

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA BASE – CEMENTO PARA
PAVIMENTOS CON ADICIÓN DE RESIDUOS PET RECICLADO**

**JEFFERSON FERNANDO ARTEAGA VILLAMARIN
CÓDIGO 503605**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2018**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA BASE – CEMENTO PARA
PAVIMENTOS CON ADICIÓN DE RESIDUOS PET RECICLADO**

**JEFFERSON FERNANDO ARTEAGA VILLAMARIN
CÓDIGO 503605**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
Carlos José Slebi Acevedo
Ingeniero**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2018**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Bogotá, mayo, 2018

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. GENERALIDADES	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2.1 Descripción del problema	17
1.2.2 Formulación del problema	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 JUSTIFICACIÓN	19
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES	20
1.5.1 Alcance	20
1.5.2 Limitaciones	20
1.6 MARCO DE REFERENCIA	21
1.6.1 Marco Teórico	21
1.6.1.1 Pavimentos Flexibles	21
1.6.1.2 Características de los pavimentos flexibles	22
1.6.1.3 Asfalto	22
1.6.1.4 Cemento	22
1.6.1.5 Cal	23
1.6.1.6 Ceniza Volante	23
1.6.1.7 Bases	23
1.6.1.8 Base Granular	23
1.6.1.8 Tipos de Estabilización de Suelos y Capas Granulares	27
1.6.1.9 Bases tratadas con cemento	28
1.6.1.10 Suelo Cemento (Artículo 350 – 13 INVIAS).	31
1.6.1.11 Tereftalato de polietileno (PET)	33
1.6.1.12 Propiedades	33
1.6.1.13 Utilización del PET en la Ingeniería Civil	34
1.6.2 Marco conceptual.	35
1.6.3 Normatividad aplicada	37
1.7 METODOLOGÍA	38
1.7.2.1 Fuentes Primarias	39
1.7.2.2 Fuentes Secundarias	39
1.8 DISEÑO METODOLÓGICO	39
1.8.1 Primera Etapa: Revisión documental para el proyecto	40
1.8.2 Segunda Etapa: caracterización de materiales y realización de ensayos	41
1.8.3 Tercera Etapa: Cálculos y análisis de resultados	41
1.8.4 Cuarta Etapa: Desarrollo del informe final	41

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO PET	42
2.1 GENERALIDADES DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO PET	42
2.1.1 Conceptos Básicos	42
2.1.2 Estructura química	43
2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del PET	44
2.1.3.1 Densidad	44
2.1.3.2 Conductividad térmica	44
2.1.3.3 Absorción de agua	44
2.1.3.4 Permeabilidad	45
2.1.3.5 Comportamiento frente a la temperatura	45
2.1.3.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos	46
2.2 REVISIÓN LITERARIA	47
3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	50
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BASE	50
3.1.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino E-213.	50
3.1.2 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INVE – 133-13	51
3.1.3 Evaluación de la resistencia de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos INVE-224	52
3.1.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y llenantes minerales INVE-235 – 12	53
3.1.5 Ensayo Contenido de vacíos en agregados finos no compactados INVE-239.	53
3.1.6 Ensayo de resistencia de agregados a la degradación por abrasión en el micro-Deval - INVE-238	54
3.1.7 Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos ensayo modificado de compactación (Método D) I.N.V.E – 142	55
3.1.8 Solidez (sanidad) de agregados INV E-220	56
3.1.9 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados I.N.V. E -211	57
3.1.10 Relación de soporte del suelo en el laboratorio C.B.R método I saturado I.N.V. E-148.	58
3.1.11 Índice de aplanamiento y de alargamiento INVIAS E -230	59
3.1.12 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INVIAS E -227	59
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO	61
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA	64
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL PET RECICLADO TIPO ESCAMAS	64
4. ANÁLISIS DE LA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO ADICIONA CON PET RECICLADO TIPO ESCAMAS	65
4.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO SEGÚN NORMA INV E – 614 – 13	65
4.1.1 Preparación de ensayo	65

