

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE PLÁSTICO
RECICLADO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE UN ADOQUÍN.**

NELSON JAHIR ARENAS PICO

GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ CARDENAS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE PLÁSTICO
RECICLADO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE UN ADOQUÍN.**

**NELSON JAHIR ARENAS PICO
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ CARDENAS**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero civil**

**Director
LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
Ingeniero civil. MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis principalmente a Dios, creador de todas las cosas, forjador de mi camino, el que me ha dado la fuerza para continuar en las adversidades, ya que gracias a él he logrado concluir con éxitos mis estudios de pregrado.

De todo corazón a mis padres Diocelina Pico Lozano, Nelson Arenas Castillo por su apoyo incondicional e inculcar en mi buenos sentimientos, hábitos y valores, lo cual me han ayudado a salir adelante en los momentos más difíciles.

A mis hermanos Elkin, Rudnney, Tania y Andrés, a mi sobrina Sofía, a mi primo Juancho y todos aquellos familiares que estuvieron junto a mi desde el comienzo de este gran viaje, brindándome una voz de ánimo para alcanzar este gran sueño.

A mis compañeros y amigos que en los momentos más difíciles siempre tuvieron una palabra de aliento y esperanza, con los que he compartido tantas cosas que solo volviendo a nacer se me olvidarían.

Finalmente a todas la personas que creyeron en mí y me apoyaron incondicionalmente, también a quienes se toman el tiempo para leer estas líneas.

NELSON JAHIR ARENAS PICO

DEDICATORIA

*A Dios por haberme permitido alcanzar un logro más en mi vida.
A mi madre Marta Cardenas Ríos, mi padre Gustavo Gómez Celis, y mi
hermana Lida Marcela Gómez Cardenas por ser parte de este sueño que
apenas comienza, brindarme todo su amor, comprensión y solidaridad en el
transcurso de mi vida.*

*A mi familia por haber contribuido de una u otra manera para que este logro
fuera posible.*

*A mis amigos que compartieron conmigo durante mi formación académica y
personal.*

GUSTAVO ADOLFO GOMEZ CARDENAS.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos Principalmente a la Universidad Industrial de Santander por hacernos parte de ella y formarnos como profesionales íntegros.

Agradecemos a los profesores COLNUSESA Y UIS que compartieron sus conocimientos, orientándonos y corrigiéndonos durante este recorrido; a nuestro Director de proyecto el Ing. Luis Alberto Capacho Silva por haber sido nuestra guía, a los técnicos de laboratorio Jaime y Jairo por su aporte a este proyecto.

Agradecemos a nuestros compañeros por estar con nosotros en las buenas y malas, dándonos en el peor de los casos una voz de aliento.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. OBJETIVOS.....	22
1.1 OBJETIVO GENERAL	22
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
2. METODOLOGÍA	23
2.1 DISEÑO DE MEZCLA.....	23
2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PET COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR	24
2.3 FACTIBILIDAD DE UTILIZAR MATERIAL PLÁSTICO FINO PARA EL DISEÑO DE UN MORTERO QUE SIRVA DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL DEL ADOQUÍN COMPUESTO.	28
2.4 ENSAYOS.....	29

2.4.1 Ensayo de absorción de agua.....	30
2.4.2 Ensayo Resistencia a la flexotracción.....	30
2.4.3 Ensayo Resistencia al Desgaste.....	30
2.4.4 Ensayo Resistencia a la compresión	31
2.4.5 Ensayo Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8mm de lado	31
3. RESULTADOS	32
3.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN.....	32
3.2 ENSAYO RESISTENCIA FLEXOTRACCIÓN.....	33
3.3 RESISTENCIA AL DESGASTE	36
3.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN	39
3.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS	40

4. ANÁLISIS ECONÓMICO	42
5. CONCLUSIONES	43
6. OBSERVACIONES.....	45
BIBLIOGRAFIA	47
ANEXOS.....	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de la arena	23
Tabla 2. Características del cemento	24
Tabla 3. Características del PET	25
Tabla 4. Resultado De Ensayo de absorción para diferentes porcentajes de PET	32
Tabla 5. Resultado ensayo abrasión adoquines bicapa gris	38
Tabla 6. Presupuesto resumido	42
Tabla 7. Granulometría arena	49
Tabla 8. Gravedades específicas y porcentaje de absorción de la arena	50
Tabla 9. Masa unitaria y porcentaje de vacíos de la arena	51
Tabla 10. Granulometría PET	52
Tabla 11. Gravedades específicas y porcentaje de absorción del PET	53
Tabla 12. Masa unitaria y porcentaje de vacíos del PET	54
Tabla 13. Resultado ensayo de absorción	61
Tabla 14. Resultado ensayo Flexotracción	64
Tabla 15. Resultado ensayo abrasión de adoquines Monocapa	65
Tabla 16. Resultado de ensayo abrasión adoquines bicapa	66
Tabla 17. Resultado ensayo a compresión adoquines	67
Tabla 18. Resultado ensayo a compresión cubos	68
Tabla 19. Presupuesto detallado	69

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. PET de la empresa Replasander Ltda.....	26
Imagen 2. Compresión del adoquín por medio maquina MTS 810	27
Imagen 3. Secado de los adoquines	28
Imagen 4. Adoquín bicapa gris.....	28
Imagen 5. Ensayo de flexotracción	34
Imagen 6. Ensayo de abrasión realizado en máquina artesanal.....	36
Imagen 7. Huella en los adoquines generados por el ensayo de desgaste	38
Imagen 8. Ensayo de compresión adoquín con 5% de sustitución de PET en su composición granular.....	39

LISTA DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica # 1. Resultado ensayo de absorción	33
Grafica # 2. Resultado ensayo flexotracción	35
Gráfica # 3. Resultado ensayo abrasión adoquines monocapa	37
Gráfica # 4. Resultado ensayo a compresión	40
Grafica # 5. Resultado ensayo a compresión cubos de 50X50 mm	41
Gráfica # 6. Granulometría arena.....	50
Gráfica # 7. Granulometría PET.....	53
Gráfica # 8. Determinación del contenido de cemento mortero seco.....	55
Gráfica # 9. Determinación del contenido de cemento.....	56

LISTA ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ENSAYOS PRELIMINARES ARENA.....	49
ANEXO B. ENSAYOS PRELIMINARES PET	52
ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA ADOQUIN.....	55
ANEXO D. DISEÑO DE MEZCLA CAPA SUPERFICIAL DEL ADOQUIN	58
ANEXO E. RESULTADO ENSAYO DE ABSORCIÓN.....	61
ANEXO F. RESULTADO DE ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.....	64
ANEXO G. RESULTADO DE ENSAYO ABRASIÓN	65
ANEXO H. RESULTADO DE ENSAYO COMPRESIÓN.....	67
ANEXO I. ANÁLISIS DE PRECIOS PARA LA FABRICACIÓN DE 5000 ADOQUINES	69

GLOSARIO

ABRASIÓN: Acción de quitar o arrancar algo mediante fricción.

ADOQUÍN: piedra pequeña para pavimentos, paisajismo y arquitectura, independientemente de su tamaño, forma o textura.

FLEXOTRACCIÓN: consiste en someter a una deformación plástica una probeta recta de sección plena, circular o poligonal, mediante el pliegue de ésta, sin inversión de su sentido de flexión, sobre un radio especificado al que se le aplica una presión constante.

MATERIAL COMPUESTO: Resultado de la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener una combinación única de propiedades

PET: Tereftalato de polietileno, tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles.

RECICLAR: Someter materiales usados o desperdicios a un proceso de transformación o aprovechamiento para que puedan ser nuevamente utilizados.

REDUCIR: Hacer menor la cantidad, el tamaño, la intensidad o la importancia de una cosa.

REUTILIZAR: Volver a utilizar algo, generalmente con una función distinta a la que tenía originariamente.

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO MEDIANTE PLÁSTICO RECICLADO (PET) PARA LA ELABORACIÓN DE UN ADOQUÍN. *

AUTORES: NELSON JAHIR ARENAS PICO
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ CARDENAS**

PALABRAS CLAVES: PET, adoquín, material compuesto.

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto de investigación presenta una alternativa amigable con el medio ambiente, puesto que la materia prima es el plástico reciclado PET (tereftalato de polietileno) con el cual se elabora un material compuesto que logra una combinación única de propiedades; de esta forma contribuir con una solución a la problemática que afronta el mundo, deshacerse del volumen de residuos que se generan, ya que la mayoría de estos terminan en rellenos sanitarios no siendo la mejor solución ambiental. Expone la metodología y resultados obtenidos en laboratorio para la elaboración de un adoquín, reemplazando su estructura granular en diferentes proporciones volumétricas por un material compuesto (arena-cemento y PET reciclado), presenta la caracterización de los materiales a utilizar para el diseño del mortero con el cual se proporciona la estructura central del adoquín compuesto que cumple con las normas técnicas colombianas previstas para la fabricación del mismo: ensayo de absorción de agua, resistencia a la flexotracción, abrasión y compresión, también se hace un análisis de costos y se estudia la factibilidad de crear una capa de PET-cemento que sirva como recubrimiento superficial para el adoquín, por último se muestran los resultados con los cuales se realiza un análisis comparativo entre adoquines con y sin adición de PET concluyendo que la el porcentaje óptimo para reemplazar la granulometría de un adoquín es el 20%, debido a que el espécimen fabricado con esta proporción cumple con todos los valores requeridos por las norma técnicas colombianas para la fabricación del mismo y su costo es igual que uno producido por la industria.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Ing. Msc Luis Alberto Capacho Silva

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF A COMPOSITE MATERIAL USING RECYCLED PLASTIC (PET) FOR THE MANUFACTURE OF A PAVING STONE.*

AUTHORS: NELSON JAHIR ARENAS PICO
GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ CARDENAS**

KEYWORDS: PET, paver, composite material

DESCRIPTION:

This research project presents an environmental friendly alternative, since the raw material is recycled plastic PET (polyethylene terephthalate) which is made with a composite material that achieves a unique combination of properties; in this way it contributes to a solution to the problems the world is facing, get rid of the volume of waste generated, since most of these end up in landfills not being the best environmental solution. It shows the methodology and results obtained in laboratory to prepare a paver, replacing its granular structure in different volumetric proportions of a composite material (sand- cement and recycled PET), it presents the characterization of the materials to be used for the design of the mortar which provides the central structure of the composite paver satisfying the Colombian technical standards provided for manufacturing of it: water absorption test, flexural strength, abrasion and compression, Cost analysis is also made and it studies the feasibility of creating a layer of PET- cement to serve as surface coating for the paver, it finally shows the results with which a comparative analysis is performed between paving stones with and without addition of PET concluding that the optimal percentage to replace the particle size of a paving stone is 20%, since the specimen made with this proportion meets all the required values by Colombian technical standards for the manufacture of the same and its cost is equal to one produced by industry.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Ing. Msc Luis Alberto Capacho Silva

INTRODUCCIÓN

Las obras de ingeniería se han encargado de satisfacer las necesidades de las personas mediante grandes inversiones dejando atrás en muchos casos el impacto ambiental generado; “en Colombia se procesan alrededor de 910.000 toneladas anuales de las principales resinas plásticas y su consumo anual es cercano a 20 kg por habitante, de éstas sólo el 28% son recicladas ya que vivimos atrapados en un ciclo de comprar y desechar” [1]; olvidando que los recursos de la tierra son limitados y que los desechos que generamos contaminan nuestro ecosistema, produciendo malos olores y gases de efecto invernadero que son las principales causas del calentamiento global. Debido a esto, el mundo entero se enfrenta a un problema cada día más complejo, deshacerse del volumen de residuos que se generan, la mayoría de estos terminan en rellenos sanitarios no siendo la mejor solución ambiental.

