



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS MECÁNICOS Y DISEÑO
DE ADOQUINES FABRICADOS A PARTIR DE RESIDUOS
TRITURADOS DE CAUCHO OBTENIDO DE
NEUMÁTICOS RECICLADOS.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: JUAN CARLOS CÁRDENAS PERALTA

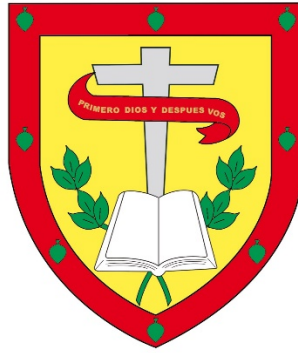
ARON SALVADOR GUNCAY BUSTOS.

DIRECTOR: ING. CARLOS JULIO CORDERO CABRERA, Mgs.

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA INDUSTRIAL Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS MECÁNICOS Y DISEÑO DE ADOQUINES
FABRICADOS A PARTIR DE RESIDUOS TRITURADOS DE CAUCHO
OBTENIDO DE NEUMÁTICOS RECICLADOS.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: JUAN CARLOS CÁRDENAS PERALTA

ARON SALVADOR GUNCAY BUSTOS

DIRECTOR: ING. CARLOS JULIO CORDERO CABRERA, Mgs

CUENCA- ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARACIÓN

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

Juan Carlos Cárdenas Peralta y Aron Salvador Guncay Bustos portadores de las cédulas de ciudadanía N° **0106644735** y **0105790075**. Declaramos ser el autor de la obra: “**Análisis de parámetros mecánicos y diseño de adoquines fabricados a partir de residuos triturados de caucho obtenido de neumáticos reciclados.**”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **24 de abril de 2023**



F:

Juan Carlos Cárdenas Peralta

C.I. 0106644735



F:

Aron Salvador Guncay Bustos

C.I. 0105790075

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Carlos Cárdenas Peralta y Aron Salvador Guncay Bustos, bajo mi supervisión.

Cuenca - de - del 2023

F: 
Ing. Carlos Julio Cordero Cabrera, Mgs.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, Carlos y Dolores, por ser mis guías y soporte en mi transitar universitario, y en mi vida; a mi hijo Juan Sebastián, por ser mi alegría y mi inspiración para superarme y ser mejor cada día; a mi esposa Jessica, por ser mi apoyo diario, mi soporte incondicional y mi lugar seguro; a mi mejor amigo y hermano José Luis: por permanecer a mi lado apoyándome en los buenos y malos momentos; a mi abuelita Laura, por su paciencia y sabiduría; y finalmente a mis hermanas Carla y Paulina, por su cariño, gracias eternas!

Juan Carlos Cárdenas Peralta

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación va dedicado a mi Madre Graciela Bustos quien ha puesto sus manos en el fuego y brindo su confianza para cumplir esta etapa de mi vida, a mis hermanos Carolina, Amanda, Pamela, Santiago, a mi abuelita Delia, mi tía Soledad y mi sobrina Amelia quienes son un pilar fundamental en mi vida.

Aron Salvador Guncay Bustos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por permitirme estar aquí y ser instrumento de sus designios, a mi tutor de tesis Ing. Carlos Julio Calle. Mgs, por su profesionalismo y por guiarnos en este trabajo; al Ing. Marcos Gonzales. Mgs, por brindarnos su apoyo en los ensayos de laboratorio, a los demás docentes, que en este largo caminar me han inspirado y ayudado a adquirir conocimientos que me servirán durante toda mi vida y a mi núcleo familiar por ser mi soporte y compañía siempre.

Juan Carlos Cárdenas Peralta

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis Mgs. Carlos Julio Cordero Cabrera por brindarnos con su tiempo, apoyo, sus conocimientos y ser parte en guiarnos y dirigirnos para el desarrollo de este trabajo de titulación. Al Mgs. Marcos Darío González Maldonado por brindarnos sus conocimientos en los ensayos hechos en la Universidad Católica de Cuenca.

Aron Salvador Guncay Bustos

RESUMEN

En Ecuador, se desechan alrededor de 2.4 millones de neumáticos al año, lo que ocasiona, la contaminación de fuentes hídricas, márgenes de vías y terrenos baldíos. Por lo mencionado, se planteó dar una segunda vida útil a los neumáticos, reciclándolos y utilizando el triturado del material. Existen investigaciones en las cuales, se han analizado el comportamiento del adoquín trabajando con porcentajes de caucho, sin embargo, en esta investigación, se realizó un remplazo con distintos porcentajes de residuo de caucho, distinta forma y diferente material pétreo. Se diseñó un adoquín comparativo con resistencia de $f'c = 35 \text{ Mpa}$; luego, se remplazó porcentajes del agregado fino que compone al adoquín con porcentajes del 5%, 9%, 12%, 15% y 18% de caucho triturado, para analizar el comportamiento mecánico que tiene este material de pavimentación, mediante ensayos de colorimetría, desgaste por abrasión y compresión del adoquín. En cuanto a resultados, se estableció un adoquín óptimo, siendo este el adoquín con remplazo de material fino por 5% de caucho triturado, ya que, cumplió todos los requerimientos normativos, además disminuye el costo en un 1% con respecto al adoquín tradicional.

Palabras clave: Adoquín, caucho triturado, reciclaje, compresión.

ABSTRACT

In Ecuador, about 2.4 million tires are discarded each year, which causes contamination of water sources, roadsides, and vacant lots. Therefore, the proposal was to give a second useful life to tires by recycling them and using the shredded material since some previous studies have analyzed the behavior of pavers working with percentages of rubber. However, in this research, a replacement was carried out with different percentages of rubber residue, shapes, and stone materials. A comparative paver with a resistance of $f'c = 35\text{Mpa}$ was designed. Then, percentages of the fine aggregate that makes up the paver were replaced with percentages of 5%, 9%, 12%, 15%, and 18% of crushed rubber to analyze the mechanical behavior of this paving material, using colorimetry, abrasion wear, and compression tests of the paver. Regarding the results, an optimum paver was established by replacing fine material with 5% of crushed rubber since it fulfilled all the normative requirements. In addition, the cost was reduced by 1% compared to the traditional paver.

Keywords: cobblestone, shredded rubber, recycling, compression

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	2
DEDICATORIA.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INDICE DE CONTENIDO	9
LISTA DE TABLAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
Lista de Anexos.....	13
CAPÍTULO I	15
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Problema.....	16
1.1.1 Formulación del problema	16
1.1.2 Delimitación del problema.....	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
CAPÍTULO II	23
2 MARCO CONCEPTUAL.....	23
2.1 Estado del arte.....	23
2.2 Adoquín.....	25
2.2.1 Importancias del adoquín	26
2.2.2 Ventajas	26
2.2.3 Características y propiedades del Adoquín.....	27
2.2.3.1 Absorción de agua.....	27
2.2.3.2 Esfuerzo de rotura	27
2.2.3.3 Resistencia al desgaste por abrasión	28
2.2.3.4 Resistencia al deslizamiento / resbalamiento.....	28
2.2.3.5 Características.....	28
2.3 Fibra de caucho.....	28
2.3.1 Importancia de la fibra de caucho.....	29
2.3.2 Fibra de caucho de neumáticos.....	30
2.3.3 El caucho bruto absorbe agua.....	30

2.3.4 Neopreno.....	30
2.3.5 Buna o caucho artificial.....	30
2.3.6 Caucho de butilo.....	31
CAPÍTULO III	32
3 MATERIALES Y MÉTODOS	32
3.1 Zona de estudio.....	32
3.2 Metodología.....	32
3.2.1 Diseño de hormigón.....	32
3.2.1.1 Arena y grava	32
3.2.1.2 Cemento.....	32
3.2.1.3 Agua.....	33
3.2.1.4 Caucho.....	33
3.2.1.4 Ensayo de colorimetría	34
3.2.1.5 Granulometría de material pétreo	35
3.2.1.6 Porcentaje de Absorción y porcentaje de humedad	35
3.2.1.6 Diseño de mezcla	36
3.2.1.7 Resistencia al desgaste por abrasión en adoquines.	40
3.2.1.8 Resistencia a compresión de los adoquines.	40
3.2.1.9 Modulo elástico.....	40
CAPÍTULO IV	41
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
4.1 Procedimiento de recolección de datos	41
4.2 Análisis de datos del ensayo de colorimetría	41
4.3 Análisis de datos del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión de los adoquines ...	42
4.4 Análisis de datos del ensayo de compresión.	43
4.5 Curva esfuerzo – deformación unitaria.	45
4.6 Análisis de costos.....	50
4.7 Interpretación de resultados	52
CAPÍTULO V	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
5.1 CONCLUSIONES.....	54
5.2 RECOMENDACIONES.....	56
Referencias Bibliografía	57
ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Residuos reemplazados en los adoquines	25
Tabla 2	Peso específico de la grava y porcentaje de absorción	35
Tabla 3	Peso específico de la arena y porcentaje de absorción	36
Tabla 4	Datos para el diseño de hormigón.....	37
Tabla 5	Relación Agua / Cemento.....	37
Tabla 6	Volumen unitario de agua.....	38
Tabla 7	Resultado de análisis de colorimetría	42
Tabla 8	Resultados del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión.....	43
Tabla 9	Esfuerzo máximo a los 7 días	44
Tabla 10	Esfuerzo máximo a los 14 días.....	44
Tabla 11	Esfuerzo Máximo a los 28 Días	45
Tabla 12	Módulo de elasticidad promedio de los tipos de adoquín.....	49
Tabla 13	APUs de Adoquín sin reemplazo en porcentaje de caucho (Normal).....	50
Tabla 14	APUs de Adoquín reemplazado la arena con caucho triturado al 5%.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Adoquín rectangular (10*20 cm)	26
Figura 2 Cemento Holcim	33
Figura 3 Caucho triturado de neumáticos reciclados.	33
Figura 4 Color normalizado y número del orden en el comparador.....	34
Figura 5 Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción.	37
Figura 6 Granulometría corregida mediante el método de Fuller	39
Figura 7 Ensayo de colorimetría del agregado fino.....	42
Figura 8 Resultados del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión.	43
Figura 9 Esfuerzo Máximo a los 28 Días	45
Figura 10 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Adoquín patrón).....	46
Figura 11 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 5% de caucho).....	46
Figura 12 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 9% de caucho).....	47
Figura 13 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 12% de caucho).....	48
Figura 14 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 15% de caucho).....	48
Figura 15 Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 18% de caucho).....	49
Figura 16 Curva Esfuerzo – Deformación unitaria de los tipos de adoquín	50

Lista de Anexos

Anexo 1. Ensayo de Granulometría en agregados gruesos y finos.....	60
Anexo 2. Ensayo de colorimetría	60
Anexo 3. Herramientas a ocupar para la elaboración de adoquines	62
Anexo 4. Adoquín patrón	62
Anexo 5. Adoquín 5% de neumático triturado	63
Anexo 6. Adoquín 9% de neumático triturado	63
Anexo 7. Adoquín 12% de neumático triturado	64
Anexo 8. Adoquín 15% de neumático triturado	64
Anexo 9. Adoquín 18% de neumático triturado	65
Anexo 10. Ensayo a compresión del adoquín patrón	65
Anexo 11. Ensayo a compresión del adoquín 5% de neumático triturado.....	66
Anexo 12. Ensayo a compresión del adoquín 9% de neumático triturado.....	66
Anexo 13. Ensayo a compresión del adoquín 12% de neumático triturado.....	67
Anexo 14. Ensayo a compresión del adoquín 15% de neumático triturado.....	67
Anexo 15. Ensayo a compresión del adoquín 18% de neumático triturado.....	68
Anexo 16. Muestra de adoquín para ensayos al desgaste de abrasión, con dimensiones 10*10*3 cm.....	68
Anexo 17. Máquina para realizar el ensayo al desgaste por abrasión	69
Anexo 18. Resultados de ensayo de desgaste de abrasión.....	69
Anexo 19. Resultados de ensayo de desgaste de abrasión.....	70
Anexo 20. Resistencia a compresión máxima del Diseño de adoquín patrón, Muestra 1,2 y 3 70	
Anexo 21. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3.....	70
Anexo 22. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 9 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3.....	70
Anexo 23. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3.....	71
Anexo 24. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3.....	71
Anexo 25. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3.....	71
Anexo 26. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín patrón.	72
Anexo 27. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	73
Anexo 28. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	73
Anexo 29. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	74
Anexo 30. Curva fuerza – desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	75
Anexo 31. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín patrón a los 28 días.....	76
Anexo 32. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	76
Anexo 33. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 9 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	77
Anexo 34. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	77
Anexo 35. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	78
Anexo 36. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.....	78
Anexo 37. Corrección granulométrica por el método de Fuller.....	79

Anexo 38.Proceso de fabricación del Adoquín.....80

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la contaminación generada por desechos de neumáticos aumenta debido al incremento de personas que adquieren necesidades de movilización o transporte, para sus diversas actividades cotidianas; es por ello, que generan un consumo de llantas para sus vehículos de transporte. Un automóvil promedio, por año consume un juego de neumáticos (Jaumandreu, 2014). Esto genera un incremento de la demanda de neumáticos y por ende la cantidad de residuos generados por estos. El caucho tarda más de 50 años en descomponerse (Bušić et al., 2018); por lo que, con esta investigación se busca darles un segundo uso a los neumáticos.

Las obras civiles generan contaminación, por los materiales que se emplean para ejecutar dichas obras y los métodos ocupados para la extracción de materia prima. Teniendo en cuenta, que el caucho por sus excelentes propiedades mecánicas es un material que ha sido estudiado en el campo de la ingeniería civil, dando buenos resultados en pavimentos, muros de contención y hormigones (Soto & Marín, 2019), por lo que; se plantea construir un adoquín con porcentajes de residuos de neumáticos reciclados y obtener un producto de buena calidad y contribuir con el medio ambiente.

El adoquín es un material que ha sido utilizado desde las primeras construcciones de vías y estos fueron realizados a partir de piedras que se labraban para tener una capa de rodadura funcional; después se crearon los adoquines de concreto que se ocupan hasta la actualidad (Ramirez et al., 2020). Se pretende realizar un producto que sea amigable con el medio ambiente, y para ello se contará con la colaboración de la fábrica HormiSur, en el Cantón La Troncal. Es por ello que, se propone la fabricación de un adoquín en el que se considera neumáticos reciclados de vehículos, cumpliendo sus resistencias en función a la normativa vigente en Ecuador (NTE INEN 1488, 2010). Con esto se realizó un diseño de hormigón para obtener sus porcentajes de materiales a ocupar, remplazando el agregado fino con el 5, 9, 12, 15 y 18 %, considerando su remplazo óptimo de neumáticos reciclados de vehículos al 5 %, cumpliendo con su resistencia establecida según su normativa. Finalmente, la implementación de esta investigación incentivará a realizar más estudios acerca de la incidencia del caucho triturado obtenidos de neumáticos reciclados.

1.1 Problema.

1.1.1 Formulación del problema

El adoquín en distintas épocas, ha sido utilizado como el material principal en pavimentación de vías. En la actualidad la industria avanzó mucho con sus distintas maquinarias a combustión para crear adoquines, pero esto genera una gran contaminación, para tener un producto terminado para la construcción. En el siglo XXI, todavía no existe materia reciclada que remplace la materia prima en la creación de adoquines (Ramirez et al., 2020).

La fabricación de caucho es un proceso industrial que genera gran contaminación ambiental al momento de su fabricación. Para crear un neumático de transporte pesado se utiliza medio barril de petróleo, lo cual genera una huella de carbono grande (234.3 kg de CO₂ por neumático). Una llanta cuando cumple su vida útil, tiene que ser eliminada y para hacerlo se las queman y se generan gases tóxicos para los seres vivos (Castro, 2007; Soto & Marín, 2019).