4.2 RESULTADOS	67
4.2.1 Base Granular estabilizada con cemento al 3%, 4% y 5% de Cemento	67
4.2.2 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 2% y cemento al 3%, 4% y 5%.	68
4.2.3 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 4% y cemento al 3%, 4% y 5%.	69
4.2.4 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 6% y cemento al 3%, 4% y 5%	70
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
4.3.5 Comparación Resistencia Vs. % de PET	71
4.3.6 Comparación total peso unitario Vs % de cemento	73
4.4 INTERACCIÓN QUÍMICA DE LA SUPERFICIE AGREGADO – CEMENTO - MATERIAL PET	74
4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA LA APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA DEL USO DE PET COMO ADITIVO PARA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO	75
4.5.1 Información Supuesta básica	75
4.5.2 Variables de diseño a partir de la información básica	75
4.5.3 Cálculo Valor Total de Materiales por Alternativa	77
4.5.4 Análisis de Resultados Evaluación Económica modelo Constructivo	82
5. CONCLUSIONES	84
6. RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87
ANEXOS	91

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Módulo de Elasticidad Tipo de las Diferentes Capas del Pavimento	21
Cuadro 2. Requisitos de los Agregados para Bases Granulares	24
Cuadro 3. Franjas Granulométricas del Material de Base Granular	25
Cuadro 4. Granulometría para Bases Granulares no Tratadas	25
Cuadro 5. Requisitos de los Agregados para Base de Tratada con Cemento	29
Cuadro 6. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento	30
Cuadro 7. Propiedades de la Base Tratada con Cemento Según la PCA	30
Cuadro 8. Resistencias Mínima a la Comprensión Simple PCA	31
Cuadro 9. Contenido inicial del cemento en el diseño de la mezcla	31
Cuadro 10. Clases de Suelo Cemento	32
Cuadro 11. Requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento	32
Cuadro 12. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento	33
Cuadro 13. Comportamiento del PET Frente a la Temperatura	37
Cuadro 14. Valor de Permeabilidad del PET	45
Cuadro 15. Comportamiento del PET frente a la Temperatura	46
Cuadro 16. Requisitos de los agregados para base tratada con cemento INVIAS-13	60
Cuadro 17. Comparación Valores máximos para clasificación de grupo, norma INVE 180 Vs. Resultados Prueba de Granulometría INVE 213	63
Cuadro 18. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo- cemento según la PCA (Portland Cement Association)	63
Cuadro 19. Porcentajes de material que se reemplazara en la Base granular modificada	65
Cuadro 20. Comparación de resultados Vs. Criterios de diseño para la mezcla de base tratada con cemento 351-13	72
Cuadro 21. Contenidos de Cemento y PET para Bases estabilizadas con resistencia óptima de 3.5 MPa	74
Cuadro 22. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T4 como factor principal	76
Cuadro 23. Características del Tramo de Pavimento en Concreto	77
Cuadro 24. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento	78
Cuadro 25. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 2%	79
Cuadro 26. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 4%	80
Cuadro 27. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 6%	81
Cuadro 28. Comparación de costos Según Composición de Material para El Pavimento	82