Una alternativa amigable con el medio ambiente es la reutilización de los mismos en proyectos que suplan las necesidades generadas a diario en el planeta y de esta forma ahorrar energía, disminuir el volumen de los residuos sólidos, alargar la vida útil de los rellenos sanitarios, ahorrar materias primas para la fabricación de nuevos productos y abrir oportunidades de negocios que pueden generar ingresos a comunidades de escasos recursos.

Actualmente existe una tendencia mundial por desarrollar esta iniciativa, buscando recuperar algunos elementos como el cartón, vidrio, papel, “plástico “entre otros; para utilizar como materia prima en la elaboración de diversos productos.

“En el año 1988 con el fin de propiciar y dar más eficiencia al reciclaje, la sociedad de la industria de plásticos (SPI) designó el código de identificación,

convirtiéndose en el sistema utilizado internacionalmente en el sector industrial para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos. Existen distintos tipos de plástico que se clasifican por categorías numeradas del 1 al 7, ubicado en el interior del clásico signo de reciclado (triángulo de flechas en seguimiento). Los de código 1, por ejemplo, PET (tereftalato de polietileno), se utiliza principalmente en la producción de botellas para bebidas. A través de su reciclado se obtiene principalmente fibras para relleno de bolsas de dormir, alfombras, cuerdas y almohadas” [2].

Un material compuesto es el resultado de la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener una combinación única de propiedades. En los últimos años han desarrollado proyectos para crear materiales compuestos aplicables en construcción utilizando el plástico (PET) como materia prima, debido a que poseen buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes, buenas propiedades térmicas y químicas, alta resistencia al desgaste, alto coeficiente de deslizamiento, gran indeformabilidad al calor, alta rigidez y dureza, alta resistencia a los agentes químicos y estabilidad a la intemperie, alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen adecuado para la fabricación de fibras, entre otras propiedades que hacen del plástico PET un material totalmente reciclable con el fin de contribuir con la regla de las 3R (reciclar, reducir y reutilizar) .

Los pavimentos buscan suplir la necesidad sentida por el hombre de tener vías durables, cómodas, limpias y seguras, que le permitan un desplazamiento rápido en cualquier época del año; para ello en este proyecto de investigación se fabrica un adoquín que suple estas necesidades. “Comúnmente los adoquines se definen como piedras pequeñas y redondeadas para pavimentos ya sea se produzcan naturalmente o se fabriquen. Son realmente cualquier tipo de piedra utilizada para

pavimentación, paisajismo o arquitectura, independientemente de su tamaño, forma o textura” [3].

“El éxito de los pavimentos de adoquines en concreto se basa en su amplio rango de aplicación, pues pueden utilizarse en andenes, zonas peatonales, plazas, en vías internas de urbanizaciones, calles y avenidas, con un tráfico vehicular que va de unos pocos automotores ligeros, hasta donde circula un gran número de camiones pesados; en zonas de carga, patios de puertos y plataformas de aeropuertos. Por otra parte, la utilización de los adoquines prefabricados ayuda a mejorar el ambiente de las pequeñas comunidades, puesto que durante su colocación se crea una gran cantidad de oportunidades de empleo temporal, y debido a los costos de transporte muchas veces conviene establecer una fábrica en la zona en desarrollo. Por supuesto, la maquinaria debe ser de primera calidad, capaz de producir adoquines de concreto que cumplan con las normas y altas especificaciones del producto” [4].

El presente proyecto de investigación busca aportar a la anterior problemática utilizando el plástico reciclado PET, como reemplazo del componente granular en la elaboración de un adoquín que posea iguales o mejores propiedades que uno convencional, tales como resistencia, costo de producción y lo más importante que cumpla con las normas técnicas colombianas previstas para la elaboración del mismo: ensayo de absorción de agua (NTC2017), resistencia a la flexotracción (módulo de rotura (NTC 2017)), abrasión (NTC 5147) y compresión (INVÍAS 416), todo esto para lograr la construcción de un material compuesto de uso público o privado.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Emplear el material reciclado plástico PET para la elaboración de un adoquín compuesto que sea de uso vehicular y peatonal.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las propiedades físico-mecánicas del material plástico PET, para establecer la viabilidad de este, en la composición de un adoquín.
- Elaborar un diseño de mezcla para la fabricación de un adoquín, utilizando el material plástico PET como compuesto granular que cumpla con las normas técnicas colombianas.
- Realizar por medio de ensayos de laboratorio, un análisis comparativo entre un adoquín fabricado con adición de material plástico y otro fabricado en el mercado.
- Evaluar la factibilidad de utilizar el material plástico fino, para el diseño de un mortero que sirva de recubrimiento superficial del adoquín compuesto.

2. METODOLOGÍA

Para poder implementar un material compuesto mediante plástico PET en la elaboración de un adoquín se hace necesario cumplir 4 etapas.

2.1 DISEÑO DE LA MEZCLA

Para realizar la mezcla, que en este caso corresponde a un mortero se tiene que conocer las propiedades físico-mecánicas de los materiales a emplear, para ello se realizó diversos ensayos al material fino (ver anexo A), algunos resultados de los ensayos se detallan a continuación:

Tabla 1. Características de la arena

Gravedad específica real	2653Kg/m ³
Gravedad específica aparente	2542 Kg/m ³
Gravedad específica aparente S.S.S	2584 Kg/m ³
% Absorción	0.84
% vacíos	34.4
Peso Unitario del agregado S.S.S Compactado	1668 Kg/m ³
Peso Unitario del agregado S.S.S suelto	1546 Kg/m ³
Módulo de finura	2.56

Las propiedades del cemento utilizado y suministrado por el fabricante se definen a continuación:

Tabla 2. Características del cemento

Tipo	Portland Tipo 1
Marca	Argos
Densidad	2970 Kg/m ³

En base a la investigación hecha por el ingeniero Rodrigo Salamanca en el laboratorio de ensayos e investigaciones de la Universidad Nacional de Bogotá [5], se halló el siguiente diseño de mortero a utilizar en un adoquín, para una resistencia a compresión a los 28 días de 4000 psi, y una fluidez esperada entre 102% a 113%; el diseño de la mezcla se encuentra detallado en el anexo C, a continuación se presente la relación en volumen de los materiales utilizados en el mortero.

1 Cemento
2.59 Arena
1.38 Agua

2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PET COMO REEMPLAZO DEL MATERIAL GRANULAR

Teniendo el diseño de mezcla se procede a hallar algunas propiedades mecánicas del PET (ver anexo B), el cual se utiliza posteriormente como reemplazo del agregado fino en diversas proporciones de volumen para el adoquín (5%,10%,15%,20%,30%). Algunas propiedades del PET son las siguientes:

Tabla 3. Características del PET

Gravedad específica real	1338 Kg/m ³
Gravedad específica aparente	1265 Kg/m ³
Gravedad específica aparente S.S.S	1319 Kg/m ³
% Absorción	0.61
% vacíos	56.8
Peso Unitario del agregado S.S.S Compactado	506 Kg/m ³
Peso Unitario del agregado S.S.S suelto	442 Kg/m ³
Módulo de finura	4.64

La recolección del material PET inicialmente se había planeado hacer con botellas recolectadas en la Universidad industrial de Santander con el fin de ayudar a mitigar la contaminación que estas producen, pero debido a que la trituración del material se hacía compleja al utilizar el molino de cuchillas que hay en el laboratorio de la Escuela de ingeniería metalúrgica, porque su capacidad de trituración era mínima, se optó por comprar el material triturado en la planta de reciclaje Replasander Ltda ubicada en el municipio de Girón, a un precio de 1300 pesos el kilogramo de material granular, ver imagen 1. La compra del material se hizo corroborando que el proceso de recolección, lavado y trituración fuera el adecuado.

Imagen 1. PET de la empresa Replasander Ltda



Para la fabricación del adoquín se utiliza un molde metálico desarmable, y una tapa en madera a la cual se le aplica aproximadamente una tonelada de carga por medio de la maquina MTS 810 .Ver imagen 2.