Según un estudio realizado por la Unión internacional para la conservación de la Naturaleza (UICN, 2017), establece que existen micropartículas que poseen los productos industriales, entre los cuales están los neumáticos; es por ello, que el 30% de contaminaciones hídricas son generadas por estos residuos. En Ecuador anualmente se desechan 2.4 millones de neumáticos, estos desechos terminan en fuentes hídricas, márgenes de vías y terrenos baldíos. En Ecuador no existe un correcto reciclado del caucho, por la falta de cultura de la población, espacios para reciclaje, problemas económicos y aplicación de legislación ambiental. Los neumáticos que son desechados no cumplen con una segunda vida útil; por lo que, puede ser hábitat de roedores, insectos y otros organismos que perjudican la salud humana y genera contaminación visual (Benavides, 2019; Comercio, 2018).

En épocas de invierno, existen una pérdida de calidad y cantidad del material fino que se utiliza para la fabricación de adoquines, ya que el material se contamina; por lo que, resulta perjudicial para los fabricantes de este producto. Lo mencionado origina una disminución de producción de adoquines y eleva el costo al producto terminado; ya que, las industrias tienen que conseguir la materia prima en canteras distantes a las fábricas (Benavides, 2019).

1.1.2 Delimitación del problema.

En la ciudad La Troncal, las minas de materiales pétreos, extraen la materia prima del rio Bulubulu, lo que conlleva a socavamientos del rio, contaminación ambiental y destrucción de

flora y fauna, contaminación ambiental (Noriega, 2021), es por ello, que se propone el uso del caucho reciclado, en adoquines para pavimentaciones en esta ciudad, para disminuir el daño que provoca la minería de material pitreo en la zona.

1.2 Justificación.

En la ciudad de Quito se ha demostrado que el caucho es un material que en porcentajes óptimos trabaja bien con el hormigón, mejorando la resistencia del adoquín en un 3.2%. La resistencia del adoquín remplazándolo al 12% de caucho triturado, mejora las propiedades mecánicas y reduce costos de producción en un 8% (Chipugsi & Caiza, 2018). La fabricación de adoquines con caucho reciclado permite una segunda vida al material, alargando la vida útil de los rellenos sanitarios; lo que da lugar a que pueda proponer para la ciudad La Troncal con el uso de sus áridos locales y con diferentes porcentajes de caucho triturado.

Al utilizar el caucho como materia prima en la construcción, se tendrán una alternativa viable para el agotamiento de materiales pétreos. El uso del caucho generará que en épocas de invierno se tenga productos terminados de buena calidad y mayor producción para los fabricantes, ya que, que se tendrá mayor materia prima para la elaboración de adoquines. La adopción de materiales reciclables genera más oportunidades en la industria y tecnología del reciclaje. (Soto & Marín, 2019)

El presente trabajo se enfocará en la disminución de los efectos negativos al medio ambiente, invitando a que realicen un reciclado del desecho de los neumáticos en las industrias de construcción, empresas privadas, viviendas, escuelas, entre otros. A ello se pretende rescatar residuos para ser ocupado como una materia prima. Es necesario la búsqueda de la reutilización del residuo de caucho, por lo que, la presente investigación busca reemplazar los materiales pétreos por el caucho triturado, para obtener una resistencia según su normativa establecida por la (NTE INEN 1488, 2010).

Al dar un uso adecuado a los residuos de caucho ayudará a la reducción, del impacto visual generado por la mala disposición de los neumáticos al aire libre. A más de ello, evitará la propagación de enfermedades producidas por vectores que se reproducen en los neumáticos. Se reducirá la contaminación de CO₂ y compuestos orgánicos volátiles que se producen en la quema de neumáticos sin control técnico (Soto & Marín, 2019).

Existen investigaciones, que han experimentado el uso del caucho en la fabricación de adoquines, sin embargo, en este trabajo, se consideró diferentes tamaños de residuos de caucho, distintos porcentajes de remplazo de material y diferentes materiales pétreos. Los materiales pétreos utilizados son de las minas de la ciudad La Troncal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General.

- Analizar los parámetros mecánicos de un adoquín elaborado a partir de caucho de neumáticos reciclados.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Evaluar el agregado fino, de la cantera para la fabricación de adoquines, mediante el ensayo de calorimetría.
- Realizar una dosificación de mezclas adecuadas, para un hormigón de resistencia de 35 Mpa.
- Diseñar un adoquín vehicular, ocupando diferentes porcentajes de caucho reciclado.
- Fabricar un adoquín tradicional y con un porcentaje de neumático reciclado con base al diseño óptimo encontrado.
- Analizar los datos adquiridos del laboratorio sobre el comportamiento del adoquín propuesto trabajando a compresión y abrasión.
- Examinar los costos que tienen la fabricación de adoquines con caucho.

CAPÍTULO II

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Estado del arte.

(Torres Cervera & Jaimes Leal, 2019), tuvieron como objetivo reemplazar el agregado fino de materia prima de adoquín por el Grano de Caucho Reciclado (GCR), los cuales se reemplazaron en volúmenes del 5, 7 y 9 por ciento para ensayar las propiedades mecánicas del mismo. Para el diseño del adoquín se basaron en la Normativa Técnica Colombiana (NTC). La metodología que se empleó para el desarrollo de esta temática es en un gran porcentaje experimental. Una vez elaborada las muestras y pasado el tiempo necesario para sus pruebas, se analizó la absorción del agua en la que se establece que no supere el 7%, cumpliendo con la normativa únicamente la dosificación de remplazo por GCR del 5%. Para el análisis de módulo de rotura la NTC establece que deberá tener un valor límite inferior de 4.2 MPa, lo cual las dosificaciones remplazadas fueron mayor incluso a la muestra del adoquín normal. Finalmente; se realizaron las pruebas de compresión a los 28 días, las cuales fueron insatisfactorias, ya que ninguna superaba ni llegaba a la resistencia de diseño $f'c = 30$ Mpa, por los resultados poco deseados no se analizaron los precios unitarios.

El uso del polvo de caucho, conocido como caucho de miga y triturado con cáscara de mar (SBP) sustituyendo de forma parcial a la arena gruesa fue estudiado por (Kirubagharan et al., 2017; Torres Cervera & Jaimes Leal, 2019), dónde logra producción de bloques de pavimentación de hormigón (CPB). En el estudio se llevó a cabo ensayos de laboratorio para investigar el efecto del tamaño de las partículas de goma de miga. También se hizo una comparación entre el CPB y el bloque de pavimentadora de goma de miga (CRPB) para determinar la resistencia. Para la fabricación de adoquines en este documento se utilizaron porcentajes de remplazo del 5, 10, 15 y 20% por el material fino. En los ensayos realizados a compresión a los 28 días, se obtuvo que el remplazo óptimo es el del 20%, dando una resistencia de 51 MPa, la cual superó a la resistencia de diseño $f'c = 31$ Mpa. Se puede decir que, el caucho de miga es muy útil en un adoquín, ya que mejora considerablemente la resistencia a compresión (64%).

En la investigación de (Kumar et al., 2019), el polvo de caucho triturado de neumáticos de desecho se utiliza para aumentar el impacto y la resistencia a la compresión del bloque de adoquín. La resistencia a la compresión del adoquín estándar fue de 31 KN/mm². A sus 7 días se obtiene su resistencia de 29,2 Mpa. Su segundo ensayo fue de un incremento del 19 % con respecto a los bloques de adoquines normales estándar. Los ensayos en su tercer combo de polvo de caucho

triturado por cemento fue un incremento del 30 % con respecto a los bloques de adoquines normales estándar. En cambio, con el ensayo cuarto y quinto, fue de un incremento del 40 % y del 50 % con respecto a los bloques de adoquines normales estándar.

En la fabricación de adoquines se utilizó el polvillo de caucho como reemplazo del material fino en distintos porcentajes. Para el diseño del adoquín se utilizó la normativa ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). Los parámetros mecánicos que se analizaron concluyeron que el porcentaje óptimo de diseño está en el remplazo del 8 al 12%; indicando que, si se utiliza más polvillo de caucho en los porcentajes de resistencia y tracción este disminuye. Con respecto a los costos indican que el adoquín se abarata de un 5 a un 10 % con respecto a un adoquín normal en Colombia (Ramirez et al., 2020).

Actualmente existen varias investigaciones que tienen como objetivo reemplazar material fino de la composición del adoquín, por porcentajes de distintos residuos ya que esto ayudará a reducir la contaminación ambiental que plantea nuestro tema de fin de carrera.

En los artículos investigados se analizan los parámetros mecánicos del adoquín. Se emplean diferentes normativas de diseño y de interpretación de resultados dependiendo el país en donde se realizaron los ensayos. Para ello se consideraron los siguientes artículos:

Los autores (Ceballos-Medina et al., 2021), establecieron la fabricación de adoquines a partir de escombros que se generan en las construcciones civiles como mortero, ladrillo, concreto, vidrio, madera de guadua y acero estructural. Para la fabricación de estos adoquines se utilizó únicamente, triturado de morteros, ladrillos y concreto. Las pruebas aplicadas al producto final de absorción de agua de la NTC 2017 (Norma Técnica Colombiana) de absorción y flexo tracción cumplen los valores establecidos en la norma.

En la investigación de Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A, se reemplazó vidrios molidos por material fino en porcentajes de 5, 15, 25 y 35%. La resistencia de diseño es de $f'c = 40\text{Mpa}$ mediante la normativa INEN y el resultado de resistencia a desgaste se comparó con la norma europea EN 1338 (Poveda et al., 2015).

En el artículo "Comportamiento Mecánico Del Adoquín De Hormigón Adicionando Residuos Orgánicos Del Maíz" Se analizó el comportamiento de adoquín, reemplazando residuos de maíz por porcentajes de material fino. Se utilizó la Norma Técnica Ecuatoriana NTE, para el diseño y análisis de resultados. Se diseñó con una resistencia $f'c = 250\text{ kg/cm}^2$ y luego se procedió a reemplazar en porcentajes de 6, 7, 10 y 15% (Varas & Areche, 2021).

(Buzón Ojeda, 2010), reemplazó la arena, por el 10% de cuesco de palma africana. Se diseñó mediante la norma ICONTEC que establece que la resistencia no debe ser menor a 3.5 MPa. Para

las pruebas de compresión fueron realizadas a los 28 días de su fabricación.

Se muestra en la Tabla 1, los resultados obtenidos de los distintos residuos reemplazados en los adoquines.

Tabla 1
Residuos reemplazados en los adoquines

	Material	Porcentajes	ENSAYOS		
			Desgaste	Compresión	Absorción (%)
			Fino	(Mpa)	
Adoquín	Vidrio molido	5	28		-
		15	27		-
		25	27	45.4	-
		35	27	45	-
	Residuos de maíz	6	-	-	-
		7	-	24.53	6.08
		10	-	-	-
		15	-	-	-
	Cuesco de Palma Africana	10	-	6.71	-

Fuente: (Autores)

2.2 Adoquín

El adoquín es un material que ha sido utilizado desde las primeras construcciones de vías, se realizaban a partir de piedras que se labraban. Un adoquín, es un material realizado a partir de rocas naturales o artificiales. El uso del adoquín radica principalmente en pavimentación de vías, veredas, áreas peatonales, parques, entre otros. En la actualidad, el adoquín, se construye principalmente a base de concreto; por lo que, se lo puede dar varias formas, para tener un mejor acabado en la capa de rodadura, como se muestra en la Figura 1 (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

En pavimentaciones de centros urbanos, el adoquín es un material muy utilizado, debido que es de fácil colocación y sustitución en caso de daños en la estructura vial. Para realizar este producto, es necesario ejecutar una mezcla de la materia prima que compone al adoquín (cemento, agua, arena y grava) (Hidalgo & Poveda, 2013).

La resistencia que necesita un adoquín es de acuerdo a como se lo utilice; es decir, esta resistencia se encuentra directamente relacionada al espesor del material (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013).

El pavimento se puede utilizar en vías internas de urbanizaciones, avenidas y calles con tráfico que puede ser en vehículos livianos, o en vehículos pesados (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013).

Figura 1
*Adoquín rectangular (10*20 cm)*



Fuente: (Autores)

2.2.1 Importancias del adoquín

- Promueve el diseño universal mediante la planificación y ejecución en obras.
- El adoquín se constituye por piezas independientes que se encajan al movimiento del terreno.
- No presenta aumento de volumen debido al aumento de temperatura.
- No presenta problemas de dilatación.
- Presenta un área comfortable, agradable y cultural.
- Es un producto amigable con el medio ambiente.

2.2.2 Ventajas

Debido a las grandes ventajas, y con la finalidad de obtener un producto de buena calidad y tener en cuenta las expectativas que brinda, es fundamental considerar los siguientes beneficios,(Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013), como son:

- Producto prefabricado.

- Sus agregados cumplen con sus condiciones según establece sus normativas de granulometría.
- No genera complicación al momento de transportarlo
- Colocación es fácil y rápida.
- Fácil sustitución.
- Variedad de modelos y colores.
- Permite filtración del agua.
- Absorbe menor cantidad de calor que el asfalto.
- Permeabilidad: permite la filtración del agua dejando que esta llegue al suelo.
- Durabilidad y vida útil: Se exige una buena calidad para la fabricación de adoquines, con una buena colocación y un buen cuidado este producto tiene una vida útil que supera los 40 años.
- Mantenimiento: El mantenimiento y la reparación del adoquín es muy simple y económico, puesto que no es necesario destruir, ya que al ser bloques ordenados se pueden retirar y reemplazar por unos nuevos.

2.2.3 Características y propiedades del Adoquín.

Los adoquines deben cumplir con los siguientes requisitos para ser considerados aptos para su uso en obra:

2.2.3.1 Absorción de agua

Para cualquier tipo de adoquín el porcentaje máximo de absorción promedio para tres muestras no debe ser mayor al 6%, y cuando se ensaye individualmente no debe superar el 9%. Esto se realiza para asegurar que, en cambios de clima, sobre todo en heladas, los adoquines van a resistir. (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013)

2.2.3.2 Esfuerzo de rotura

La resistencia característica a la rotura no será inferior a 3,6 MPa y ningún valor individual debe ser inferior a 2,9 MPa, ni tener carga de rotura inferior a 250 N/mm (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013).

2.2.3.3 Resistencia al desgaste por abrasión

La abrasión promedio deberá ser 23 mm, según la prueba de disco ancho, y el promedio de la pérdida de espesor no excederá los 3 mm (NTE INEN 3040, 2016).

2.2.3.4 Resistencia al deslizamiento / resbalamiento

En condiciones normales de uso los adoquines deberán mantener la resistencia al deslizamiento durante toda su vida útil. Si se requiere un valor de resistencia al resbalamiento, el mínimo será 45. (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013).

2.2.3.5 Características

Los adoquines presentan diferentes formas y dimensiones, en esta investigación trabajaremos con el adoquín tipo C rectangular conocido como holandés (Instituto del cemento y del hormigón de Chile, 2013), sus especificaciones técnicas son:

Forma: Adoquín tipo C, rectangular recto biselado.

Longitud: 200 mm

Ancho: 100 mm

Espesor: 80 mm

Áridos: Arena fina y Grava

Material a sustitución: Caucho triturado

Unidades por metro cuadrado: 50 unidades

Peso aproximado: 91 kg aproximado

Resistencia a compresión: 300 - 450 kgf/cm²

Es necesario tener en cuenta que las dosificaciones de los diseños de mezcla se van clasificando para después iniciar con una mezcla y fabricación de las muestras de referencia y las muestras que contienen adiciones de residuo neumático en diferentes proporciones.

