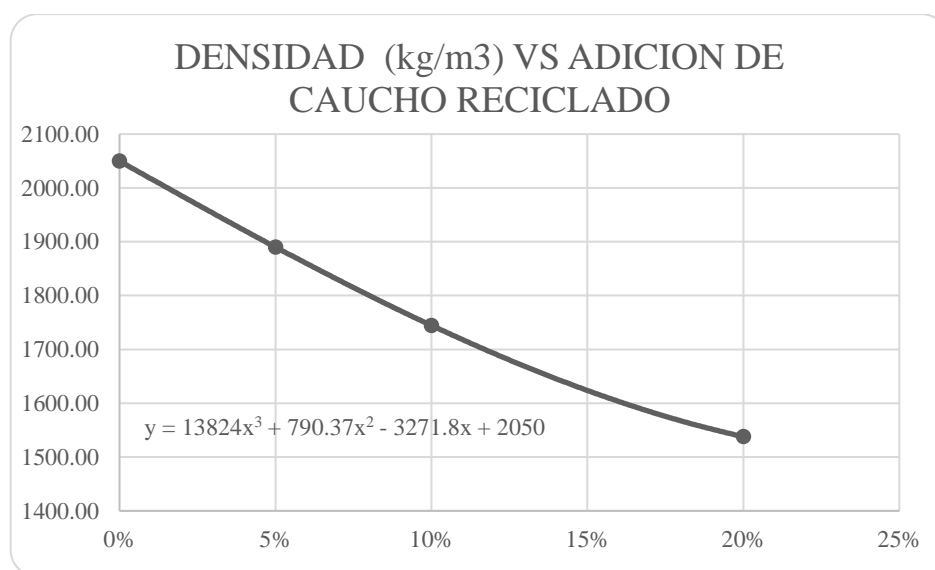


Gráfico 22 Línea y Ecuación de Tendencia de absorción de agua

Fuente: Autor

La línea de tendencia es decreciente, es decir, al añadir una mayor cantidad de caucho a la mezcla, la densidad de esta tiende a disminuir, esto debido a que el caucho posee una densidad muy baja comparada con la arena gruesa por la cual se sustituyó.

### 3.2.4. GRANULOMETRÍA

A continuación, se mostrarán los resultados arrojados por el ensayo de granulometría a una muestra de caucho reciclado para su respectiva clasificación.

TAMIZ	MASA RETENIDA TOTAL (g)	RETENIDO	RETENIDO ACUMULADO	PASANTE
#8	58.40	11.67%	11.67%	88.33%
#10	139.50	27.88%	39.56%	60.44%
#16	294.60	58.88%	98.44%	1.56%
#20	5.30	1.06%	99.50%	0.50%
#30	1.70	0.34%	99.84%	0.16%
#40	0.80	0.16%	100.00%	0.00%
#50	0.00	0.00%	100.00%	0.00%
#140	0.00	0.00%	100.00%	0.00%
#200	0.00	0.00%	100.00%	0.00%
FONDO	0.00	0.00%	100.00%	0.00%
<b>TOTAL</b>	500.30			

Tabla 44 Granulometría del gránulo de caucho reciclado

Fuente: Autor

Realizando una comparativa entre la granulometría y la clasificación expuesta en el numeral 5.2.2.3. se puede apreciar que el material utilizado no cumple para ninguna de dicha clasificación, debido a que el gránulo de caucho utilizado es muy grueso.

### 3.2.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

A continuación, se presenta el costo que tendría 60 adoquines de los diferentes diseños.

Para facilitar los cálculos del costo de 60 adoquines se tomará una variable la cual se ha denominado “Factor de cantidad”, esto debido a que los diferentes diseños de mezcla mostrados anteriormente no producen la misma cantidad de adoquines por lote.

Este “Factor de cantidad”, corresponde a cuantas veces más adoquines se producen, tomando como base la producción de adoquines convencionales de concreto por diseño de mezcla.