Inicialmente se hace un adoquín con 0% de PET, con el fin de comparar este con los especímenes modificados en su composición granular, y de verificar la resistencia del mortero de diseño. A continuación se describe detalladamente como se fabrica un adoquín:

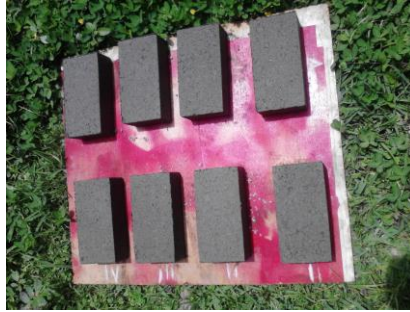
1. Se calculan las cantidades de los materiales a emplear, este volumen corresponde a un adoquín de 6.5 cm de espesor por 10 cm de ancho y 20 cm de largo.
2. Se revuelven los materiales manualmente creando una mezcla homogénea.
3. Se arma el molde y se le aplica Desmoldante
4. Se vierte manualmente la mezcla en el molde, y se coloca en la parte superior de este una tapa de madera
5. Se aplica una carga sobre la tapa de madera aproximadamente de una tonelada, con el fin de compactar el adoquín hasta llevarlo a un espesor de 6 cm. Ver imagen 2

Imagen 2. *Compresión del adoquín por medio maquina MTS 810*



6. Posteriormente se coloca el espécimen en una tabla, se abre el molde y se deja secar. Ver imagen 3

Imagen 3. *Secado de los adoquines*



7. Finalmente se procede al fraguado del adoquín

2.3 FACTIBILIDAD DE UTILIZAR MATERIAL PLÁSTICO FINO PARA EL DISEÑO DE UN MORTERO QUE SIRVA DE RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL DEL ADOQUÍN COMPUESTO.

El adoquín bicapa gris según la norma NTC 2017, está compuesto de dos capas, de las cuales la capa superior debe tener como mínimo 8 mm de espesor y debe estar diseñada en una proporción diferente a la capa inferior. Ver imagen 4.

Imagen 4. *Adoquín bicapa gris*



Fuente : PREFABRICADOS PONCE. Adoquín Roma. [online] [Madrid: España] Prefabricados Ponce S.L. 2012. [citado 3 de septiembre de 2015] Disponible en: Internet: <http://www.prefabricadosponce.es/adoquin-roma.php>

Para el diseño de la capa superficial del adoquín se hace similar al estipulado en el capítulo 2.1, pero para una resistencia de 4850 psi, ver anexo D, para esta capa el material granular (arena) es sustituido en un 100 % por PET triturado de tamaño de 1.2 mm que corresponde al material retenido en el tamiz #16. A continuación se relacionan las proporciones en volumen de la mezcla empleada en la capa superficial:

1	Cemento
2.35	PET
1.26	Agua

La capa superficial del adoquín se hace con agregado más fino, buscando dar mejor apariencia y acabado al bloque, esta capa es de 1 cm de espesor, mientras que la capa inferior es de 5 cm y tiene una resistencia a la compresión de 4000 psi. Para ver que tan viable es implementar esta capa posteriormente se realizará el ensayo de desgaste a este espécimen y se comparará con un adoquín monocapa de 100% de PET.

2.4 ENSAYOS

Los ensayos realizados en esta investigación están estipulados en la norma NTC-2017 (ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIEMNTOS) [7], entre ellos están el ensayo de absorción de agua, resistencia a la flexotracción; además de los correspondientes a la norma NTC 5147(método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho) [8] e I.N.V.E-426 (resistencia a la compresión de adoquines de concreto) [9]. Para corroborar que el diseño de mezcla hallado en base al método suministrado por el ingeniero Salamanca [5] sea el correcto, se hace un

ensayo al mortero siguiendo la norma NTC 220 (Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8mm de lado) [10]

2.4.1 Ensayo de absorción de agua : Este se fundamenta en secar los adoquines al horno a una temperatura entre 100 °C y 115 °C durante 24 horas y luego se dejan reposar y se obtiene la masa seca; posteriormente los especímenes se llevan hasta la saturación durante 24 horas, se sacan del agua dejándolos escurrir por un minuto, secándolos superficialmente con un paño seco y finalmente se halla la masa húmeda y se procede a calcular el porcentaje de absorción con la ecuación prevista en la norma [7] , este valor no puede superar el 7 % .

2.4.2 Ensayo Resistencia a la flexotracción: consiste en llevar el adoquín a la rotura por flexión, como una viga simplemente apoyada. Primero se hallan las dimensiones del adoquín, luego los especímenes se llevan hasta la saturación durante 24 horas, se sacan del agua dejándolos escurrir por un minuto, secándolos superficialmente con un paño seco, y finalmente se le aplica la carga hasta que ocurra la falla. El módulo de rotura mínimo aceptado para cada espécimen es de 3.8 Mpa [7].

2.4.3 Ensayo Resistencia al Desgaste: Para la realización de este ensayo se toma como referencia la norma NTC-5147, el ensayo consiste en tomar adoquines enteros de un mismo lote y someterlos a un desgaste por medio de un disco de 20 cm de diámetro y 7 cm de espesor el cual debe girar a 75 rpm y utilizar como material abrasivo arena de cuarzo la cual debe cumplir la granulometría de esta norma [8].

2.4.4 Ensayo Resistencia a la compresión: Este ensayo consiste en determinar la resistencia a la compresión de los adoquines. Primero se miden las dimensiones de los especímenes, después se hace el proceso de refrentado, y finalmente se aplica la carga por medio de una platina en la parte superior del espécimen hasta llevarlo a la falla [9].

2.4.5 Ensayo Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8mm de lado. Este ensayo busca calcular la resistencia a la compresión del mortero empleado en los adoquines con un 0% de sustitución de PET en sus composición granular, los especímenes fabricados son cubos de 50 mm de lado, para este caso se fabricaron 9 cubos los cuales se prueban a los 7, 14 y 28 días respectivamente. Primero se calcula la cantidad de mortero necesario para llenar los 9 cubos, posteriormente se procede a mezclar los materiales por medio de una mezcladora eléctrica, enseguida se aplica desmoldante a los moldes y se procede al llenado de los mismos mediante capas de 25mm apisonadas por medio de 32 golpes, en 4 etapas de 8 golpes adyacentes, siguiendo una dirección perpendicular a la etapa anterior [10]. Al momento de aplicar la carga es indispensable que el cubo haya permanecido en condición saturada y este se seque por medio de un paño húmedo antes de llevarlo hasta la falla.

3. RESULTADOS

En total se fabricaron 72 adoquines monocapa; 12 para cada porcentaje de sustitución de PET (0%,5%,10%,15%,20%,30%). Por otro lado se hicieron 8 adoquines bicapa gris.

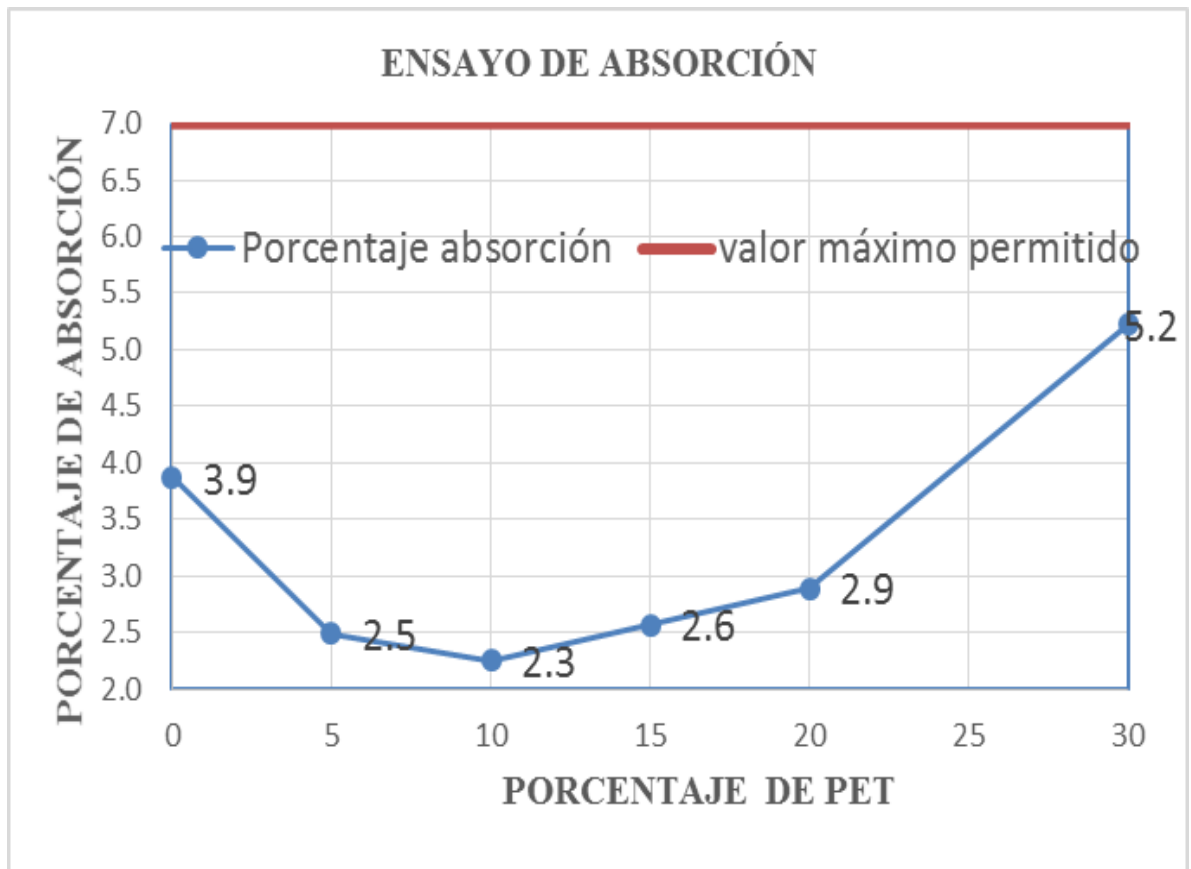
3.1 ENSAYO DE ABSORCIÓN

Este ensayo se aplicó a todos los adoquines, a continuación se detalla el promedio de cada porcentaje de PET, los resultados individuales se encuentran en el anexo E.