2.3 Fibra de caucho

Las fibras de cauchos son aquellos residuos que se procesan de una manera mecánica, considerando que una cinta transportadora lleva las fibras hasta aquellas enormes cribas, por

consiguiente, es importante determinar las fibras de caucho por sus distintos tamaños para después realizar un proceso que permita purificar las fibras y sobre todo eliminar los residuos no utilizables (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

Es necesario saber que este material en bruto se convierte en un producto semi manufacturado adecuado, es decir, teniendo presente que en aquellos elementos se requieren de mayor capacidad de absorción de impactos (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

La estructura del caucho por lo general carece de sustituyentes polares, en donde su atracción intermolecular define los medios de las fuerzas de Van Der Waals, puesto que su estructura es débil por su configuración en cuanto a sus dobles enlaces, en cuanto a sus propiedades se determina que existe una gran diferencia sobre aquellas propiedades del caucho natural y del caucho gutta percha, por lo que se recalca que estos tipos de cauchos son extraídos de árboles muy diferentes, ya que el caucho normal posee una estructura amorfa, en donde su temperatura ambiente tiene un comportamiento elástico y por medio de un estiramiento ocasiona una cristalización (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

2.3.1 Importancia de la fibra de caucho

La fibra de caucho es de gran importancia, ya que en su elección van interviniendo distintos factores, en el cual son considerados como aquellos elementos dominantes de la estructura del neumático, teniendo en cuenta que lo que hace referencia a la misma fibra va obteniendo mayor importancia sobre sus características, tanto del precio como de su disponibilidad (Coronado, 2002).

Se debe considerar en el momento que se va empleando el algodón se encuentra limitado algunos tejidos especiales y sobre todo algunos períodos de preponderancia que ha sido substituido de forma progresiva por el nilón y el poliéster, puesto que el acero ha sido usado cada vez más en los neumáticos radiales y de fibra en vidrio, como algo competidor del acero y en algunos casos también de las fibras sintéticas, por consiguiente, el empleo de las distintas fibras se ve amenazado por nuevos elementos técnicos experimentales sin fibras.

Por otro lado, es importante determinar que aquellas fibras que han sido dotadas como bajo alargamiento permiten mejorar la flexibilidad del material, sobre todo, limitan el calentamiento en las condiciones de trabajo, puesto que no existen fibras capaces de satisfacer aquellas características exigidas, por tal razón, estos neumáticos se fabrican usando mediante varios elementos, fibras de naturaleza que son empleadas a rayón o como el nilón en la carcasa de acero de sus bordes, teniendo en cuenta que la estabilidad térmica del rayón es mejor que la del nilón y el poliéster y su resistencia del nilón a los choques, a las flexiones, a la compresión y al esfuerzo, es por eso, que el acero posee una elevada carga de rotura y es poco sensible al calor (Hidalgo & Poveda, 2013).

2.3.2 Fibra de caucho de neumáticos

Un neumático ha sido considerado como aquel elemento que permite a un vehículo desplazarse de un lugar a otro en una forma suave que se da través de superficies lisas, por cuanto, se trata de una cubierta de caucho que contiene aire y por lo general hace que soporte al carro como a su carga (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

En la actualidad, es necesario determinar que la mayoría de neumáticos sean de vehículos pasajeros como de camión, y estos se encuentran compuestos por una banda de rodamiento elástica, así como una cintura prácticamente inextensible, la complejidad que se da tanto de su forma como de sus funciones, determinan que el neumático cumple una complejidad de materiales que lo componen, como lo es el caucho.

Entre los tipos de cauchos que se deben considerar son los siguientes:

2.3.3 El caucho bruto absorbe agua.

Son considerados como aquellos coagulantes que son usados en el látex, ya que al momento de preparar el caucho van afectando el grado de absorción de agua; para ello se van usando ácido clorhídrico, sulfúrico o alumbre, donde se obtienen cauchos con poder de absorción relativamente elevado (Hidalgo & Poveda, 2013).

2.3.4 Neopreno.

Son considerados como uno de los primeros cauchos sintéticos que han sido alcanzados gracias a la investigación, el polímero del monómero cloropreno, de fórmula química $\text{CH}_2\text{-C}(\text{Cl})\text{CH-CH}_2$, al igual es importante determinar aquellas materias primas del cloropreno, puesto que son el etino y el ácido clorhídrico (Hidalgo & Poveda, 2013).

El neopreno es resistente al calor y aquellos productos químicos como aceites y petróleo, los mismos que se emplean en tuberías de conducción de petróleo y como aislante para cables y maquinaria.

2.3.5 Buna o caucho artificial.

Son aquellos químicos alemanes que trata de la polimerización de dos monómeros denominados comonómeros, por cuanto, esto produce a partir del ácido cianhídrico (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

El Buna-N es un caucho muy indispensable que requiere siempre de la resistencia para que exista una mejor acción de aceites y la abrasión de esta, es importante porque en él se va obteniendo un caucho industrialmente copolimerización de butadieno y estireno (Armas Juan &

Baño Nathalia, 2013).

2.3.6 Caucho de butilo.

Este tipo de caucho sintético obtiene copolimerización de isobutileno con butadieno o isopreno, por cuanto, es un plástico que se puede trabajar como el caucho natural, pero al mismo tiempo es difícil de vulcanizar, ya que no es flexible como el caucho natural y otros sintéticos, es muy resistente a la oxidación y a la acción de productos corrosivos, esto se da por la baja permeabilidad a los gases porque se lo utiliza en los tubos interiores de las llantas de automóviles (Armas Juan & Baño Nathalia, 2013).

CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Zona de estudio

La zona de estudio del proyecto es el cantón La Troncal, ubicado en la provincia del Cañar y los laboratorios de suelos de la Universidad Católica De Cuenca. Los materiales pétreos serán extraídos de las canteras de esta zona, al igual que el caucho que será remplazado por la arena. Los ensayos planteados en los objetivos se lo realizaran en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca.

3.2 Metodología

3.2.1 Diseño de hormigón.

El presente trabajo es teórico experimental, ya que su objetivo principal es el de construir adoquines usando residuos de caucho de neumáticos triturados, como remplazo de material pétreo, para lograr una propuesta de mitigación ambiental. Para el proceso de investigación y elaboración de adoquín, se realizó cinco diseños con distintos porcentajes de residuos de caucho de neumáticos reciclados que remplazaran al material fino en porcentajes de 5, 9, 12,15 y 18%. La norma que se ocupó para el diseño es del American Concrete Institute ACI 211 y la Norma NEC INEN 1488. La resistencia de diseño se consideró de la norma (NTE INEN 1488, 2010), mediante el apartado 2.10 en el cual establece que para adoquines de estacionamiento y calles residenciales con un tráfico de 0 a 150 vehículos el $f'c$ de diseño debe ser mayor a 30 Mpa, por tanto, el valor que se escogió de 35 Mpa. La mezcla de hormigón y los adoquines serán realizados en la fábrica HormiSur, en el cantón la Troncal.

3.2.1.1 Arena y grava

La arena y la grava, fueron tomadas de la cantera CADME, en el cantón La Troncal; para el agregado fino se consideró un agregado máximo de 5mm y para el grueso se consideró de un tamaño máximo $\frac{1}{4}$ de espesor del adoquín, según la norma (NTE INEN 1488, 2010).

3.2.1.2 Cemento

Para la selección del cemento, se verificó que cumpla con la norma (NTE INEN 2380, 2011) y que sea cemento portland, para la realización del hormigón, se ocupó cemento de la empresa Holcim, de uso general y tipo 1, que es el más ocupado en obras civiles, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2
Cemento Holcim



Fuente: (Autores)

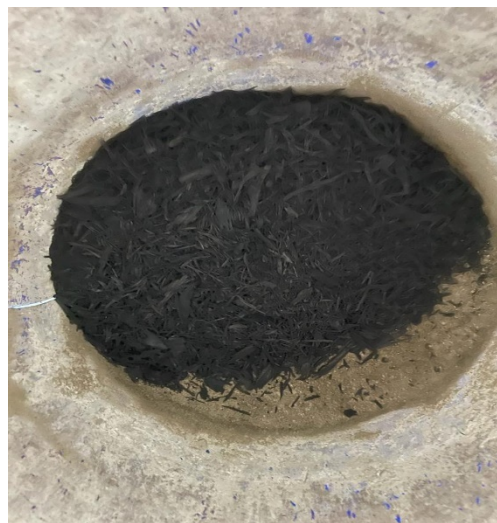
3.2.1.3 Agua

El agua es uno de los parámetros más influyentes en preparación del hormigón, al igual que, para el curado del producto terminado; para la adición del agua, aseguraremos que sea agua dulce y limpia, para que no contamine el hormigón.

3.2.1.4 Caucho

En cuanto a los residuos de caucho, se recicló los neumáticos que hayan cumplido su vida útil. Para este trabajo de fin de carrera, el triturado de caucho se consiguió en la empresa Durallanta, para poder remplazarlo en los porcentajes planteados, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3
Caucho triturado de neumáticos reciclados.



Fuente: (Autores)

3.2.1.4 Ensayo de colorimetría

El ensayo de colorimetría, permite determinar el grado de impurezas y presencia de materia orgánica en el árido fino. El procedimiento, se realizó como lo establece la norma INEN 855 y consiste en agregar 130 cm³ de arena en un recipiente de vidrio, seguidamente; se añadirá solución de hidróxido de sodio (3%) en 97 partes de agua, hasta alcanzar un volumen de 200 cm³ entre el árido y el líquido, inmediatamente; se tapará el envase, se agitará y quedará en reposo durante 24 horas. Para determinar el color, se disuelve en una botella de vidrio una solución de dicromato de potasio grado reactivo en ácido sulfúrico concentrado, en proporción de 0.250g en 100 cm³. Por último; se compara la botella de la muestra de material, con el color de la luz de la botella de color normalizado y se registra lo obtenido, con la escala de Gardner (NTE INEN 855, 2010).

Para interpretar el resultado, se compara el color normalizado con el número de orden, si el color sobrepasa el número de orden 3 del comparador, se considera que la muestra contiene grados altos de impurezas, como se muestra en la Figura 4 y Figura 5 .

Figura4

Color normalizado y número del orden en el comparador

Color normalizado escala de Gardner No.	Número de orden en el comparador
5	1
8	2
11	3 (normalizado de referencia)
14	4
16	5

NOTA. Se debe utilizar el procedimiento de comparación descrito en el numeral 5.7.1, excepto que se debe reportar el número del vidrio del comparador que es más cercano al color del líquido que sobrenada sobre la muestra de ensayo. Cuando se utiliza este procedimiento, no es necesario preparar la solución de color normalizado.

Fuente: (NTE INEN 855, 2010).

Figura 5

Color normalizado y número del orden en el comparador



Fuente: (Autores)

3.2.1.5 Granulometría de material pétreo

Esta prueba permite conocer la distribución de tamaños del material pétreo, a través del proceso de tamizado. La normativa ocupada para comprobar si las curvas granulométricas se encuentran dentro de los límites fue la norma (NTE INEN 696, 2011); mediante la cual se obtuvo que solo el material grueso cumple con los límites, mientras que, al agregado grueso se realizó la corrección por el método de Fuller – Thompson (Giraldo, 2004).

3.2.1.6 Porcentaje de Absorción y porcentaje de humedad

El porcentaje de absorción es necesario considerar en el diseño de hormigón, ya que, permite corregir la humedad de los agregados que conforman al adoquín. Para la realización del ensayo absorción del agregado fino y grueso, se tomó una muestra de arena y se la calentó a 100 °C; para luego, dejarlo reposar 24 horas y que alcance el estado saturado superficialmente seco (SSS). Para comprobar que el material haya alcanzado el estado SSS, se lo coloca en un cono y se lo compacta 25 veces, se retira el molde y si el material se pierde la forma del molde es que ha alcanzado el estado SSS (NEC INEN 856, 2011).

Para determinar la densidad del material, se realiza el método del picnómetro, que consiste en llenar con agua el picnómetro hasta la marca de referencia, luego se agrega 500g de arena en estado SSS, se elimina el aire atrapado y se procede a pesar la arena, agua y el picnómetro. Por último, se retira la arena del picnómetro y se la seca en horno a 110 (NEC INEN 856, 2011).

Para obtener el peso del picnómetro se llena con agua hasta la marca calibrada, agregando 500 g ± 10 g de la arena en estado SSS, se debe rodar y sacudir el picnómetro para eliminar el aire. También se debe pesar el agua, más la arena y más el picnómetro. Se retira la arena del picnómetro, y se calienta en el horno a 110 °C y por último se pesa el picnómetro más agua para tener los ensayos (NEC INEN 856, 2011). Los valores de densidad y absorción de los áridos se presentan en la *Tabla 2* y *Tabla 3*.

Tabla 2

Peso específico de la grava y porcentaje de absorción

PESO ESPECÍFICO DE LA GRAVA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN			
A=	788.0	g.	PESO DEL MATERIAL SUPERFICIALMENTE SECO Y SATURADO
B=	2873.50	g.	PESO DEL PIGNÒMETRO + AGUA + MUESTRA
C=	2397.00	g.	PESO DEL PIGNÒMETRO + AGUA
D=	762.00	g.	PESO DEL MATERIAL SECO
PESO ESPECÍFICO SECO	<u>D</u>	2.4462	g/cm³

	$A - (B - C)$		
PESO ESPECÍFICO SATURADO SUPERFICIALMETE SECO	$\frac{A}{A - (B - C)}$	2.5297	g/cm³
PESO ESPECÍFICO APARENTE	$\frac{D}{D - (B - C)}$	2.669	g/cm³
% DE ABSORCIÓN	$\frac{100(A - D)}{D}$	3.4121	%

Fuente: (Autores)

Tabla 3
Peso específico de la arena y porcentaje de absorción

PESO ESPECÍFICO DE LA ARENA: MÉTODO DEL PIGNÓMETRO			
Material Pasante en el Tamiz No. 4			
A=	837.0	g.	PESO DEL MATERIAL SUPERFICIALMENTE SECO Y SATURADO
B=	2893.00	g.	PESO DEL PIGNÓMETRO + AGUA + MUESTRA
C=	2397.00	g.	PESO DEL PIGNÓMETRO + AGUA
D=	817.00	g.	PESO DEL MATERIAL SECO
PESO ESPECÍFICO SECO	$\frac{D}{A - (B - C)}$	2.3959	g/cm³
PESO ESPECÍFICO SATURADO SUPERFICIALMETE SECO	$\frac{A}{A - (B - C)}$	2.4545	g/cm³
PESO ESPECÍFICO APARENTE	$\frac{D}{D - (B - C)}$	2.5452	g/cm³
% DE ABSORCIÓN	$\frac{100(A - D)}{D}$	2.448	%

Fuente: (Autores)

3.2.1.6 Diseño de mezcla

Para el diseño de la mezcla se ocupó la normativa (ACI 211, 2005), en el cual se establece la dosificación del hormigón, para un saco de cemento. En este método ocupamos como datos iniciales las características del agregado fino y grueso, así como la resistencia de diseño

previamente establecida. Para la dosificación del hormigón se ocuparon los siguientes datos de partida, establecidos en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos para el diseño de hormigón.

DATOS PARA EL DISEÑO DE HORMIGÓN.	
f'c	35 Mpa (305.91 kgf/cm ²)
Densidad del cemento	2.9 g/cm ³
Densidad real del árido grueso	2.53 g/cm ³
Densidad real del árido fino	2.45 g/cm ³

Fuente: (Autores)

Para escoger el asentamiento, se interpretó la tabla del método ACI 211, mostrada en la Figura 5, en la que explica que el asentamiento para prefabricados de alta resistencia es de 0 a 2 cm, por lo que seleccionó de 2 cm para el diseño.