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
CEMENTO	21.25	\$ 8,632.50
ARENA BLANCA	90.50	\$ 3,989.55
ARENA AMARILLA	60.00	\$ 2,380.00
GRAVA 3/8	10.75	\$ 85.28
AGUA	10.00	\$ 20.00
GRANO DE CAUCHO	-	\$ -
SUBTOTAL		\$ 13,093.18
FACTOR DE CANTIDAD		1.00
TOTAL		\$ 13,093.18

Tabla 45 Costo de materia prima (Adoquín de concreto)

Fuente: Autor

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
CEMENTO	21.25	\$ 8,632.50
ARENA BLANCA	81.94	\$ 3,047.09
ARENA AMARILLA	60.00	\$ 612.00
GRAVA 3/8	10.75	\$ 429.46
AGUA	10.00	\$ 53.70
GRANO DE CAUCHO	8.56	\$ 8,562.50
SUBTOTAL		\$ 21,337.25
FACTOR DE CANTIDAD		1.08
TOTAL		\$ 19,848.61

Tabla 46 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)

Fuente: Autor

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
CEMENTO	21.25	\$ 8,632.50
ARENA BLANCA	73.38	\$ 3,047.09
ARENA AMARILLA	60.00	\$ 612.00
GRAVA 3/8	10.75	\$ 429.46
AGUA	10.00	\$ 53.70
GRANO DE CAUCHO	17.13	\$ 17,125.00
SUBTOTAL		\$ 29,581.33
FACTOR DE CANTIDAD		1.20
TOTAL		\$ 24,651.11

Tabla 47 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)

Fuente: Autor

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO
CEMENTO	21.25	\$ 8,632.50
ARENA BLANCA	56.25	\$ 3,047.09
ARENA AMARILLA	60.00	\$ 612.00
GRAVA 3/8	10.75	\$ 429.46
AGUA	10.00	\$ 53.70
GRANO DE CAUCHO	34.25	\$ 34,250.00
SUBTOTAL		\$ 46,069.49
FACTOR DE CANTIDAD		1.33
TOTAL		\$ 34,638.71

Tabla 48 Costo de materia prima (Adoquín con adición del 5% de granulo de caucho)

Fuente: Autor

Realizando una comparación de los costos totales para una producción de 60 adoquines se puede observar que a medida que se les va añadiendo más granulo de caucho reciclado éste va aumentando su costo.

## **4. CAPITULO 4**

### **4.1. CONCLUSIONES**

El uso de granulo de caucho reciclado como se puede observar en los resultados obtenidos, hace que la resistencia a la flexotracción disminuya de manera significativa, observando que a medida que se le añada más material reciclado, este va disminuyendo su resistencia.

Por otro lado, la absorción de agua de los adoquines con adición de material reciclado se puede observar que a medida que se le añade un mayor porcentaje de caucho, la absorción tiende a crecer, por lo que se evidencia que, si se le añade más material reciclado a la mezcla, este va a tener una porosidad mayor lo que permitirá que exista una mayor absorción de agua, por otra parte, al relacionar la absorción de agua con la resistencia a la flexotracción se puede observar que la resistencia aumenta a medida que se disminuye la absorción de agua.

Un efecto que genera la sustitución de la arena gruesa por caucho reciclado es la disminución de la densidad, llegando a disminuir considerablemente su masa, lo que permitirá que llegue menos carga en la cama de arena y en la estructura en general.

Adicionalmente, analizando la granulometría del material reciclado se observa que no cumple con ninguna de las categorías mencionadas, esto debido a que el diámetro del material reciclado es muy grueso para encajar en esas, por lo que se debe disminuir el tamaño de las partículas del caucho reciclado.

En cuanto a evaluación económica, la incorporación del caucho eleva los costos de producción, además de la dificultad de conseguir el material en la ciudad de Santa Marta por lo que incrementaría aún más el costo de esta materia prima, no resultaría viable si se comercializa como un adoquín convencional de concreto, ya que se tendría que aumentar el precio de venta por adoquín, se tendrías que buscar otras estrategias de ventas para poder llegar a comercializarlo de una manera económicamente sustentable.