Tabla 4. *Resultado De Ensayo de absorción para diferentes porcentajes de PET*

Porcentaje PET	% Absorción Promedio
0	3.9
5	2.5
10	2.3
15	2.6
20	2.9
30	5.2

Grafica # 1. Resultado ensayo de absorción



3.2 ENSAYO RESISTENCIA FLEXOTRACCIÓN

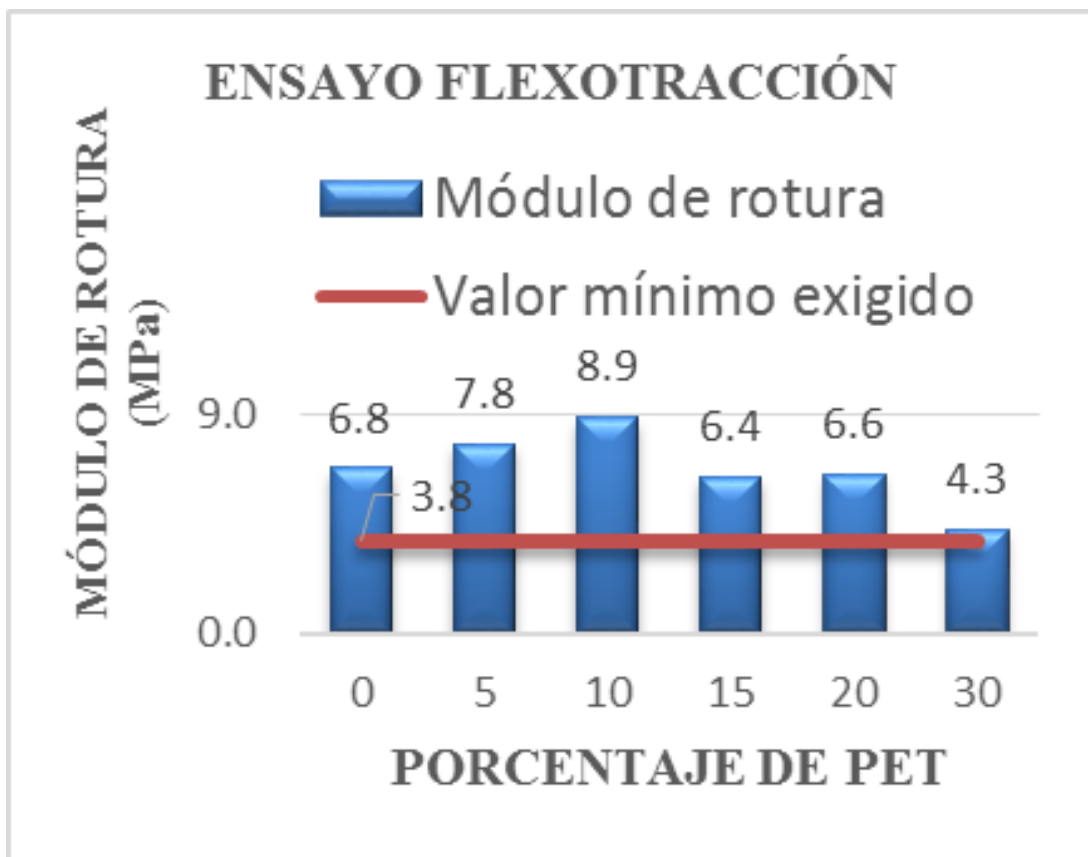
Este ensayo se realizó en la máquina MTS 810, la cual se configuró según los parámetros estipulados por la norma [7].

Imagen 5. *Ensayo de flexotracción*



Se fallaron 3 muestras de cada porcentaje de PET, a continuación se muestra el promedio de las 3 muestras de cada porcentaje analizado; los resultados individuales están detallados en el anexo f.

Grafica # 2. Resultado ensayo flexotracción



La grafica # 2 muestra el módulo de rotura para cada porcentaje de PET, en esta se evidencia que todos los porcentajes son aptos en cuanto a la resistencia por flexotracción debido a que todos los valores mostrados sobrepasan el valor mínimo requerido por la norma [7] que es de 3.8 Mpa.

3.3 RESISTENCIA AL DESGASTE

Este ensayo se realizó con un maquina fabricada artesanalmente, la cual se asemeja a la requerida por la norma [8], pero no cumple con todos los requisitos; uno de ellos es que el disco solo tiene un centímetro de espesor, además el giro del disco se hizo de forma manual tratando de garantizar 70 rpm, pero al momento de girar el disco este tenía un pequeño pandeo, lo cual hacía que la longitud de la huella fuera un poco mayor que si se hubiera hecho mecánicamente. Por otro lado no se utilizó carro porta espécimen como lo indica la norma [8], se garantizó la perpendicularidad del adoquín con el disco, por medio de un contrapeso. Ver imagen 6.

Imagen 6. *Ensayo de abrasión realizado en máquina artesanal.*



La arena con la cual se hizo el ensayo es la detallada en el anexo A la cual se asemeja a la requerida por la norma [8]. El ensayo de desgaste realizado de forma artesanal, se hace con el fin de comparar como varía el desgaste del adoquín en relación al porcentaje de PET reemplazado en su composición granular; además este permite analizar que tan viable es aplicar la capa superficial de PET al adoquín.

Para este ensayo se probaron 3 especímenes por cada porcentaje de PET para los adoquines monocapa; para los adoquines bicapa gris se fabricaron 8 especímenes. Los resultados de cada adoquín se detallan en el anexo G. A continuación se presenta el promedio para cada porcentaje de PET analizado.

La gráfica # 3 muestra que los adoquines con sustitución de PET en su composición granular, no varían considerablemente con respecto al adoquín original que no tiene PET.

Gráfica # 3. Resultado ensayo abrasión adoquines monocapa

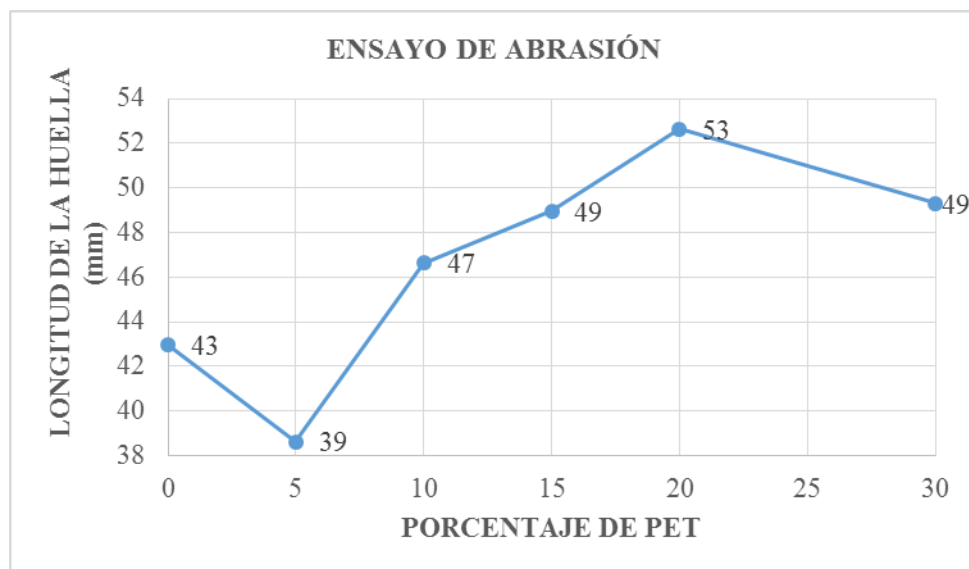
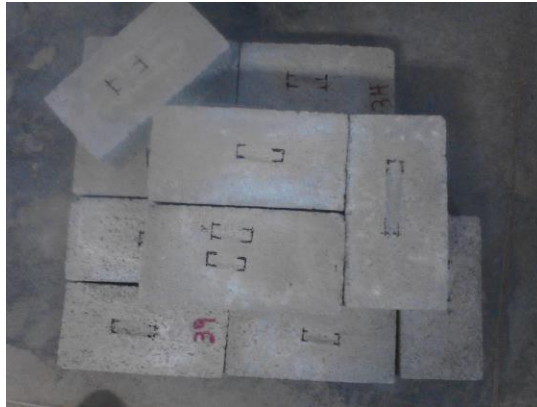


Imagen 7. *Huella en los adoquines generada por el ensayo de desgaste*



A continuación se muestra la longitud de huella para los adoquines bicapa gris

Tabla 5. *Resultado ensayo abrasión adoquines bicapa gris*

Muestra	LH (mm)
A	72.3
B	61.3
C	64.3
D	69.3
E	65.3
F	65.3
G	73.3
H	75.3
Promedio	68.3
Desviación estándar	4.99

Si comparamos el promedio de longitud de huella del adoquín bicapa gris con el adoquín monocapa que no tiene PET, encontramos que varía en un 37% por lo tanto no es viable implementar un adoquín bicapa gris debido a que su resistencia al desgaste se reduce considerablemente con la adición de la capa superficial de material PET.

3.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

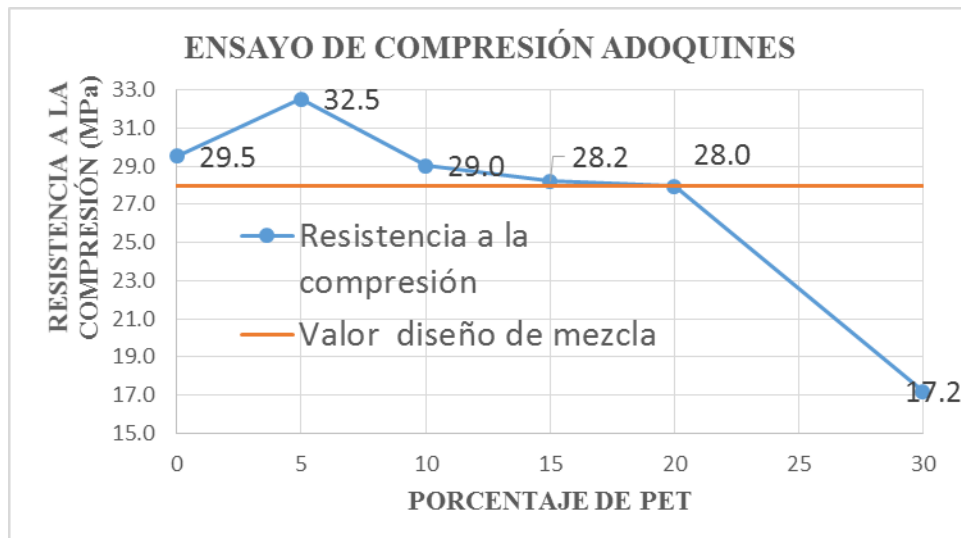
El ensayo de compresión de los adoquines se realizó en la prensa hidráulica que se encuentra en el Laboratorio de Materiales Álvaro Beltrán (ver imagen 8). Se fallaron 3 muestras por cada porcentaje de PET.