Figura 6

Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción.

Cuadro 9. Asentamiento Recomendados para Diferentes Tipos de Construcción

CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO (MM)	EJEMPLO DE TIPO DE CONSTRUCCIÓN	SISTEMA DE COLOCACIÓN	SISTEMA DE COMPACTACIÓN
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta, concretos de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibraciones intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: (ACI 211, 2005)

La relación Agua – cemento ($R=A/C$), se interpretó en la *Tabla 5* del método ACI 211, en la cual se interpolaron los valores y el resultado fue de 0.44.

Tabla 5

Relación Agua / Cemento

RELACIÓN AGUA - CEMENTO

Resistencia a la compresión a los 28 días (f'c) (Kg/cm2)	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
450	0.38	—
400	0.43	—
350	0.48	0.4
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

Fuente: (Autores)

El cálculo de agua se realizó mediante el valor máximo de agregado grueso, para ello, se escogió el valor de la tabla de volumen unitario del agua, del método ACI, en el que se obtuvo un valor de 207 lt/m³ expresada en la *Tabla 6*,

Tabla 6
Volumen unitario de agua

VOLUMEN UNITARIO DE AGUA								
Asentamiento	Agua, en lt/ m ³ , para los tamaños máximos nominales de agregado grueso y consistencias indicados							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	...
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154	...

Fuente: (ACI 211, 2005)

Para la determinación del cemento, se utilizó la fórmula de $C = \frac{A}{R}$, En la cual se obtuvo el valor de 470.45 kg/m³.

Donde:

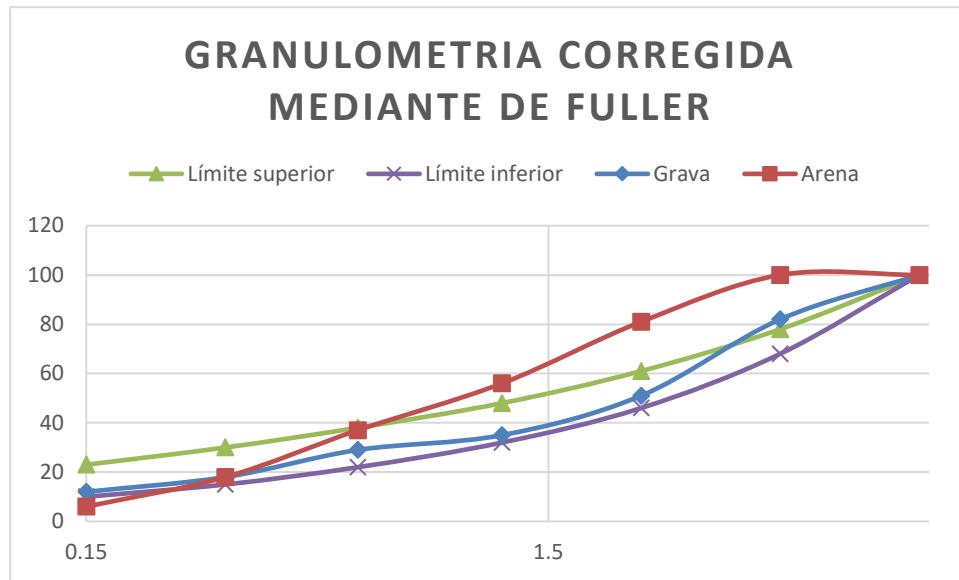
A= 207 lt/m³

R= 0.44

C = 470.45 kg/m³

Para el cálculo de los agregados, se utilizó el método de Fuller, en el que se obtuvo que el total de volumen de agregados es 50% de volumen agregado fino más 50% de volumen de agregado grueso. Mostrándose en Figura 6.

Figura 7
Granulometría corregida mediante el método de Fuller



Fuente: (Autores)

Con los valores obtenidos, se procedió a obtener el peso de cada agregado, para 1 adoquín con volumen de 0.0016m³, en los cuales se obtuvo un peso de:

Peso del agregado fino = 1.274 kg

Peso del grueso= 1.236 kg

Peso de agua = 0.3312 kg

Peso del cemento = 0.7536 kg

Por último, se realizó la corrección por humedad y se obtuvieron los nuevos pesos, siendo estos de:

Peso del agregado fino = 1.243 kg

Peso del grueso= 1.206 kg

Peso de agua = 0.376 kg

Peso del cemento = 0.7536 kg

3.2.1.7 Resistencia al desgaste por abrasión en adoquines.

Este ensayo se realizará al terminar sus 28 días obteniendo su resistencia de diseño, se le considera el desgaste por medio de la abrasión ejercida mediante un disco de acero y material agresivo, el cual tendrá contacto con la cara de biselado del adoquín.

Para la cara superior del biselado, en la que se le ensaya, debe cumplir con una cara plana siendo el caso que la cara presente mucha rugosidad deberá ser pulida. Este material debe estar limpio y seco para poder ejecutar su ensayo (NTE INEN 3040, 2016).

Para realizar este ensayo se utilizó la máquina de rueda ancha, la cual gira a 75 revoluciones por minuto, el adoquín ensayado consto de medias de 10 cm * 10 cm * 3cm, debido a que la empresa Graiman en la que se realizó el ensayo, requirió estas dimensiones, mostradas en el Anexo 16. Las muestras ensayadas fueron de tres especímenes, por cada porcentaje de caucho remplazado y del adoquín patrón, mostrada en el Anexo 19.

3.2.1.8 Resistencia a compresión de los adoquines.

Para la elaboración de los ensayos de resistencia a compresión, se consideró sus días a partir del cual fue realizado el adoquín, siendo el caso de los 7, 14 y 28 días, se analizan sus valores si aumenta o disminuyen su resistencia, estos adoquines serán sometidos en agua durante su tiempo establecido un día antes se saca el adoquín y se deja secar para ser utilizados en el ensayo.

Se rompió 3 muestras de cada adoquín, el adoquín patrono, al igual que los adoquines con remplazo de caucho triturado, se sometieron a ensayos a los 7, 14 y 28 días, dándonos un total de 54 muestras. Para este ensayo se usó la prensa de compresión de los laboratorios de la Universidad Católica de Cuenca, y se comparó los resultados con la resistencia de diseño.

3.2.1.9 Modulo elástico.

Para la obtención del módulo de elasticidad, se analizaron los esfuerzos promedios máximos y sus deformaciones unitarias, para cada porcentaje de neumáticos reciclados que se utilizó. Considerando su grafica en esfuerzo - deformación unitaria, y la pendiente de la recta generada en los valores de esfuerzos del 35% al 50% del máximo esfuerzo (ACI 211, 2005), se obtuvo la pendiente de la recta, que es igual al módulo elástico.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procedimiento de recolección de datos

En esta investigación, primero se realizó los ensayos de los agregados que componen al hormigón, mediante los ensayos de colorimetría, granulometría, peso específico, porcentaje de humedad y porcentaje de absorción, para proceder con el diseño de hormigón mediante el método ACI 210.

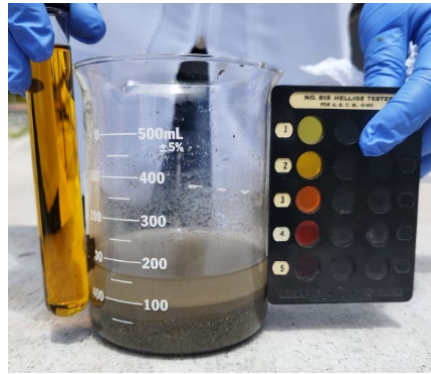
Con el diseño de hormigón, se realizó adoquines los cuales ayudan a comparar la resistencia a compresión entre un adoquín normal y adoquines con remplazo de arena por caucho triturado de neumáticos en porcentajes de 5, 9, 12, 15 y 18%.

Las muestras de adoquines se sometieron a las pruebas de compresión a los 7, 14 y 28 días. Para la interpretación del diseño se analizaron los resultados en función al ensayo a compresión y abrasión.

4.2 Análisis de datos del ensayo de colorimetría

Este ensayo se realizó en los laboratorios de aguas de la Universidad Católica de Cuenca, se determinó, si el material pétreo cumple con sus especificaciones técnicas según su NTE INEN 855. El resultado el color de la muestra, está en el número de orden en el comparador 2, lo cual se refleja en la *Figura 7*. El material fino es de buena calidad, ya que se encuentra por debajo del color normalizado según lo que establece la norma ecuatoriana, lo mencionado se muestra en la *Tabla 7*.

Figura 8
Ensayo de colorimetría del agregado fino



Fuente: (Autores)

Tabla 7
Resultado de análisis de colorimetría

Color normalizado escala de Gardner	Numero de orden en el comparador
No.	
5	1
8	2
11	3 (normalizado de referencia)
14	4
16	5

Fuente: (NTE INEN 855, 2010)

4.3 Análisis de datos del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión de los adoquines

Una vez, cumplido los 28 días de realizar los adoquines, se someten las pruebas de desgaste de abrasión. Los datos son interpretados con la norma NTE INEN 3040; con el fin de, verificar si son aptos para uso en pavimentos.

La prueba de resistencia al desgaste por abrasión, se la realizo en los laboratorios de la empresa Graiman, se ensayaron tres muestras de cada tipo de adoquín, las dimensiones de cada muestra fueron de 10 x 10 x 3 cm cada una, debido, a que son las máximas dimensiones que permitía la maquina con la que se realizó el ensayo (máquina de rueda ancha), los resultados son mostrados en la Tabla 8 y *Figura 8*.

Tabla 8

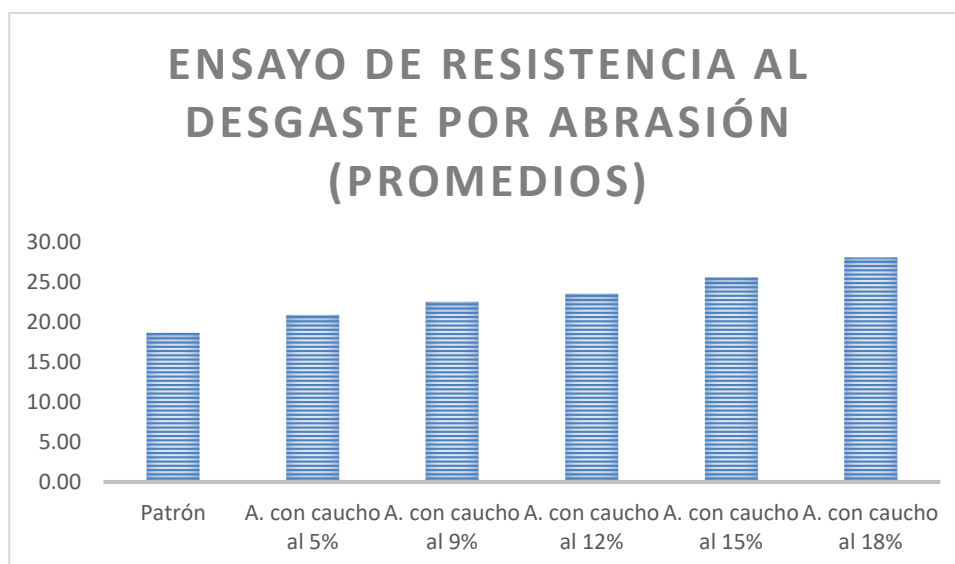
Resultados del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión.

Tipo de adoquín	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Promedio	
	Longitud (mm)	Longitud (mm)	Longitud (mm)	Longitud (mm)	
Patrón	18.18	19.15	18.65	18.66	Cumple
A. con caucho al 5%	20.12	21.51	21.15	20.93	Cumple
A. con caucho al 9%	22.32	22.1	23.25	22.56	Cumple
A. con caucho al 12%	23.62	23.15	23.86	23.54	No cumple
A. con caucho al 15%	25.68	25.17	25.92	25.59	No cumple
A. con caucho al 18%	27.98	28.12	28.17	28.09	No cumple

Fuente: (Autores)

Figura 9

Resultados del ensayo de resistencia al desgaste por abrasión.



Fuente: (Autores)

Los resultados de promedios indican que tres tipos de adoquines (Adoquín patrón, Adoquín con remplazo del 5% y 9% de caucho por material fino) cumplen con lo especificado en la normativa NEC INEN 3040, la cual indica que la huella máxima de cada adoquín deberá ser menor o igual a 23mm.

4.4 Análisis de datos del ensayo de compresión.

Los resultados de las muestras de adoquines, fueron sometidas a este ensayo a los 7, 14 y 28 días en los laboratorios de la Universidad Católica de Cuenca, con el fin de obtener un adoquín óptimo, comparado con el normal. El $f'c$ en esta investigación fue de 35 Mpa, debido, a que es el

valor mínimo que establece la normativa NEC INEN 1488 es de 30 Mpa, es por ello, que se realizó el diseño para 35 Mpa.

Los resultados de resistencia de los adoquines a los 7 y 14 días, establecen que el adoquín patrón y el adoquín con remplazo de caucho al 5% por material fino superan en su edad el 60% y 90% del $f'c$ de diseño (35Mpa). Los valores señalados se muestran en la *Tabla 9* y *Tabla 10*.

Tabla 9
Esfuerzo máximo a los 7 días

ESFUERZO MÁXIMO A LOS 7 DÍAS				
Tipo de adoquín	Muestra 1 (Mpa)	Muestra 2 (Mpa)	Muestra 3 (Mpa)	Promedio (Mpa)
Patrón	25.06	23.52	24.29	24.29
Con caucho al 5%	24.11	22.63	23.37	23.37
Con caucho al 9%	18.56	17.42	17.99	17.98
Con caucho al 12%	13.87	13.02	13.44	13.44
Con caucho al 15%	13.43	12.60	13.01	13.01
Con caucho al 18%	6.86	6.44	6.65	6.65

Fuente: (Autores)

Tabla 10
Esfuerzo máximo a los 14 días

ESFUERZO MÁXIMO A LOS 14 DÍAS				
Tipo de adoquín	Muestra 1 (Mpa)	Muestra 2 (Mpa)	Muestra 3 (Mpa)	Promedio
Patrón	35.09	34.71	34.32	34.71
Con caucho al 5%	33.76	33.39	33.02	33.39
Con caucho al 9%	25.98	25.69	25.41	25.69
Con caucho al 12%	19.42	19.21	18.99	19.21
Con caucho al 15%	18.80	18.59	18.38	18.59
Con caucho al 18%	9.61	9.50	9.40	9.50

Fuente: (Autores)

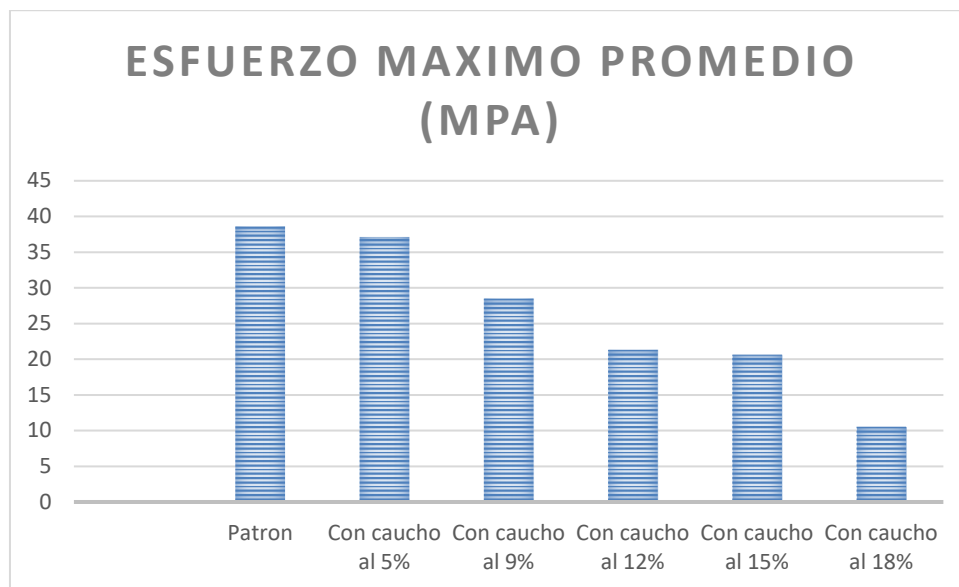
Las rupturas realizadas a los 28 días de edad de los adoquines, en la cual la resistencia es la máxima que alcanza el hormigón de cada muestra, indican dos muestras de adoquines cumplieron la resistencia de diseño, lo que permite utilizar estas muestras en pavimentación, ya que, se cumple con lo establecido en la norma NEC INEN 1488. En la *Tabla 11* y *Figura 9* se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de compresión.