No obstante, los adoquines con adición de caucho reciclado pueden llegar a ser una opción viable para la incorporación de estos en calles, callejones o espacio público, que sean de uso exclusivo de paso peatones, además de ser provechoso para el medio ambiente, también se le puede dar uso a la porosidad que los adoquines con material reciclado poseen, para ayudar a drenar el agua que cae por la precipitación.

Es evidente que la incorporación de este material a los adoquines de concreto ayuda de alguna manera con la reducción de residuos de llantas lo que se traduce en una disminución del impacto ambiental generado por este, es por eso que es necesario ampliar mucho más el conocimiento sobre el comportamiento del granulo de caucho reciclado incorporados mezclas de concreto, esto debido a que en la presente investigación solo se experimentó con 3 diferentes proporciones de incorporación de caucho, de los cuales se pueden observar que se alejan de manera negativa a los adoquines convencionales, cuando de respuesta mecánica se trata. Se hace necesario que se siga investigando mucho más sobre este material alternativo, para mejorar sus propiedades mecánicas y aprovechar la densidad que éste tiene.



## **BIBLIOGRAFÍA**

ARDILA, A. N., & ARRIOLA, E.. (2017). Efecto de la quema de llantas en la calidad del agua de un tramo de la quebrada Piedras Blancas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VIII, 39-59.

ARGOS. Ficha técnica de Cemento estructural max, de Grupo Argos Sitio web: [https://mnisaccp01.blob.core.windows.net/colombia/Contenido/Conoce-nuestros-productos/Cemento/Uso-especializado/Uso-estructural/FT%20CEMENTO%20USO %20E STRUCTURAL%20MAX%20V7%20-%202019.pdf?Ficha-Tecnica=EstructuralMAX](https://mnisaccp01.blob.core.windows.net/colombia/Contenido/Conoce-nuestros-productos/Cemento/Uso-especializado/Uso-estructural/FT%20CEMENTO%20USO%20ESTRUCTURAL%20MAX%20V7%20-%202019.pdf?Ficha-Tecnica=EstructuralMAX)

ATLAS GLOBO (1995). A origem de Roma. Atlas da História Universal – The Times. Editora: O Globo, Rio de Janeiro, 1995.

BARRANTES & HOLGUIN. (2015). Influencia del porcentaje de reemplazo de ceniza volante por cemento, sobre la resistencia a la compresión y absorción en la fabricación de adoquines de tránsito liviano. Lima, Perú: Universidad Nacional De Trujillo.

BITTENCOURT, Sarah Ferreira. Avaliação da resistência à compressão de pavers produzidos com agregados de resíduos de construção e demolição e areia de fundição. 2012. 108 p. Tesis (maestría) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, SP. Recuperado en: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267789>>.

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. (2006). Guía Para el Manejo de Llantas Usadas.

CORREA. (2018). Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio san carlos de la localidad de Tunjuelito. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

CRUZ, L. O. M. (2003). Pavimento intertravado de concreto: Estudo dos elementos e métodos de dimensionamento. 281p. Tesis (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

SANCHEZ F. Curso Básico de Diseño de Pavimentos.

GONZALES. (2015). CAPITULO 1. En Aplicación del caucho reciclado como solución constructiva ecológica. Valencia (98). Valencia: Universitat Politècnica de València.

KNAPTON, J. (1996). Romans and their roads – The original small element pavement technologists, 1996, Israel.

LUND, H. F. (1993). The McGraw – Hill recycling handbook, cap.18, 1993.

NTC 2017 (2004), Norma Técnica Colombiana. Adoquines de concreto para pavimentos. Colombia.

SHACKEL, B. (1990). Design and construction of interlocking concrete block pavements. First edition. Elsevier, New York and London, 1990.

PACHECO & MORELO. (2018). Análisis del Comportamiento Mecánico en Adoquines de Concreto Hidráulico con Sustitución de Agregado Fino por Grano de Caucho Reciclado en los Tamices N°8 al N°20 (2.36mm-0,85mm) y Adición de Polvo Fino de Microsílice. Bogotá D.C: Universidad de La Salle.

PLAZAS & GAMBA. (2015). Caracterización de las propiedades mecánicas de adoquines de concreto con adición de residuo de caucho reciclado producto de llantas usadas. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.