Imagen 8. *Ensayo de compresión adoquín con 5% de sustitución de PET en su composición granular*



A continuación se presenta el promedio para cada porcentaje de PET analizado

Gráfica # 4. Resultado ensayo a compresión

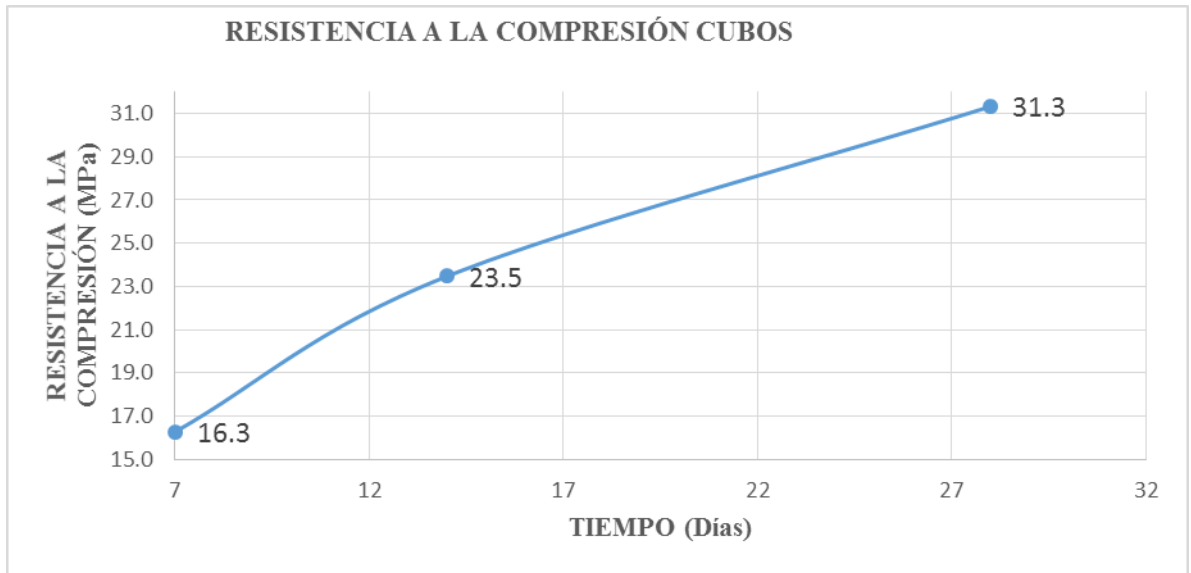


La gráfica # 4 muestra que los adoquines con un 5%, 10%, 15% y 20% cumplen con la resistencia de diseño que fue de 28 MPa. Los valores de resistencia de cada adoquín se evidencian en el anexo H.

3.5 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CUBOS

Para comprobar que el diseño de mezcla del mortero, hecho en base a la investigación del ingeniero Salamanca [5], se fabricaron 9 cubos, según lo estipula la norma [10], los cuales se ensayaron en grupos de 3 a los 7, 14 y 28 días respectivamente obteniendo el siguiente resultado promedio para cada grupo ensayado.

Grafica # 5. Resultado ensayo a compresión cubos de 50X50 mm



4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Según la norma NTC 2017 no se puede hacer ensayos a lotes inferiores a 5000 unidades del mismo formato, por tanto se calcula el análisis de costo para 5000 adoquines de 20 cm de largo X 10 cm de ancho y 6 cm de espesor. Ver anexo I
A continuación se muestra un resumen del análisis económico

Tabla 6. Presupuesto resumido

# ADOQUINES CON 20% DE PET	5000
COSTO MATERIALES	\$ 3,136,420
COSTO MANO DE OBRA	\$ 240,000
COSTO EQUIPO	\$ 13,058
COSTO ENSAYOS	\$ 375,000
VALOR TOTAL ELABORACION	\$ 3,764,478
COSTO DE ADMINISTRACIÓN (10%)	\$ 376,448
UTILIDAD (20%)	\$ 752,896
IVA/UTILIDAD (16%)	\$ 120,463
TOTAL COSTO	\$ 5,014,284
COSTO DE VENTA POR UNIDAD	\$ 1,000

5. CONCLUSIONES

- Se evidencia que todos adoquines fabricados, presentan un buen comportamiento a la absorción de agua, y no sobrepasan el valor máximo estipulado por la norma [7] que es el 7%.
- Los adoquines que fueron reemplazados en un 10% de su composición granular por plástico PET presentan el menor porcentaje de absorción de agua
- En el ensayo de resistencia a la flexotracción se evidencia que el material compuesto empleado en la investigación presenta un buen comportamiento, debido a que todos los especímenes hechos cumplen con el valor mínimo exigido por la norma [7] que es 3.8 Mpa
- En el ensayo de abrasión, se evidencia que los modelos monocapa propuestos no difieren en grandes proporciones en su resistencia al compararlos con un adoquín sin PET.
- El adoquín bicapa gris presenta un 37% de desfavorabilidad en cuanto a resistencia al desgaste si se compara con un adoquín monocapa, por tanto se concluye que no es viable utilizar una capa superficial de mortero con sustitución de 100% de PET, debido a que disminuye considerablemente la calidad del adoquín en lo que a desgaste se refiere.

- El adoquín con un 5% de PET presenta mejor comportamiento a la compresión que el adoquín con 100% de agregado natural, ya que posee una resistencia de 32.5 MPa, este valor supera en un 16 % la resistencia de diseño que es de 28 MPa.

- Se concluye que los adoquines con un 5%,10%,15% y 20% de PET, cumplen con la resistencia de diseño a compresión de 28 Mpa.

- El porcentaje óptimo para reemplazar la granulometría de un adoquín es el 20%, debido a que el espécimen fabricado con esta proporción cumple con todos los valores requeridos por las norma técnicas colombianas para la fabricación del mismo.

- Al comparar el costo de un adoquín comprado en el mercado, con uno elaborado con un 20% de sustitución de PET, es posible concluir que el precio se mantiene igual.

- Según los Resultados obtenidos en el ensayo de abrasión de los adoquines monocapa se puede concluir que las muestras con 5% de PET presentan inconsistencia respecto a los otros especímenes, debido a su alta desviación no se aceptan como confiables.

6. OBSERVACIONES

- Para establecer la viabilidad del plástico reciclado PET, en la composición de un adoquín, algunas propiedades físico-mecánicas se establecieron de igual forma que la arena, debido a que en Colombia no se cuenta con el equipo adecuado para determinarlas.
- El análisis comparativo se realizó mediante ensayos de laboratorio, entre adoquines elaborados con adición de material plástico PET y otros sin el mismo, debido a que se desconoce las condiciones de fabricación ofrecidas en la industria.

CITAS

[1] Plástico, Solido. Disponible en:
<http://www.elespectador.com/noticias/economia/plastico-solido-articulo-300160>
[Citado 26 de septiembre de 2015]

[2] SERRANO NAVARRO, Jorge Antonio. Utilización del material reciclado plástico en la elaboración de una baldosa. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2015

[3] HAYES, Jennifer. Trad. Analia Moranchel. Tipos de adoquines. [en línea] Demand Media, 1999-2015 [Santa Mónica: California] eHow en Español [citado 27 septiembre 2015] Disponible en Internet:
http://www.ehowenespanol.com/tipos-adoquines-info_205481/

[4] INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Las posibilidades del concreto. Construcción y Tecnología. [en línea] Agosto 2004. [citado : 1° Septiembre 2015] p. 20-25 Disponible en: Internet:
<http://www.imcyc.com/cyt/agosto04/POSIBILIDADES.pdf>

[5] GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. El concreto y otros materiales para la construcción.. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003. ISBN 958-9322-82-4

[6] PREFABRICADOS PONCE. Adoquín Roma. [online] [Madrid: España] Prefabricados Ponce S.L. 2012. [citado 3 de septiembre de 2015] Disponible en: Internet: <http://www.prefabricadosponce.es/adoquin-roma.php>

[7] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Adoquines de concreto para pavimentos, Editada 2004-03-04. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, Apartado 14237. 2003. 41p. NTC 2017.

[8] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho, Editada 2003-06-27. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, Apartado 14237. 2003. 13p. NTC 5147.

[9] INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión de adoquines de concreto. Santafé de Bogotá D.C. INV, 2012 I.N.V.E-426.

[10] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8 mm de lado, Editada 2003-06-27. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, Apartado 14237. 2003. 13p. NTC 220.

BIBLIOGRAFIA

GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. El concreto y otros materiales para la construcción.. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003. ISBN 958-9322-82-4

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Adoquines de concreto para pavimentos. NTC 2017. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 41p.

------. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8 mm de lado. NTC 220. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC, 2003. 13p.

------. Método de Ensayo para determinar la Resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho, NTC 5147. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC,. 2003. 13p..

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Resistencia a la compresión de adoquines de concreto. Santafé de Bogotá D.C. , 2012

SERRANO NAVARRO, Jorge Antonio. Utilización del material reciclado plástico en la elaboración de una baldosa. Tesis de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2015

ANEXOS

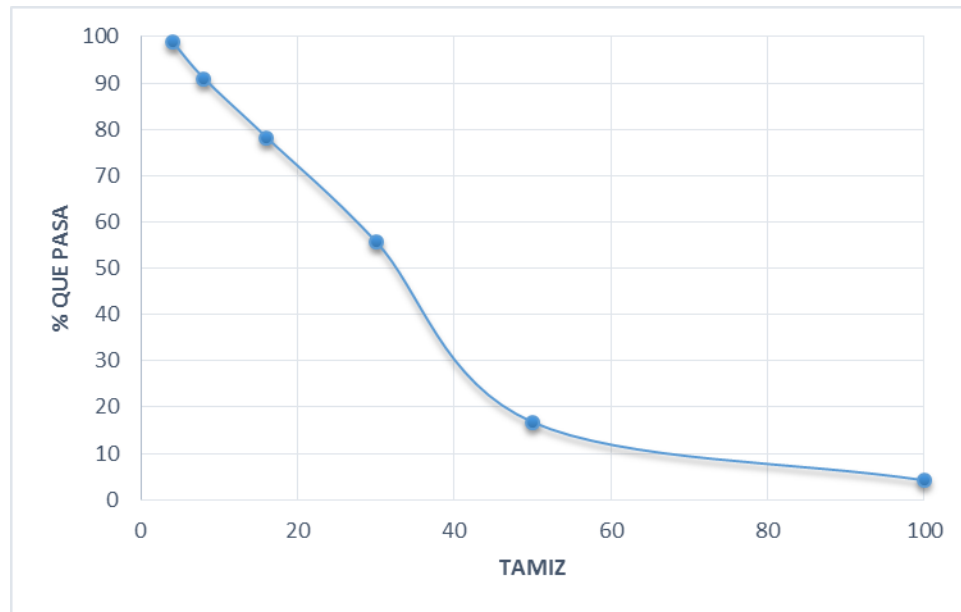
ANEXO A. ENSAYOS PRELIMINARES ARENA

NTC 77. MÉTODO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

Tabla 7. Granulometría arena

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
TAMIZ	PESO RETENIDO (gr)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
#4	12.1	1.21	1.21	98.79
#8	78.5	7.85	9.06	90.94
#16	127.6	12.76	21.82	78.18
#30	225.8	22.58	44.4	55.6
#50	389.7	38.97	83.37	16.63
#100	125.3	12.53	95.9	4.1
FONDO	39.3	3.93	99.83	0.17
TOTAL	998.3	99.83	PESO MUESTRA	1000 gr
MÓDULO DE FINURA	2.56			