Tabla 11
Esfuerzo Máximo a los 28 Días

Tipo de adoquín	Esfuerzo máximo promedio (KN/mm ²)	Esfuerzo máximo promedio (Mpa)	
Patrón	0.038	38.561	Cumple
Con caucho al 5%	0.037	37.096	Cumple
Con caucho al 9%	0.028	28.549	No cumple
Con caucho al 12%	0.021	21.340	No cumple
Con caucho al 15%	0.020	20.656	No cumple
Con caucho al 18%	0.010	10.557	No cumple

Fuente: (Autores)

Figura 10
Esfuerzo Máximo a los 28 Días



Fuente: (Autores)

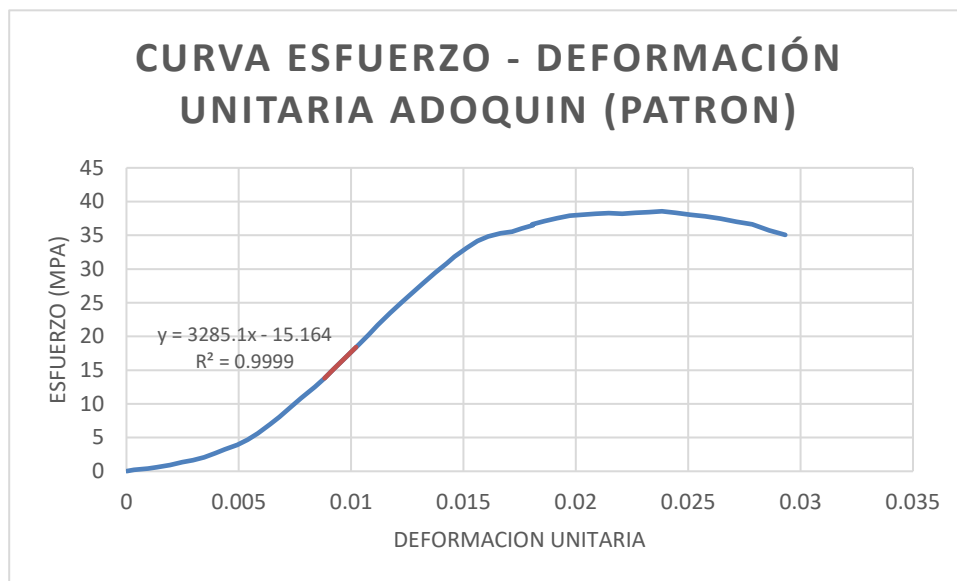
El diseño de adoquín con remplazo de caucho del 5%, es el adoquín óptimo, ya que está en 1.46 Mpa menos que el adoquín normal, pero cumple con la resistencia de diseño establecida.

4.5 Curva esfuerzo – deformación unitaria.

Se realizó las curvas de esfuerzo - deformación unitaria de cada muestra ensayada a los 28 días, luego se realizó el promedio de cada porcentaje de remplazo para poder obtener el módulo elástico, deformación unitaria máxima, Esfuerzo último y deformación elástica. Los módulos elásticos permitidos para el adoquín varían entre 2000 a 3500 Mpa según (Construmatica, 2011).

La muestra de adoquín sin remplazo de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.0161 y una deformación máxima de 0.023; con respecto, al módulo elástico se obtuvo un valor de 3285.1 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 10*.

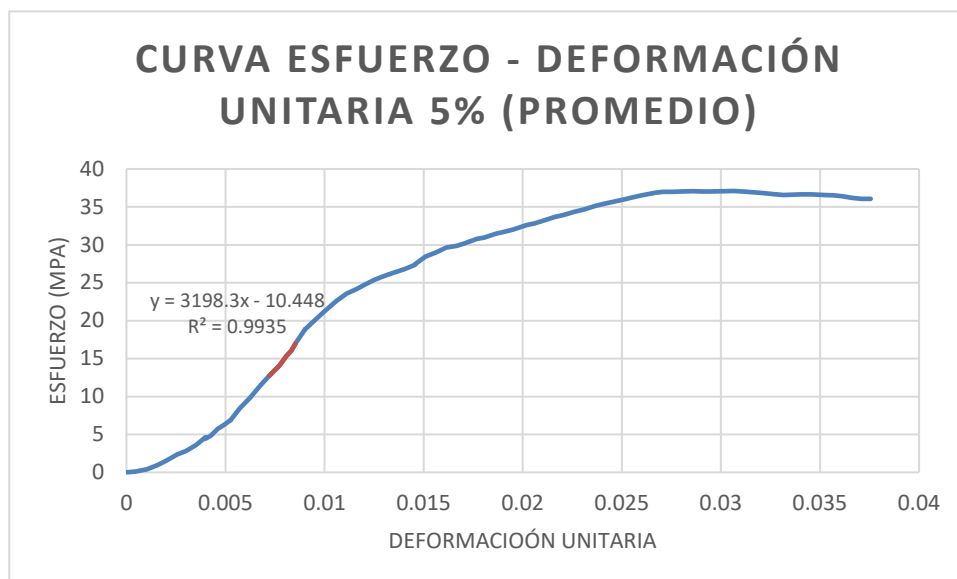
Figura 11
Curva esfuerzo – deformación unitaria (Adoquín patrón)



Fuente: (Autores)

La muestra de adoquín con remplazo de material fino por 5% de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.021 y una deformación máxima de 0.037; con respecto, al módulo elástico se obtuvo un valor de 3198.3 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 11*.

Figura 12
Curva esfuerzo – deformación unitaria (Remplazo 5% de caucho)

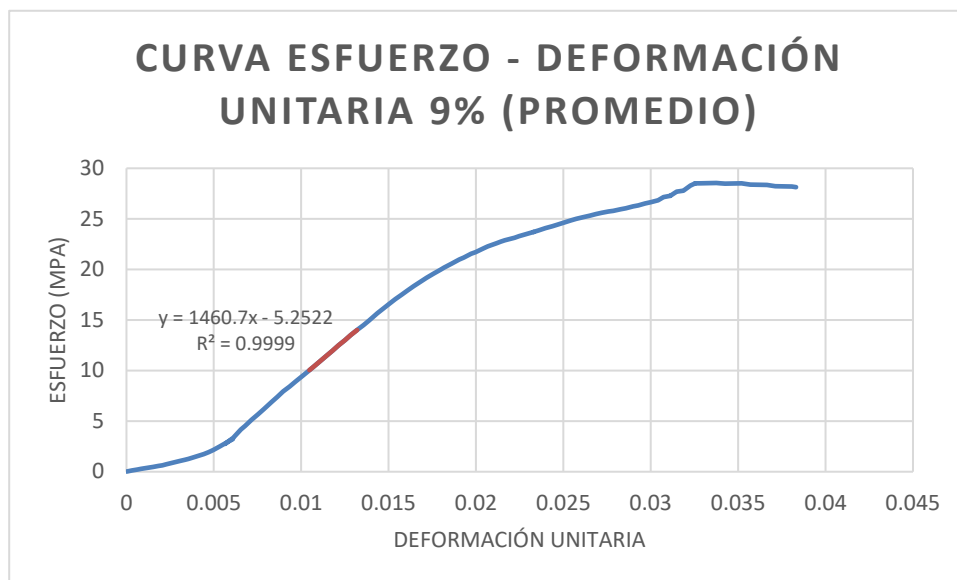


Fuente: (Autores)

La muestra de adoquín con remplazo de material fino por 9% de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.027 y una deformación máxima de 0.033; con respecto, al módulo elástico se obtuvo un valor de 1460.7 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 12*.

Figura 13

Curva esfuerzo – deformación unitaria (Remplazo 9% de caucho)

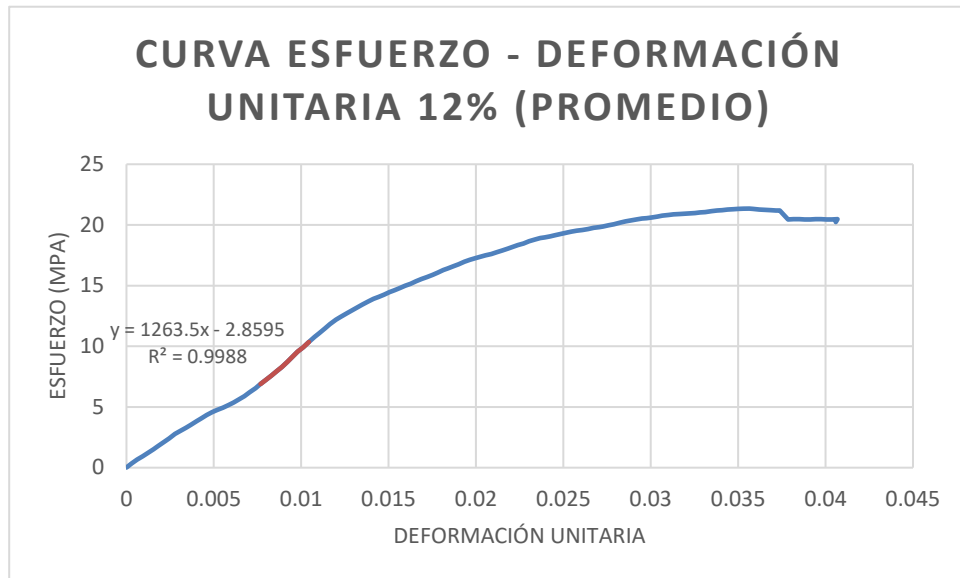


Fuente: (Autores)

La muestra de adoquín con remplazo de material fino por 12% de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.028 y una deformación máxima de 0.034; con respecto, al módulo elástico se obtuvo un valor de 1263.5 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 13*.

Figura 14

Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 12% de caucho)

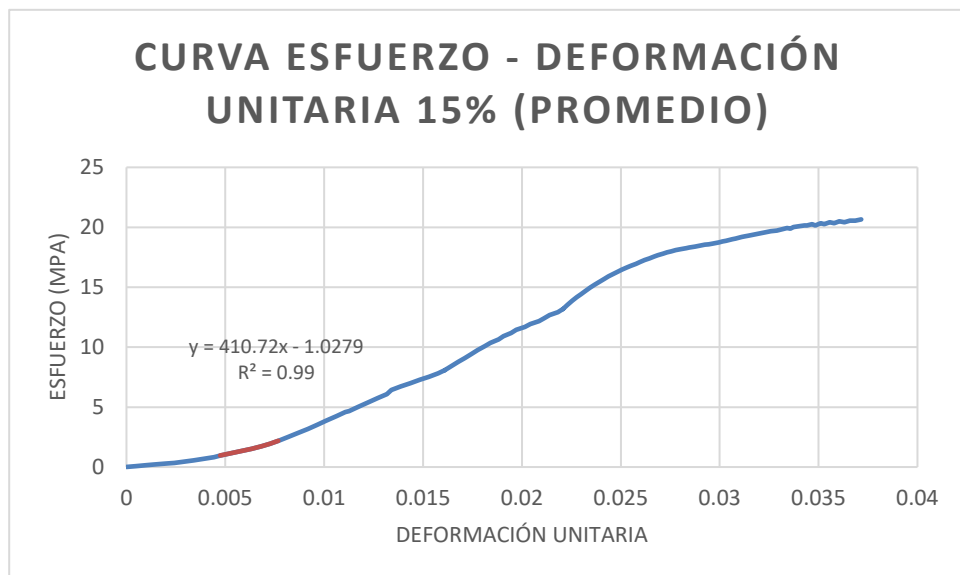


Fuente: (Autores)

La muestra de adoquín con reemplazo de material fino por 15% de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.030 y una deformación máxima de 0.037; con respecto, al módulo elástico se obtuvo un valor de 410.72 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 14*.

Figura 15

Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 15% de caucho)



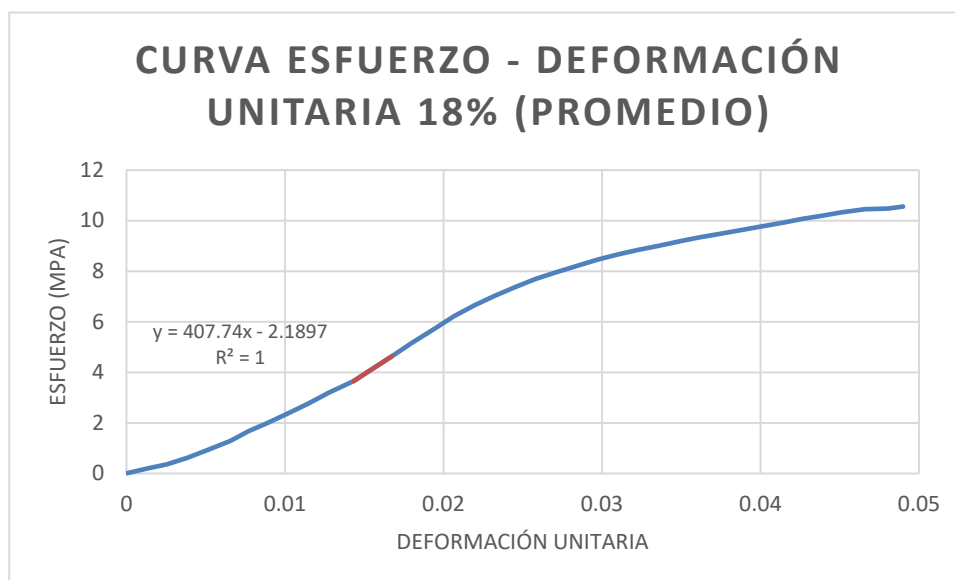
Fuente: (Autores)

La muestra de adoquín con reemplazo de material fino por 18% de caucho, obtuvo una deformación elástica promedio de 0.038 y una deformación máxima de 0.048; con respecto, al

módulo elástico se obtuvo un valor de 407.74 Mpa. Los datos analizados se presentan en la *Figura 15*.

Figura 16

Curva esfuerzo – deformación unitaria (Reemplazo 18% de caucho)



Fuente: (Autores)

Las muestras de adoquines que cumplen el rango permitido de módulo de elasticidad son, el adoquín patrón y el adoquín normal con resultados de 3285 y 3198.3 Mpa respectivamente. Los valores obtenidos se aprecian en la *Tabla 12* y la *Figura 16*.

Los valores del módulo elástico son directamente proporcionales a la rigidez, por ende, los valores con mayor rigidez son el adoquín normal y con el reemplazo al 5% por caucho.

Tabla 12

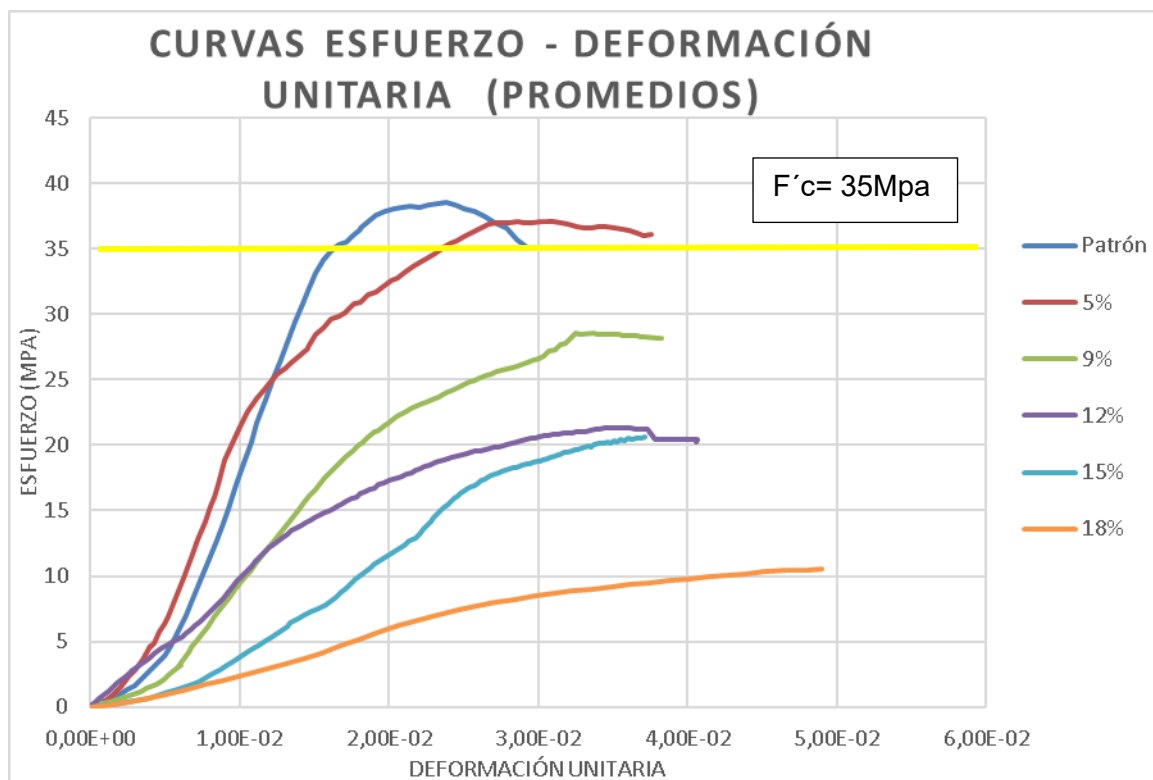
Módulo de elasticidad promedio de los tipos de adoquín

	reemplazo al 0% de caucho	reemplazo al 5% de caucho	reemplazo al 9% de caucho	reemplazo al 12% de caucho	reemplazo al 15% de caucho	reemplazo al 18% de caucho
E (Mpa)	3285	3198.3	1460.7	1263.5	410.7	400

Fuente: (Autores)

Figura 17

Curva Esfuerzo – Deformación unitaria de los tipos de adoquín



4.6 Análisis de costos

El análisis de costos se realizó al adoquín que cumplía todos los parámetros de normativas; es decir, del adoquín con remplazo de arena por caucho triturado al 5% y del adoquín patrón. Para examinar los costos se hizo un análisis de precios unitarios (APUs), con costos indirectos del 20% y se comparó el precio del adoquín tradicional con el adoquín con porcentaje de caucho. En los APUs se obtuvo que el precio del adoquín sin remplazo de caucho es de 0.34\$ y el precio del adoquín con porcentaje de caucho es de 0.33\$; disminuyendo en un centavo de dólar el adoquín óptimo, lo que equivale a un 1% por adoquín. El análisis de precios unitarios se presenta en la *Tabla 13* y *Tabla 14*.

Tabla 13

APUs de Adoquín sin remplazo en porcentaje de caucho (Normal)

CODIGO:	
RUBRO:	Adoquín remplazado la arena con caucho triturado al 0%
UNIDAD:	U
COSTOS DIRECTOS	
Equipo y herramienta	

Descripción	Cantidad	Precio	Costo Hora	Rendimiento	Total
	A	B	C = A x B	R	T= C x R
Herramienta menor					
Máquina para hacer adoquines	1	2.3	2.3	0.012	0.028
Montacargas	1	0.85	0.85	0.015	0.013
Tamizadora	1	0.12	0.12	0.014	0.002
				TOTAL	0.042
Mano de Obra					
Descripción	Cantidad	Jornal / HR	Costo Hora	Rendimiento	Total
	A	B	C = A x B	R	T= C x R
Obrero especializado en prefabricados	1	3.6	3.6	0.012	0.0432
Peón	1	3.5	3.5	0.012	0.042
				TOTAL	0.09
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Costo	
		A	B	T= A x B	
Agua	lt	0.333	0.02	0.007	
Cemento	kg	0.7536	0.13	0.098	
Arena	kg	1.2746	0.018	0.025	
Ripio	kg	1.2103	0.017	0.023	
Caucho	kg	0	0	0	
				TOTAL	0.15
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Costo	
		A	B	T= A x B	
				TOTAL	0
COSTOS INDIRECTOS					
				20%	0.0560
Precio Unitario Total					
.....					0.34

Tabla 14

APUs de Adoquín reemplazado la arena con caucho triturado al 5%

CODIGO:

RUBRO: **Adoquín reemplazado la arena con caucho triturado al 5%**

UNIDAD: **U**

COSTOS DIRECTOS

Equipo y herramienta

Descripción	Cantidad	Precio	Costo Hora	Rendimiento	Total
-------------	----------	--------	------------	-------------	-------

	A	B	C = A x B	R	T= C x R
Herramienta menor					
Máquina para hacer adoquines	1	2.3	2.3	0.012	0.028
Montacargas	1	0.85	0.85	0.015	0.013
Tamizadora	1	0.12	0.12	0.014	0.002
				TOTAL	0.042
Mano de Obra					
Descripción	Cantidad	Jornal / HR	Costo Hora	Rendimiento	Total
	A	B	C = A x B	R	T= C x R
Obrero especializado en prefabricados	1	3.6	3.6	0.012	0.043
Peón	1	3.5	3.5	0.012	0.042
				TOTAL	0.09
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Costo	
		A	B	T= A x B	
Agua	lt	0.333	0.02	0.0067	
Cemento	kg	0.7536	0.13	0.0980	
Arena	kg	1.274	0.018	0.0229	
Ripio	kg	1.2103	0.017	0.0206	
Caucho	kg	0.0637	0.0012	0.0001	
				TOTAL	0.15
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Costo	
		A	B	T= A x B	
				TOTAL	0
COSTOS INDIRECTOS					
				20%	0.055
Precio Unitario Total					0.33

4.7 Interpretación de resultados

Una vez realizados los ensayos, se obtuvo que el adoquín con remplazo de material fino por 5% de caucho, cumplen las especificaciones de resistencia a compresión, resistencia al desgaste por abrasión, módulo de elasticidad y disminuye el costo de producción; es por ello, que a este adoquín se lo considero como óptimo en esta investigación.

Los adoquines con remplazo al 9%, 12%, 15% y 18%, no cumplieron la resistencia de diseño,

resistencia al desgaste por abrasión, módulo de elasticidad; por lo que, no son aptos para ser utilizados en pavimentaciones articuladas, a pesar de ello, se puede dar un uso peatonal, debido a que la resistencia supera la establecida por la norma (NTE INEN 1488, 2010) la cual es de 20 Mpa.

La resistencia del adoquín sin remplazo de caucho, con el adoquín optimo, varia en un 3.8% siendo esta mínima e imperceptible ya que cumple con todos los parámetros mecánicos establecidos.

El material fino que se analizó mediante el ensayo de colorimetría, indica que el material utilizado es de buena calidad, es decir, carece de suciedad en el material.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Los ensayos realizados, permiten ejecutar un buen diseño de adoquín, optimizar materiales, costos y cumplir con la resistencia a compresión requerida.

En los resultados de granulometría, el árido fino cumplió con la curva granulométrica establecida en la norma NTE INEN 696, mientras que, en el agregado grueso, los límites granulométricos no se encontraban dentro de lo establecido en la normativa; por lo cual, se planteó una corrección de franjas granulométricas por el método de Fuller – Thompson, para tener un buen diseño de hormigón.

La prueba de colorimetría indicó que el material fino carece de impurezas, por lo que el árido es de buena calidad y no altera la resistencia a compresión de los adoquines, este ensayo cumplió la normativa NEC INEN 855.

El adoquín sin remplazo de caucho, con el cual se compara los valores, cumplió la resistencia de diseño, por lo que se establece, que la Relación agua / cemento, es óptima para los materiales ocupados.

Las resistencias de compresión de los adoquines con remplazo de arena por porcentajes de caucho de neumáticos reciclados se encontraron por debajo del adoquín comparativo, sin embargo, el adoquín con remplazo de caucho al 5% por material fino, supera la resistencia de diseño, y no varía en grandes porcentajes comparado con el adoquín patrón, pudiendo ser ocupado para pavimentaciones viales.

Los ensayos de resistencia al desgaste de abrasión establecieron que los tres únicos adoquines en los que el valor de desgaste es inferior a 23mm que establece la norma NEC INEN 3040, siendo estos, el adoquín comparativo, adoquín con remplazo por caucho al 5% y adoquín con remplazo de caucho al 9%.

Los módulos de elasticidad obtenidos en cada muestra de adoquín permitieron saber que mientras más caucho se agregue al adoquín, menor módulo de elasticidad va a tener, por lo que, la rigidez es menor y la deformación unitaria aumenta.

Se realizó un análisis de precios unitarios, en el cual se analizó el costo del adoquín patrón y del adoquín con remplazo de caucho al 5%, obteniéndose un costo de 0.34 y 0.33 ctvs de dólar estadounidense respectivamente, dando una diferencia de un centavo entre los adoquines.

En esta investigación, se obtuvo un adoquín óptimo, el cual es el de remplazo de material fino por caucho al 5%, ya que, cumple con todos los parámetros necesarios para la utilización en pavimentos y disminuye el costo de producción, siendo un adoquín amigable con el medio ambiente y ayudando a reducir la contaminación atmosférica.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda, utilizar agregados de buena calidad y libre de impurezas, para tener un buen hormigón, generando muestras de calidad y comprender el comportamiento en las pruebas mecánicas que se realicen.

Se aconseja, seguir reemplazando agregados que componen al hormigón por destinos tamaños de caucho triturado y por más materiales que puedan ser reciclados, para contribuir con el medio ambiente y disminuir el CO2 producido.

Se recomienda a futuros investigadores, obtener el porcentaje de amortiguamiento de materiales prefabricados utilizados en pavimentaciones, especialmente en usos peatonales.

Se recomienda utilizar los adoquines con porcentajes de residuo de neumáticos reciclados que no alcanzaron la resistencia de diseño, en adoquines de uso peatonal, ya que, por los porcentajes de caucho, serán más cómodos para el peatón y más amigables con el medio ambiente.

Referencias Bibliografía

- ACI 211. (2005). *Building Code Requirements for Masonry Structures*. Mansory Standars Joint Commitee.
- Armas Juan, & Baño Nathalia. (2013). *Estudio De Factibilidad Para La Fabricación Y Comercialización De Productos En Caucho Reciclado De Llantas Usadas (Adoquines De Caucho, Vinil De Caucho, Etc.) En La Ciudad De Quito*.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5825/1/UPS-QT04316.pdf>
- Benavides, J. (2019). *Elaboración de adoquines flexibles a partir de fibra de caucho de neumáticos reciclados para revestimiento de pisos*. 1–101.
- Bušić, R., Miličević, I., Kalman, T., & Strukar, K. (2018). *Recycled Rubber as an Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete—Literature Overview*.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6165371/>
- Buzón Ojeda, J. E. (2010). Fabricación de adoquines para uso en vías peatonales, usando cuesco de palma africana. *Inge Cuc*, 6(1), 67–78.
<http://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/293>
- Castro, G. (2007). *Reutilización, reciclado y disposición final de neumaticos*. 60.
- Ceballos-Medina, S., González-Rincón, D. C., & Sánchez, J. D. (2021). Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) Generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la Fabricación de Adoquines. *Revista ION*, 34(1), 27–35.
<https://doi.org/10.18273/revion.v34n1-2021003>
- Chipugsi, R., & Caiza, M. (2018). *Influencia De Las Partículas De Caucho En El Desgaste De Adoquines De Hormigón*. 16. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16053/1/UPS-ST003776.pdf>
- Comercio. (2018). *Las llantas tienen más opciones de reciclaje*.
<https://www.elcomercio.com/tendencias/llantas-reciclaje-materiales-neumaticos-planetaeideas.html>
- Construmatica. (2011). *Criterios de diseño con adoquín cerámico*. 20.
https://www.construmatica.com/construpedia/Proyectos_con_Adoquín_Cerámico
- Coronado, J. (2002). Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. In *Secretaria de Integración Económica Centroamericana*.
<http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/4114/625.7->

38.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Giraldo, B. (2004). *Diseño de mezclas de hormigón. Métodos empíricos y analíticos*.
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/50123/3352874.19946.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hidalgo, D., & Poveda, R. (2013). Obtención de Adoquines Fabricados con Vidrio Reciclado como Agregado. In *Escuela Politécnica Nacional*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6104>
- Instituto del cemento y del hormigón de Chile. (2013). Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón. In *Instituto del cemento y del hormigón de Chile* (Vol. 13, Issue 1).
- Jaumandreu, M. (2014). *Estudio de la relación del conjunto neumático-llanta de un automóvil, con el consumo energético y la seguridad vial*. 14(02), 144–150.
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24328/MEMORIA.pdf>
- Kirubagharan, P., Gowtham, R., Duraisingh, A., Nair, A. B., & Bharathi, S. M. L. (2017). Experimental study on behaviour of paver block using crushed rubber powder. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(3), 582–589.
<http://www.iaeme.com/IJCIET/index.asp>
- Kumar, R. S., Irshad, M., Bavish, P., Sakthivel, R., & M.Sivaraja. (2019). Concoction of Eco-Crumb Shell Paver Blocks. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 7(02), 1–7. <https://www.ijert.org/research/concoction-of-eco-crumb-shell-paver-blocks-IJERTCONV7IS02014.pdf>
- NEC INEN 856. (2011). *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO*. 1–178.
<https://doi.org/10.17226/18725>
- Noriega, U. (2021). *Influencia de la explotación del material pétreo y su efecto sobre el cauce del río Mocache*. <https://repositorio.uteq.edu.ec/bitstream/43000/6298/2/T-UTEQ-047.pdf>
- NTE INEN 1488. (2010). Adoquines Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 4.
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1488.pdf>
- NTE INEN 2380. (2011). Requisitos de Desempeño Para Cementos Hidráulicos: *Inen*, 1(Primera Edición), 5. <http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>
- NTE INEN 3040, I. E. de N. (2016). Adoquines de Hormigón NTE INEN 3040. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 45.
- NTE INEN 696. (2011). Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. *Norma*

Técnica Ecuatoriana, 1(Primera Edición), 12.