Gráfica # 6. Granulometría arena



NTC 237. MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO Y LA ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS

Tabla 8. Gravedades específicas y porcentaje de absorción de la arena

	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
A	Peso del frasco + agua hasta la marca	653.70	g
B	Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire	500	g

C	Peso de la muestra .Frasco y agua hasta la marca, en el aire	960.20	g
D	Peso de la muestra Secada al horno	491.90	g
	Gravedad específica real..... $D/(A-C+D)$	2653.18	Kg/m ³
	Gravedad específica aparente..... $D/(A+B-C)$	2542.12	Kg/m ³
	Gravedad específica aparente S.S.S..... $B/(A+B-C)$	2583.98	Kg/m ³
	Absorción..... $((B-D)*100)/C$	0.84	%

NTC 92. DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTICULAS DE AGREGADOS

Tabla 9. Masa unitaria y porcentaje de vacíos de la arena

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
P1=peso del medidor + vidrio	3045	g
P2=peso del medidor + vidrio + agua	5868	g
V=volumen del medidor... $(P2-P1)/1000$	2.823	l
Pm=Peso del medidor vacío	2557	g
Pc= Peso del medidor + material S.S.S compactado	7265	g
Ps=Peso del medidor + material S.S.S suelto	6920	g
F=Peso unitario del agregado S.S.S compactado..... $(Pc-Pm)/V$	1668	Kg/m ³
Peso unitario del agregado S.S.S suelto..... $(Ps-Pm)/V$	1546	Kg/m ³
Vacíos..... $(E*1000-F)/(E*10)$	34.4	%

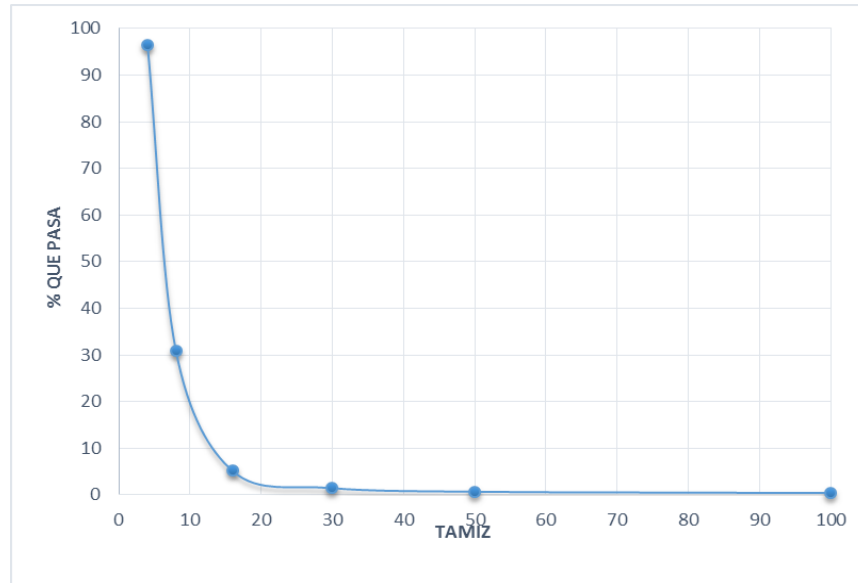
ANEXO B. ENSAYOS PRELIMINARES PET

NTC 77. MÉTODO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS
FINOS Y GRUESOS

Tabla 10. Granulometría PET

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
TAMIZ	PESO RETENIDO (gr)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
#4	34.9	3.49	3.49	96.51
#8	657.1	65.71	69.2	30.8
#16	256.9	25.69	94.89	5.11
#30	36.2	3.62	98.51	1.49
#50	7.7	0.77	99.28	0.72
#100	2.7	0.27	99.55	0.45
FONDO	1.6	0.16	99.71	0.29
TOTAL	997.1	99.71	PESO MUESTRA	1000 gr
MODULO DE FINURA		4.64		

Gráfica # 7. Granulometría PET



NTC 237. MÉTODO PARA DETERMINAR EL PESO ESPECÍFICO Y LA ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS FINOS

Tabla 11. Gravedades específicas y porcentaje de absorción del Pet

	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
A	Peso del frasco + agua hasta la marca	653.2	g
B	Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire	100	g
C	Peso de la muestra .Frasco y agua hasta la marca, en el aire	677.4	g

D	Peso de la muestra Secada al horno	95.9	g
	Gravedad específica real..... $D/(A-C+D)$	1337.52	Kg/m ³
	Gravedad específica aparente..... $D/(A+B-C)$	1265.17	Kg/m ³
	Gravedad específica aparente S.S.S..... $B/(A+B-C)$	1319	Kg/m ³
	Absorción..... $((B-D)*100)/C$	0.61	%

NTC 92. DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA Y LOS VACÍOS ENTRE PARTICULAS DE AGREGADOS

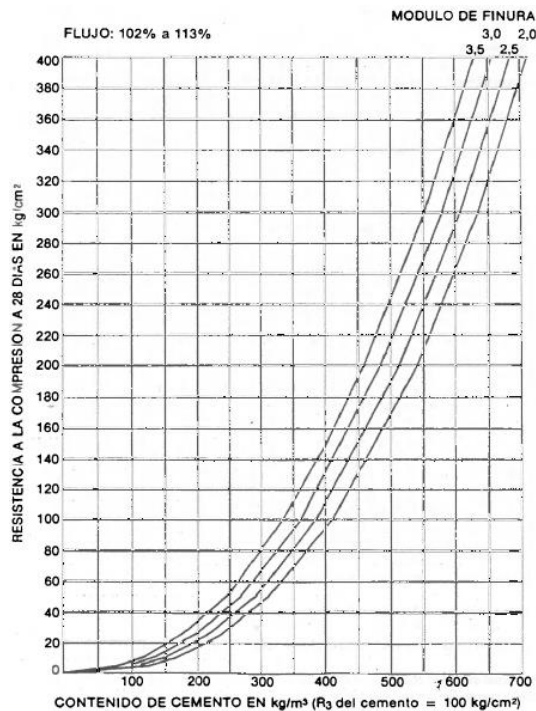
Tabla 12. Masa unitaria y porcentaje de vacíos del Pet

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
P1=peso del medidor + vidrio	3045	g
P2=peso del medidor + vidrio + agua	5868	g
V=volumen del medidor... $(P2-P1)/1000$	2.823	l
Pm=Peso del medidor vacío	2557	g
Pc= Peso del medidor + material S.S.S compactado	3986	g
Ps=Peso del medidor + material S.S.S suelto	3806	g
F=Peso unitario del agregado S.S.S compactado..... $(Pc-Pm)/V$	506	Kg/m ³
Peso unitario del agregado S.S.S suelto..... $(Ps-Pm)/V$	442	Kg/m ³
Vacíos..... $(E*1000-F)/(E*10)$	56.8	%

ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLA ADOQUIN

El diseño de la mezcla se realizó con base en los pasos estipulados en la investigación realizada por el Ingeniero Rodrigo Salamanca en el laboratorio de Ensayos e investigaciones de la Universidad Nacional de Bogotá[5], para el diseño de la mezcla de un mortero; primero con el módulo de finura de la arena que es 2.56, con una resistencia de 4000 psi y una fluidez esperada entre 102% a 113%, obtenemos mediante la siguiente gráfica el contenido de cemento necesario para un metro cúbico de mezcla.

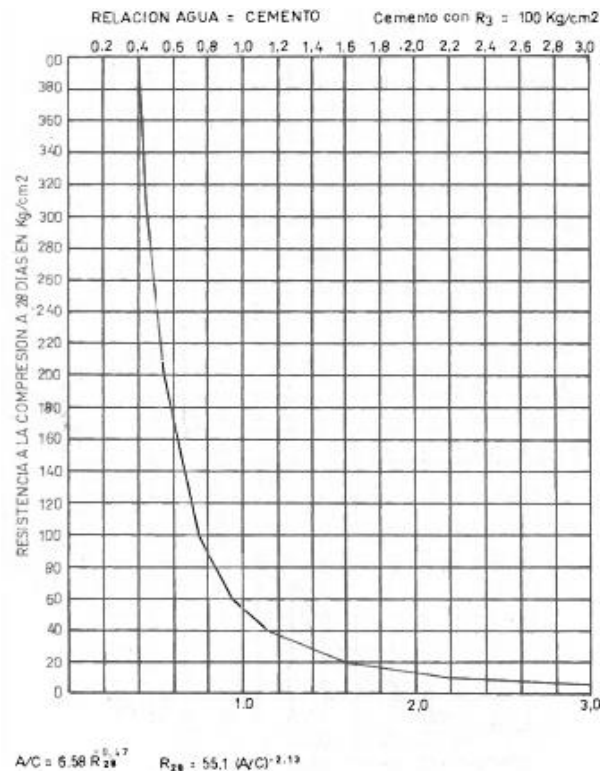
Gráfica # 8. *Determinación del contenido de cemento mortero seco*



FUENTE: Gutiérrez de López, libia (2003) El concreto y otros materiales para la construcción

Para este caso es 575 Kg de cemento; enseguida calculamos la cantidad de agua, esto lo hacemos mediante una relación agua-cemento la cual es hallada mediante la siguiente gráfica #9.