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/696.pdf>

NTE INEN 855. (2010). Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón. NTE INEN Áridos. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón. *Intituto Ecuatoriano de Normalizacion*, 15. http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/EXTRACTO_2014/JSI/nte_inen_iso_26000extracto.pdf

Poveda, R., Granja, M., & Ávila, C. (2015). Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de homigon tipo A. *Revista Politécnica*, 35(3), 10. <http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen35/tomo3/Analisisdelainfluenciadelvidriomolido.pdf>

Ramirez, L., Orjuela, A., & Angulo, G. (2020). Propuesta de adoquines hechos a base de caucho reciclado. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 11(1), 44–53. <https://doi.org/10.25213/2216-1872.34>

Soto, M., & Marín, J. (2019). Análisis Del Concreto Con Caucho Como Aditivo Para Aligerar Elementos Estructurales. *Online Internacional & Nasiona*, 7(9), 1–71. www.journal.uta45jakarta.ac.id

Torres Cervera, K. P., & Jaimes Leal, L. Á. (2019). Aprovechamiento del grano de caucho reciclado para la elaboración de adoquines ecológicos como una nueva alternativa a la industria constructiva. *Revista Politécnica*, 15(29), 33–44. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n29a3>

UICN. (2017). *Las partículas de plástico invisibles de los textiles y los neumáticos son una fuente importante de contaminación del océano: estudio de la UICN*. <https://www.iucn.org/news/secretariat/201702/invisible-plastic-particles-textiles-and-tyres-major-source-ocean-pollution---iucn-study>

Varas, J., & Areche, J. (2021). Comportamiento mecánico del adoquín de hormigón adicionando residuos orgánicos del maíz. *Dominio de Las Ciencias*, 7(5), 148–168. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i5.2240> Ciencias

ANEXOS

Anexo 1. Ensayo de Granulometría en agregados gruesos y finos



Anexo 2. Ensayo de colorimetría





Anexo 3. Herramientas a ocupar para la elaboración de adoquines



Anexo 4. Adoquín patrón



Anexo 5.*Adoquín 5% de neumático triturado*



Anexo 6.*Adoquín 9% de neumático triturado*



Anexo 7.*Adoquín 12% de neumático triturado*



Anexo 8.*Adoquín 15% de neumático triturado*



Anexo 9. Adoquín 18% de neumático triturado



Anexo 10. Ensayo a compresión del adoquín patrón



Anexo 11. Ensayo a compresión del adoquín 5% de neumático triturado.



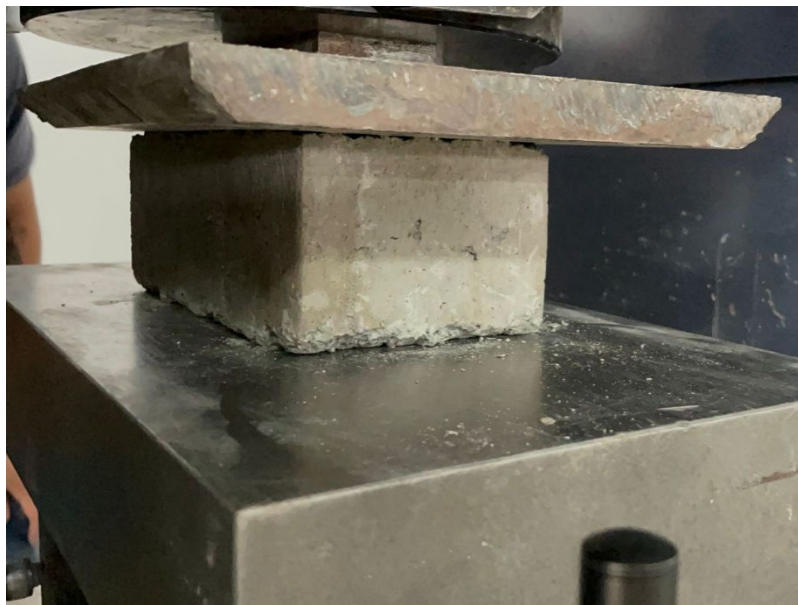
Anexo 12. Ensayo a compresión del adoquín 9% de neumático triturado.



Anexo 13. *Ensayo a compresión del adoquín 12% de neumático triturado.*



Anexo 14. *Ensayo a compresión del adoquín 15% de neumático triturado.*



Anexo 15. *Ensayo a compresión del adoquín 18% de neumático triturado.*



Anexo 16. Muestra de adoquín para ensayos al desgaste de abrasión, con dimensiones 10*10*3 cm



Anexo 17.Máquina para realizar el ensayo al desgaste por abrasión



Anexo 18.Resultados de ensayo de desgaste de abrasión


Cuenca, 10 de febrero del 2023

Estimados
Juan Carlos Cárdenas Peralta
ESTUDIANTE DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Aron Salvador Guncay Bustos
ESTUDIANTE DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

De mi consideración:

Por medio del presente, me permito enviar los resultados realizados en la empresa GRAIMAN, correspondientes al ensayo de desgaste de abrasión de los adoquines, se adjunta los resultados de la prueba en el anexo 1.

Atentamente,



Ing. Carla Pérez
GRAIMAN

Anexo 19. Resultados de ensayo de desgaste de abrasión

Anexo 1

MUESTRA	Huella 1	Huella 2	Huella 3
	Longitud (mm)	Longitud (mm)	Longitud (mm)
0 #	18.18	19.15	18.65
5 #	20.12	21.51	21.15
9 #	22.32	22.1	23.25
12 #	23.62	23.15	23.86
15 #	25.68	25.17	25.92
18 #	27.98	28.12	28.17

Anexo 20. Resistencia a compresión máxima del Diseño de adoquín patrón, Muestra 1,2 y 3

A/C		
0.44		
MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)
m1	39.66000545	
m2	38.38208332	39.9938414
m3	42.56668497	

Anexo 21. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3

% de sustitución		
5		
MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (Mpa)	Resistencia promedio (Mpa)
m1	39.6630595	
m2	42.641735	39.8748823
m3	37.3198525	

Anexo 22. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 9 % material fino por

residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3

% de sustitución			9
MUESTRA	RESISTENCIA A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (Mpa)		Resistencia promedio (Mpa)
	m1	33.2482152	
m2	34.6556221	33.8249608	
m3	33.571045		

Anexo 23. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3

% de sustitución				12
# Muestra	KN/mm2	KN/mm2	Mpa	
M1	0.02758289			
M2	0.02875881	0.02838683	28.3868336	
M3	0.02875881			

Anexo 24. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3

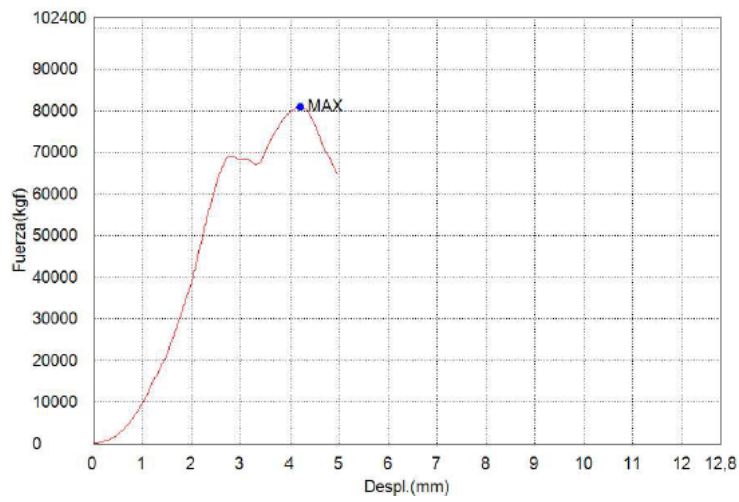
% de sustitución				15
# Muestra	KN/mm2	KN/mm2	Mpa	
M1	0.01800563			
M2	0.01853432	0.018667	18.6669982	
M3	0.01956104			

Anexo 25. Resistencia a compresión máxima del adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados, Muestra 1,2 y 3

% de sustitución				18
# Muestra	KN/mm2	KN/mm2	Mpa	
M1	0.0167389			
M2	0.01177677	0.01382337	13.8233711	
M3	0.01240544			

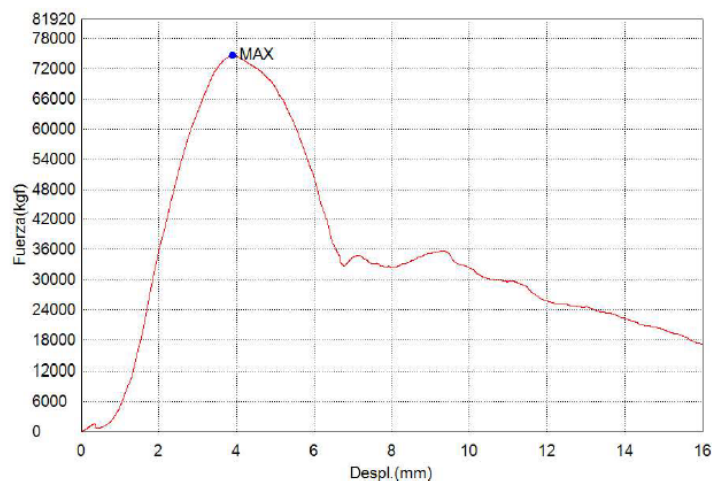
Anexo 26. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín patrón.

Nombre	EACS1_Desplazamiento	Max_Fuerza	CASE1_Fuerza
Parametros	Fuerza 1 kgf	Calc. at Entire Areas	Desplazamiento 1 mm
Unidad	mm	kgf	mm
1_1	--	80900	9567,14
Media	--	80900	9567,14
Desviacion Estandar	--	--	--
Rango	--	0,00000	0,00000
1_1	--	76100	20208,1
Media	--	76100	20208,1
Desviacion Estandar	--	--	--
Rango	--	0,00000	0,00000
1_1	--	26700	5717,91
Media	--	26700	5717,91
Desviacion Estandar	--	--	--
Rango	--	0,00000	0,00000
TotalMedia	--	61233,33	11831,1
TotalDesviacion Estandar	--	30002,9	7505,69
TotalRango	--	54200,0	14490,2



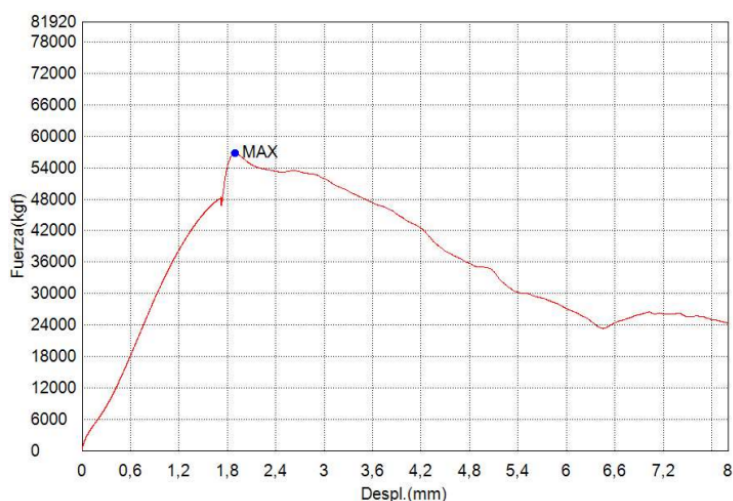
Anexo 27. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.

Nombre	CASE1_Fuerza	Max_Fuerza	Max_Tension	EACS1_Desplazamiento
Parametros	Desplazamiento 1 mm	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 1 kgf
Unidad	kgf	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	5049.54	75900	921	--
Media	5049.54	75900	921	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	--



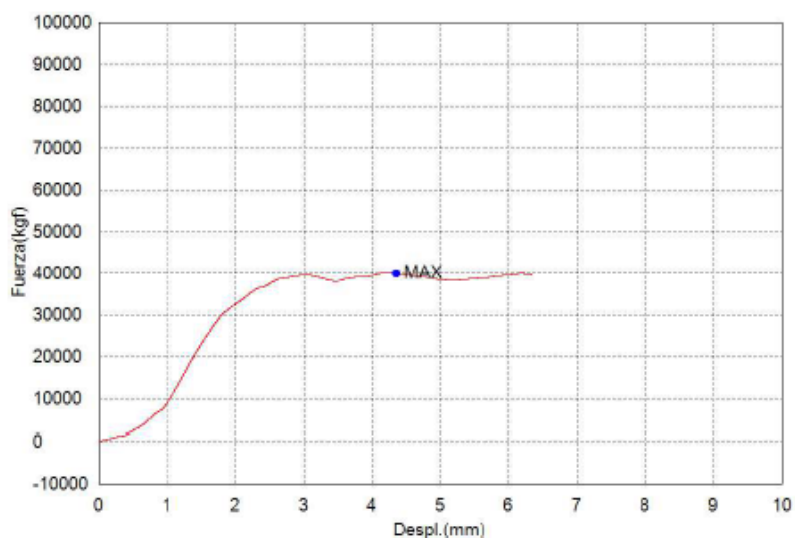
Anexo 28. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.

Nombre	CASE1_Fuerza	Max_Fuerza	Max_Tension	EACS1_Desplazamiento
Parametros	Desplazamiento 1 mm	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 1 kgf
Unidad	kgf	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	32320.0	56800	701	--
Media	32320.0	56800	701	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	--



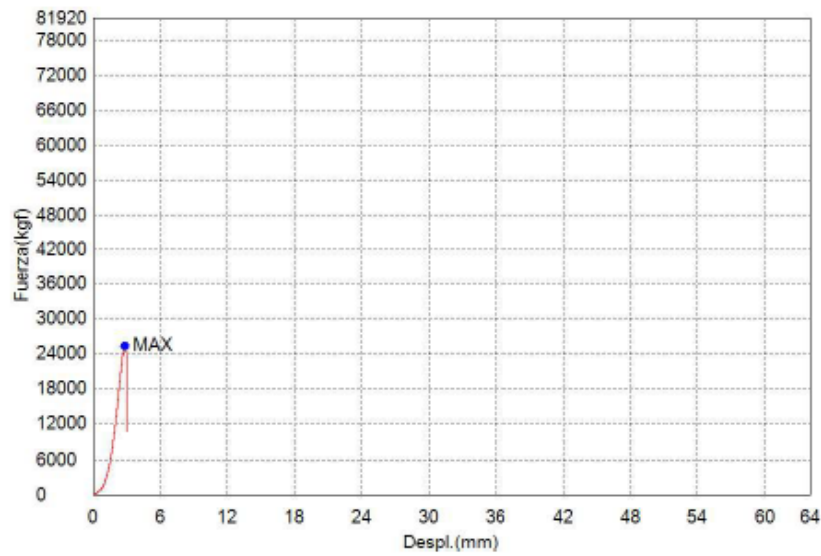
Anexo 29. Curva Fuerza – Desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.

Nombre Parametros	CASE1_Fuerza Desplazamiento 1 mm	Max_Fuerza Calc. at Entire Areas kgf	Max_Tension Calc. at Entire Areas kgf/cm2	EACS1_Desplazamiento Fuerza 1 kgf
Unidad	kgf	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	8855,64	39900	492	--
Media	8855,64	39900	492	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	--
1_1	1276,86	60400	745	--
Media	1276,86	60400	745	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	--
TotalMedia	5066,25	50150	618,5	--
TotalDesviacion Estandar	5359,01	14495,7	178,898	--
TotalRango	7578,78	20500,0	253,000	--

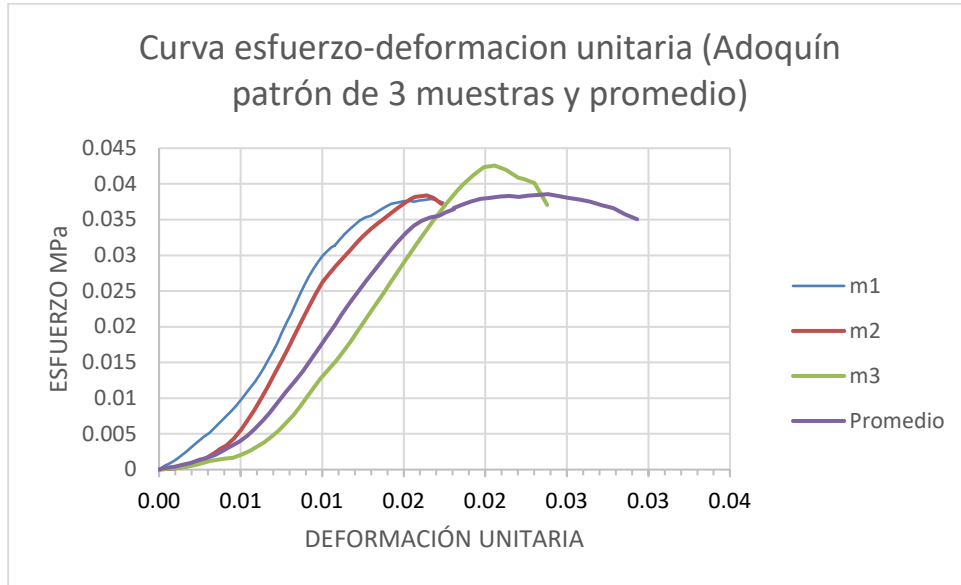


Anexo 30. Curva fuerza – desplazamiento de la máquina de compresión del adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días.

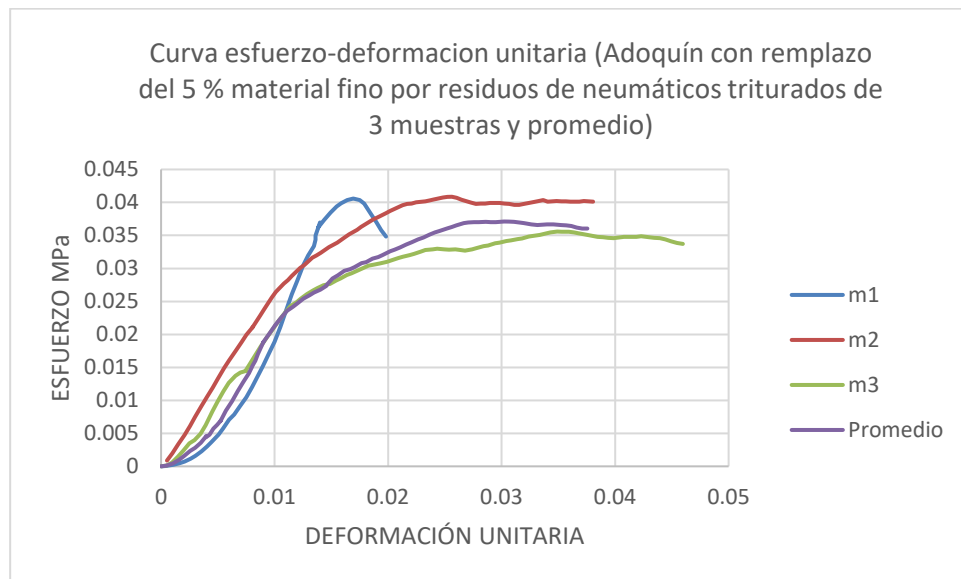
Nombre	CASE1_Fuerza	Max_Fuerza	Max_Tension	EACSI_Desplazamiento
Parametros	Desplazamiento 1 mm	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Fuerza 1 kgf
Unidad	kgf	kgf	kgf/cm2	mm
1_1	1924,38	25300	134	--
Media	1924,38	25300	134	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	--
1_1	2150,21	44300	546	--
Media	2150,21	44300	546	--
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0,00000	0,00000	0,00000	--
TotalMedia	2037,30	34800	340	--
TotalDesviacion Estandar	159,686	13435,0	291,328	--
TotalRango	225,830	19000,0	412,000	--



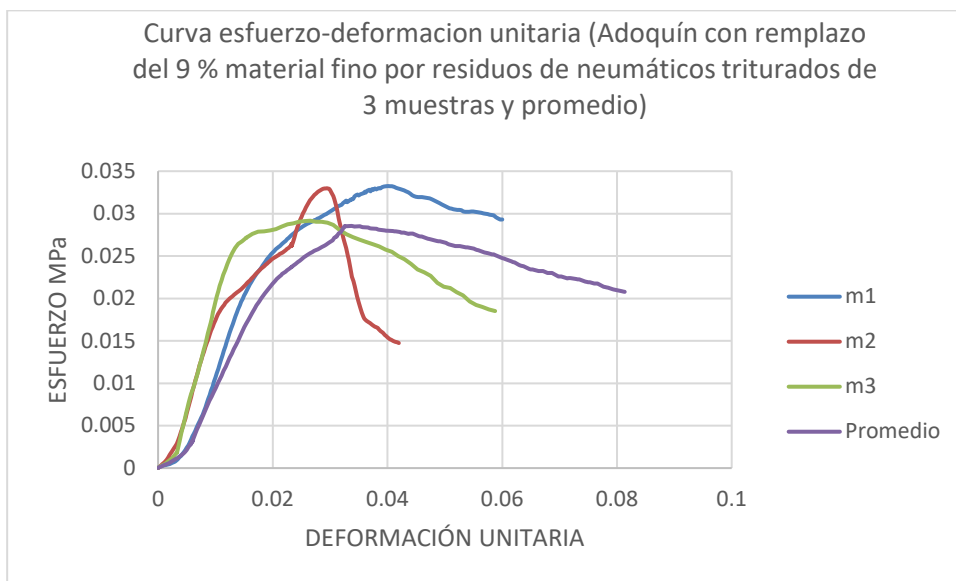
Anexo 31. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín patrón a los 28 días



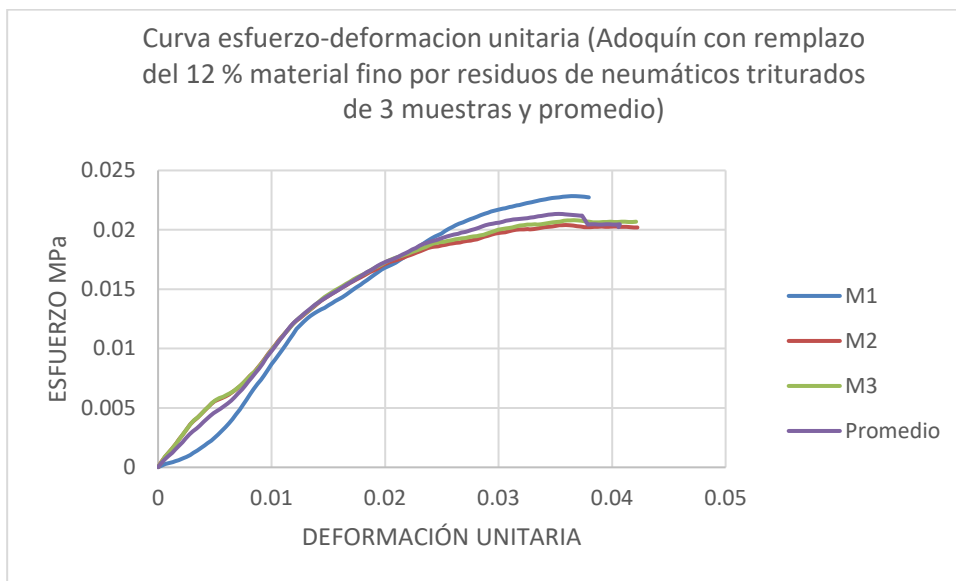
Anexo 32. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 5 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días



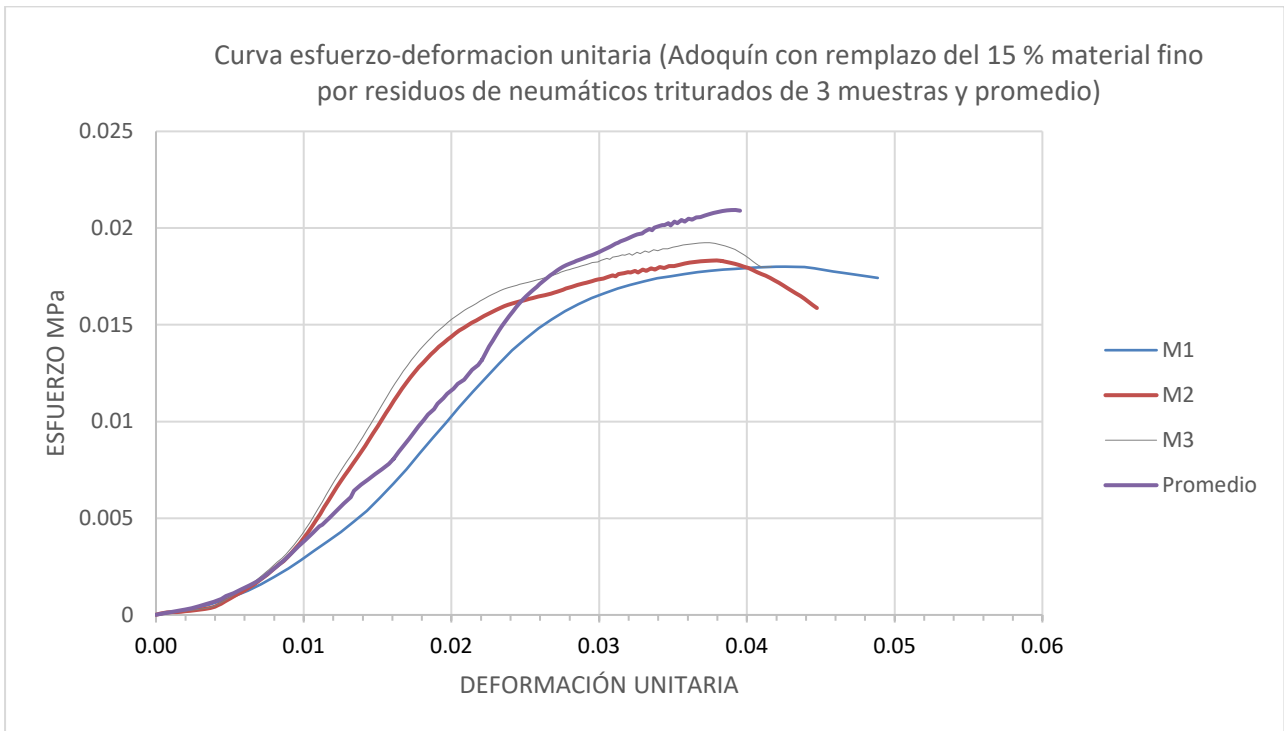
Anexo 33. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 9 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días



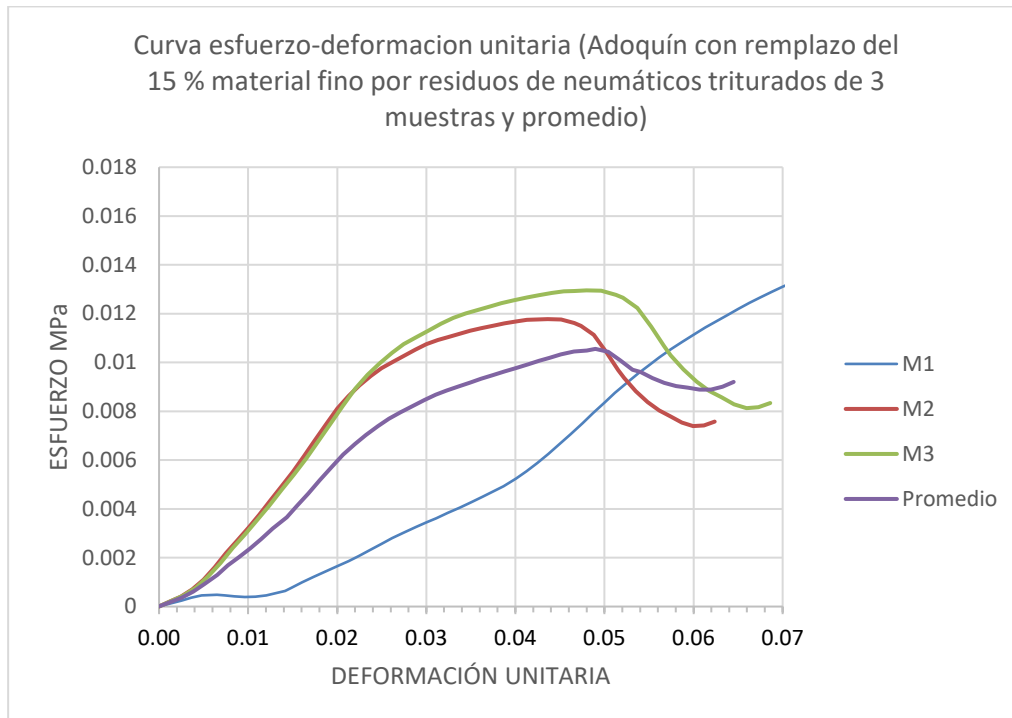
Anexo 34. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 12 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días



Anexo 35. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 15 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días

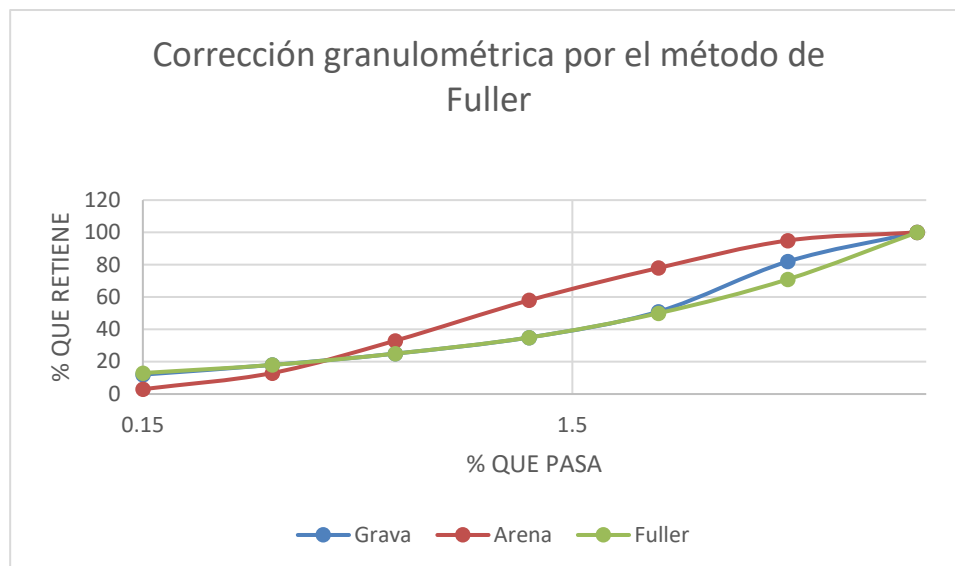


Anexo 36. Gráfica curvas Esfuerzo -Deformación Unitaria, adoquín con remplazo del 18 % material fino por residuos de neumáticos triturados a los 28 días



Anexo 37. Corrección granulométrica por el método de Fuller

TAMIZ N°	MM.	GRAVA	ARENA	FULLER
3"	76.2			
2 1/2"	63.5			
2"	50.8			
1 1/2"	38.1			
1"	25.4			
3/4"	19.1			
1/2"	12.7			
3/8"	9.52	100	100	100
Nº4	4.76	82	95	71
8	2.38	51	78	50
16	1.19	35	58	35
30	0.580	25	33	25
50	0.3	18	13	18
100	0.15	12	3	13
200	0.07	9	1	



Anexo 38. Proceso de fabricación del Adoquín



AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Juan Carlos Cárdenas Peralta y Aron Salvador Guncay Bustos portadores de las cédulas de ciudadanía N° **0106644735 y 0105790075**. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del proyecto de titulación **“Análisis de parámetros mecánicos y diseño de adoquines fabricados a partir de residuos triturados de caucho obtenido de neumáticos reciclados”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de este proyecto de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **24 de marzo de 2023**.



F:

Juan Carlos Cárdenas Peralta

C.I. 0106644735



F:

Aron Salvador Guncay Bustos

C.I. 0105790075