Gráfica # 9. *Determinación del contenido de cemento*



FUENTE: Gutiérrez de López, Ibia (2003) El concreto y otros materiales para la construcción

Con una relación agua-cemento de 0.47 y con el contenido de cemento hallamos la cantidad de agua, la cual es de 0.268 m^3 . Finalmente nos queda calcular la cantidad de arena, para esto restamos de un metro cubico los volúmenes hallados anteriormente y le restamos 0.035 m^3 de aire, este valor es supuesto por el ingeniero salamanca en su investigación así:

$$V_{arena} = 1 - (V_{aire} + V_{cemento} + V_{agua}) \quad (1)$$

$$V_{arena} = 1 - \left(0.035 + \frac{575}{2970} + 0.268\right)$$

$$V_{arena} = 0.503 \text{ m}^3$$

Finalmente procedemos a calcular las relaciones en volumen de la mezcla con respecto al cemento así:

$$Cemento = \frac{0.194}{0.194} = 1$$

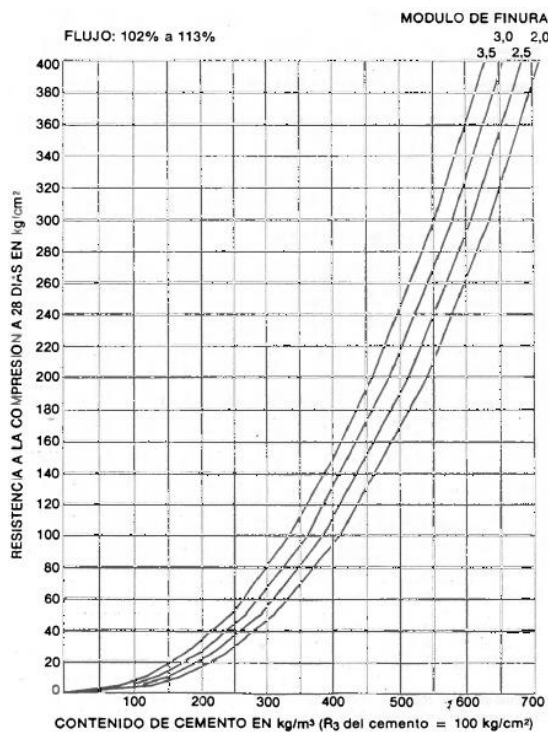
$$Arena = \frac{0.503}{0.194} = 2.59$$

$$Agua = \frac{0.268}{0.194} = 1.38$$

ANEXO D. DISEÑO DE MEZCLA CAPA SUPERFICIAL DEL ADOQUIN

El diseño de la mezcla se realizó con base en los pasos estipulados en la investigación realizada por el Ingeniero Rodrigo Salamanca en el laboratorio de Ensayos e investigaciones de la Universidad Nacional de Bogotá[5], para el diseño de la mezcla de un mortero; primero con el módulo de finura de la arena que es 2.56, con una resistencia de 4850 psi y una fluidez esperada entre 102% a 113%, obtenemos mediante la siguiente gráfica el contenido de cemento necesario para un metro cúbico de mezcla.

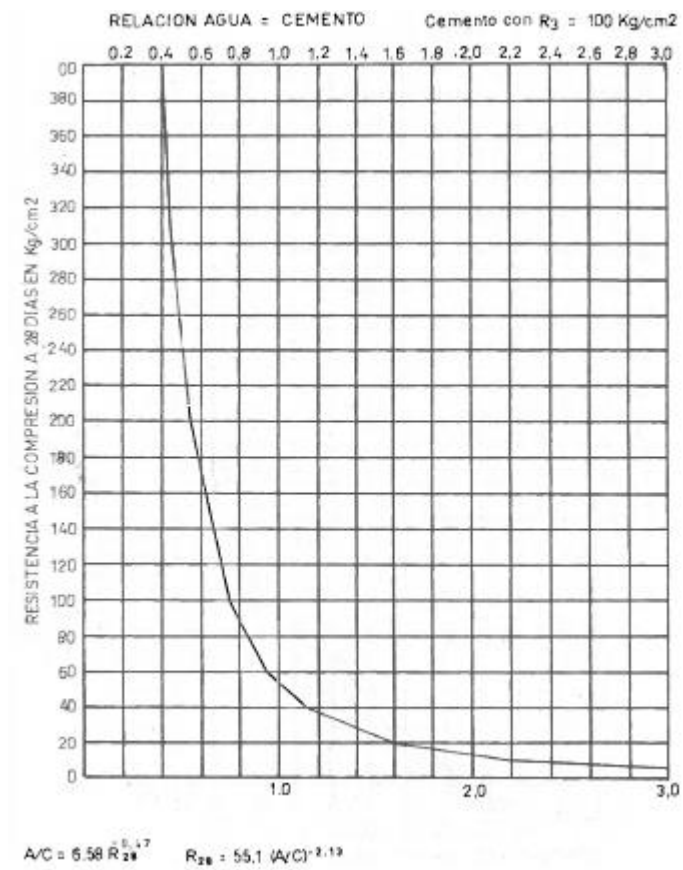
Gráfica # 8. *Determinación del contenido de cemento mortero seco*



FUENTE: Gutiérrez de López, libia (2003) El concreto y otros materiales para la construcción

Para este caso es 620 Kg de cemento; enseguida calculamos la cantidad de agua, esto lo hacemos mediante una relación agua-cemento la cual es hallada mediante la siguiente gráfica.

Gráfica # 9. *Determinación del contenido de cemento*



FUENTE: Gutiérrez de López, Ibia (2003) El concreto y otros materiales para la construcción

Con una relación agua-cemento de 0.43 y con el contenido de cemento hallamos la cantidad de agua, la cual es de 0.264 m³. Finalmente nos queda calcular la cantidad de arena, para esto restamos de un metro cubico los volúmenes hallados anteriormente y le restamos 0.035 m³ de aire, este valor es supuesto por el ingeniero salamanca en su investigación así:

$$V_{arena} = 1 - (V_{aire} + V_{cemento} + V_{agua}) \quad (1)$$

$$V_{arena} = 1 - \left(0.035 + \frac{620}{2970} + 0.264\right)$$

$$V_{arena} = 0.492 \text{ m}^3$$

Finalmente procedemos a calcular las relaciones en volumen de la mezcla con respecto al cemento así:

$$Cemento = \frac{0.209}{0.209} = 1$$

$$Arena = \frac{0.492}{0.209} = 2.35$$

$$Agua = \frac{0.264}{0.209} = 1.26$$

ANEXO E. RESULTADO ENSAYO DE ABSORCIÓN

Tabla 13. Resultado ensayo de absorción

Muestra	Porcentaje Pet	Dimensiones (cm)			Masa húmeda (g)	Masa seca (g)	% Absorción	Promedio	Desviación estándar
		Ancho	Largo	Espesor					
1	0	10.089	19.962	6.284	2518	2384	5.6	3.9	0.7
2	0	10.288	20.052	6.379	2713	2642	2.7		
3	0	10.268	20.033	6.366	2705	2612	3.6		
4	0	10.255	20.025	6.354	2684	2592	3.5		
5	0	10.293	20.108	6.406	2698	2590	4.2		
6	0	10.106	20.001	6.382	2707	2604	4.0		
7	0	10.290	20.008	6.424	2718	2622	3.7		
8	0	10.356	20.057	6.340	2699	2598	3.9		
9	0	10.170	20.127	6.300	2697	2618	3.0		
10	0	10.230	20.071	6.300	2684	2576	4.2		
11	0	10.205	20.031	6.284	2684	2582	4.0		
12	0	10.274	20.006	6.322	2668	2560	4.2		
13	5	10.268	20.103	6.372	2695	2630	2.5	2.5	0.4
14	5	10.266	20.160	6.368	2698	2636	2.4		
15	5	10.302	20.100	6.250	2668	2604	2.5		
16	5	10.326	20.038	6.313	2649	2572	3.0		
17	5	10.401	20.000	6.057	2590	2522	2.7		
18	5	10.348	20.115	6.272	2694	2630	2.4		
19	5	10.213	20.145	6.256	2688	2636	2.0		
20	5	10.299	20.070	6.250	2670	2604	2.5		
21	5	10.312	20.050	6.289	2657	2572	3.3		
22	5	10.321	20.108	6.060	2648	2590	2.2		
23	5	10.209	20.105	6.123	2690	2630	2.3		
24	5	10.139	20.112	6.255	2691	2636	2.1		
25	10	10.477	20.271	6.150	2633	2572	2.4	2.3	0.1
26	10	10.442	20.246	6.190	2647	2594	2.0		

27	10	10.359	20.183	6.140	2618	2554	2.5		
28	10	10.373	20.301	6.243	2661	2602	2.3		
29	10	10.184	20.186	6.188	2644	2592	2.0		
30	10	10.318	20.125	5.999	2586	2530	2.2		
31	10	10.459	20.258	6.17	2640	2583	2.2		
32	10	10.4	20.214	6.165	2632	2574	2.3		
33	10	10.366	20.242	6.191	2639	2578	2.4		
34	10	10.375	20.225	6.159	2633	2575	2.3		
35	10	10.329	20.101	6.061	2645	2586	2.3		
36	10	10.368	20.258	6.248	2665	2606	2.3		
37	15	10.391	20.264	6.161	2588	2530	2.3	2.6	0.1
38	15	10.276	20.207	6.172	2580	2514	2.6		
39	15	10.316	20.163	6.226	2609	2542	2.6		
40	15	10.285	20.154	6.217	2576	2508	2.7		
41	15	10.341	20.153	6.296	2619	2552	2.6		
42	15	10.317	20.177	6.199	2610	2546	2.5		
43	15	10.354	20.220	6.180	2599	2538	2.4		
44	15	10.317	20.170	6.212	2609	2544	2.6		
45	15	10.313	20.153	6.256	2597	2530	2.6		
46	15	10.289	20.153	6.235	2586	2519	2.7		
47	15	10.320	20.153	6.265	2606	2538	2.7		
48	15	10.315	20.157	6.232	2609	2546	2.5		
49	20	10.294	20.209	6.114	2481	2410	2.9	2.9	0.3
50	20	10.160	20.131	6.162	2463	2396	2.8		
51	20	10.270	20.196	6.112	2487	2420	2.8		
52	20	10.150	20.098	6.021	2453	2390	2.6		
53	20	10.185	20.176	6.200	2438	2372	2.8		
54	20	10.271	20.248	6.111	2475	2398	3.2		
55	20	10.269	20.140	6.260	2473	2386	3.6		
56	20	10.095	20.137	6.143	2468	2401	2.8		
57	20	10.114	20.187	6.097	2482	2417	2.7		
58	20	10.158	20.012	6.048	2453	2390	2.6		
59	20	10.171	20.087	6.205	2443	2382	2.6		
60	20	10.187	20.142	6.131	2475	2398	3.2		

61	30	10.425	20.176	5.966	2268	2178	4.1	5.2	0.8
62	30	10.277	20.016	6.114	2327	2216	5.0		
63	30	10.354	20.111	6.052	2273	2170	4.7		
64	30	10.282	20.093	6.261	2350	2234	5.2		
65	30	10.419	20.191	6.300	2380	2230	6.7		
66	30	10.259	20.153	6.207	2368	2252	5.2		
67	30	10.230	20.114	6.178	2338	2230	4.8		
68	30	10.243	20.132	6.401	2399	2274	5.5		
69	30	10.187	20.053	6.323	2325	2212	5.1		
70	30	10.299	20.095	6.114	2273	2170	4.7		
71	30	10.312	20.213	6.267	2384	2236	6.6		
72	30	10.225	20.122	6.224	2365	2254	4.9		

ANEXO F. RESULTADO DE ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN

Tabla 14. Resultado ensayo Flexotracción

Muestra	Porcentaje Pet	Dimensiones (cm)			Desplazamiento (mm)	Carga rotura (Kn)	Módulo de rotura (MPa)	Promedio	Desviación estándar
		Ancho	Largo	Espesor					
1	0	10.089	19.962	6.284	1.58	7.3	6.8	1.6	
2	0	10.288	20.052	6.379	1.55	11.5			
3	0	10.268	20.033	6.366	1.84	12.3			
13	5	10.268	20.103	6.372	1.56	12.3	7.8	0.3	
14	5	10.266	20.160	6.368	1.28	11.3			
15	5	10.302	20.100	6.250	1.42	11.7			
29	10	10.184	20.186	6.188	2.70	12.5	8.9	0.3	
30	10	10.318	20.125	5.999	2.47	12.6			
31	10	10.459	20.258	6.17	2.59	12.6			
37	15	10.391	20.264	6.161	1.70	10.6	6.4	0.9	
38	15	10.276	20.207	6.172	1.31	7.9			
39	15	10.316	20.163	6.226	1.60	9.4			
50	20	10.160	20.131	6.162	1.26	7.6	6.6	1.1	
51	20	10.270	20.196	6.112	2.48	10.6			
52	20	10.150	20.098	6.021	1.88	9.2			
61	30	10.425	20.176	5.966	1.28	5.4	4.3	0.3	
62	30	10.277	20.016	6.114	1.53	6.5			
63	30	10.354	20.111	6.052	1.41	6.0			

ANEXO G. RESULTADO DE ENSAYO ABRASIÓN

Tabla 15. *Resultado ensayo abrasión de adoquines Monocapa*

Muestra	Porcentaje Pet	Dimensiones (cm)			Dimensiones huella (mm)				Promedio	Desviación estándar
		Ancho	Largo	Espesor	AB	CD	EF	LH		
4	0	10.255	20.025	6.354	42	13	13	42.3	43	3.1
5	0	10.293	20.108	6.406	40	13	13	40.3		
6	0	10.106	20.001	6.382	46	13	13	46.3		
16	5	10.326	20.038	6.313	45	13	14	45.3	39	6.1
17	5	10.401	20.000	6.057	33	12	13	33.3		
18	5	10.348	20.115	6.272	37	13	14	37.3		
26	10	10.442	20.246	6.190	47	14	14	47.3	47	1.2
27	10	10.359	20.183	6.140	45	13	14	45.3		
28	10	10.373	20.301	6.243	47	13	14	47.3		
40	15	10.285	20.154	6.217	44	12	12	44.3	49	5.7
41	15	10.341	20.153	6.296	55	12	13	55.3		
42	15	10.317	20.177	6.199	47	14	13	47.3		
53	20	10.185	20.176	6.200	55	15	14	55.3	53	2.5
54	20	10.271	20.248	6.111	50	14	13	50.3		
55	20	10.269	20.140	6.260	52	13	13	52.3		
64	30	10.282	20.093	6.261	55	15	14	55.3	49	5.3
65	30	10.419	20.191	6.300	45	13	14	45.3		
66	30	10.259	20.153	6.207	47	14	13	47.3		

Tabla 16. Resultado de ensayo abrasión adoquines bicapa

Muestra	Dimensiones (cm)			Dimensiones huella (mm)			
	Ancho	Largo	Espesor	AB	CD	EF	LH
A	10.205	20.079	6.172	72	14	14.0	72.3
B	10.255	19.956	6.055	61	14	15.0	61.3
C	10.337	20.054	6.159	64	14	14.0	64.3
D	10.201	20.156	6.085	69	15	15.0	69.3
E	10.227	19.979	5.996	65	14	15	65.3
F	10.247	19.987	6.113	65	15	15.0	65.3
G	10.340	19.990	6.040	73	14	14	73.3
H	10.350	20.177	6.188	75	14	15.0	75.3
Promedio LH (mm)		68.3	Desviación Estándar			4.99	

ANEXO H. RESULTADO DE ENSAYO COMPRESIÓN

Tabla 17. Resultado ensayo a compresión adoquines

Muestra	Porcentaje Pet	Dimensiones (cm)			Carga (Kn)	Esfuerzo de Compresión (MPa)	Promedio	Desviación estándar
		Ancho	largo	Espesor				
7	0	10.290	20.008	6.424	565.0	27.4	29.5	2.2
8	0	10.356	20.057	6.340	662.0	31.9		
9	0	10.170	20.127	6.300	600.0	29.3		
19	5	10.213	20.145	6.256	699.9	34.0	32.5	1.3
20	5	10.299	20.070	6.250	650.0	31.4		
21	5	10.312	20.050	6.289	665.0	32.2		
32	10	10.400	20.214	6.165	615.2	29.3	29.0	0.2
33	10	10.366	20.242	6.191	607.4	28.9		
34	10	10.375	20.225	6.159	606.6	28.9		
43	15	10.354	20.220	6.180	600.0	28.7	28.2	0.4
44	15	10.317	20.170	6.212	584.0	28.1		
45	15	10.313	20.153	6.256	580.0	27.9		
56	20	10.095	20.137	6.143	572.0	28.1	28.0	0.4
57	20	10.114	20.187	6.097	575.4	28.2		
58	20	10.158	20.012	6.048	560.0	27.5		
67	30	10.230	20.114	6.178	343.0	16.7	17.2	0.7
68	30	10.243	20.132	6.401	350.0	17.0		
69	30	10.187	20.053	6.323	367.0	18.0		

Tabla 18. Resultado ensayo a compresión cubos

Día de prueba	Desplazamiento (mm)	Carga (Kn)	Esfuerzo (MPa)	Promedio	Desviación estándar
7 días	2.6	40	16	16.3	0.5
7 días	3.3	42	16.8		
7 días	3.5	40	16		
14 días	1.84	58	23.2	23.5	1.2
14 días	1.72	62	24.8		
14 días	2.2	56	22.4		
28 días	2.2	70	28	31.3	3.6
28 días	2.25	88	35.2		
28 días	2.15	77	30.8		

ANEXO I. ANÁLISIS DE PRECIOS PARA LA FABRICACIÓN DE 5000
ADOQUINES

Para el proceso de fabricación de los adoquines se requiere utilizar una máquina para fabricar bloques , en este proyecto de investigación se cotizo la máquina MK-003-1 (Máquina semi-automática para la fabricación de Bloques y Adoquines en concreto) la cual está provista de dos motores eléctricos trifásicos de 2 H.P a 3.600 RPM que accionan los vibradores, puede fabricar 625 adoquines por hora de 20 cm de largo x 10 cm de ancho y un espesor de 6 cm, su producción por ciclo es de 8 especímenes. La máquina es proporcionada por el proveedor Maquiblok de Colombia S.A.S, esta se pagará en 5 años, de los cuales cada año tiene 242 días laborales de 8 horas, dándonos por resultado 9680 horas en los 5 años. El valor de la máquina se le asignará a cada adoquín fabricado en este tiempo; también se cotizo una mezcladora de cemento, la cual se pagará en el mismo tiempo. El valor de la mezcladora de cemento es \$2.600.000 y el de la máquina fabricadora de adoquines es de 13.200.000.

A continuación se relaciona el análisis de precios hecho para el adoquín más óptimo que corresponde al que tiene un 20% de Pet.

Tabla 19. Presupuesto detallado

PRESUPUESTO PARA 5000 ADOQUINES CON 20% DE PET				
MATERIALES				
Descripción	Unidad de medida	cantidad	Valor unitario	Valor Parcial
Arena	m ³	2.617	\$ 40,000	\$ 104,680
Cemento	Bulto	75	\$ 25,000	\$ 1,875,000
Pet	Kg	863	\$ 1,300	\$ 1,121,900
Agua	lt	1742	\$ 20	\$ 34,840
TOTAL MATERIALES				\$ 3,136,420

EQUIPO				
Descripción	Unidad de medida	cantidad	Valor unitario	Valor Parcial
Mezcladora	Hora	8	\$ 268.60	\$ 2,149
Mk-003-1 (Máquina semi-automática para la fabricación de Bloques y Adoquines en concreto)	Hora	8	\$ 1,364	\$ 10,909
TOTAL EQUIPO				\$ 13,058
MANO DE OBRA				
Descripción	unidad de medida	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Obrero	Día	6	\$ 40,000	\$ 240,000
TOTAL MANO DE OBRA				\$ 240,000
ENSAYOS				
Descripción	unidad de medida	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
Absorción	Un	5	\$ 10,000	\$ 50,000
Flexotracción	Un	5	\$ 25,000	\$ 125,000
Abrasión	Un	5	\$ 15,000	\$ 75,000
Compresión	Un	5	\$ 25,000	\$ 125,000
TOTAL ENSAYOS				\$ 375,000
TOTAL 5000 ADOQUINES				\$ 3,764,478
VALOR DE PRODUCCIÓN POR UNIDAD				\$ 753