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pavimento Flexible	21
Figura 2. Metodología Realización de la Investigación	40
Figura 3. Unidad repetitiva de PET	43
Figura 4. Componentes del PET	43
Figura 5. Obtención del PET	44
Figura 6. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino I.N.V. E – 213	50
Figura 7. Curva Granulométrica de la Base	51
Figura 8. Ensayo Equivalente de arena de suelos y agregados finos INVE – 133-13	51
Figura 9. Ensayo Evaluación de la resistencia de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos INVE-224	52
Figura 10. Ensayo Azul de metileno	53
Figura 11. Preparación Ensayo Contenido de vacíos en agregados finos no compactados INVE-239.	54
Figura 12. Ensayo de resistencia de agregados a la degradación por abrasión en el micro-Deval	54
Figura 13. Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos ensayo modificado de compactación	55
Figura 14. Densidad seca vs humedad	56
Figura 15. Esayo Solidez (sanidad) de agregados INV E-220	56
Figura 16. Ensayo Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados	57
Figura 17. Ensayo Relación de soporte del suelo en el laboratorio C.B.R	58
Figura 18. Índice de aplanamiento y de alargamiento	59
Figura 19. Ensayo Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INVIAS E - 227	60
Figura 20. Clasificación de Suelos por sistema AASHTO	62
Figura 21. Preparación de los Cilindros	66
Figura 22. Fallo de Cilindros con Máquina Universal MTS	66
Figura 23. Contenido óptimo de cemento para la base	67
Figura 24. Peso Unitario Seco del Cemento	68
Figura 25. Contenido óptimo de cemento para la base adicional con 2% de PET	68
Figura 26. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 2% de PET	69
Figura 27. Contenido óptimo de cemento para la base adicional con 4% de PET	69
Figura 28. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 4% de PET	70
Figura 29. Contenido óptimo de cemento para la base adicional con 6% de PET	70
Figura 30. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 6% de PET	71
Figura 31. Porcentaje de Cemento Vs. Porcentaje de PET	71
Figura 32. Curva de Resistencia Vs. % de PET	72
Figura 33. Total peso Unitario Vs. % de Cemento	73

Figura 34. Comparación de costos Según Composición de Material para El Pavimento

82

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultados ensayos Caracterización base granular	92
Anexo B. Resultados Ensayo Resiste a la Comprensión	93
Anexo C. Cálculos Evaluación Económica	94

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los ingenieros civiles se encuentran en la búsqueda de procesos innovadores ambientalmente amigables, en pro de la generación de métodos de la construcción sustentable, en infraestructura vial, se han observado esfuerzos por mejoramiento de los materiales, especialmente haciendo uso de materiales reciclables o materiales cuya disposición final constituye un problema ambiental, tal es el caso de los materiales PET. Los residuos PET son producidos en masa y su disposición amenaza el medio ambiente, por lo anterior se hace necesario realizar la presente investigación, con lo cual se pretende analizar el comportamiento de propiedades físicas y mecánicas de una base BTC 25 estabilizada con cemento para pavimentos flexibles y rígidos, adicionando material PET reciclado, con el fin de determinar si éste material puede ser utilizado como estabilizante, reemplazando el material granular No. 4 en un porcentaje determinado que muestre mejoras o mantenga la resistencia a la compresión mínima de 3.5 Mpa, contribuyendo con el cuidado del medio al utilizar materiales reciclados en procesos constructivos en Colombia.

En la investigación se desarrollará un trabajo experimental, el cual involucra revisiones bibliográficas sobre los materiales PET así como las bases granulares, para conocer sus características y propiedades generales, además se realizara la revisión de la normas INVIAS aplicadas para este tipo de material; esto a través de 13 ensayos de laboratorio que buscan caracterizar la dureza, durabilidad, resistencia del material granular y determinar su limpieza, y, un ensayo adicionando material PET triturado, cuyos resultados serán evaluados y comparados en dos casos, primero base granular con adición de cemento y la base granular adicionada con cemento y PET; todo con el fin de determinar si el PET puede mejorar las propiedades físico mecánicas de la base – cemento, respecto a las otras opciones, para que sea tenido en cuenta como aditivo estabilizante en las futuras construcciones viales de pavimentos flexibles o rígidos.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Los pavimentos rígidos o flexibles son carpetas de rodamiento multicapas, compuestas por agregados minerales recubiertos y sementados con asfaltos o cementos y una o más bases o sub bases, capaz de resistir altos esfuerzos y fluir bajo la acción de cargas permanentes¹, éste tipo de pavimento tiene una alta incidencia en la construcción de carreteras y vías urbanas; es por esta razón que, constantemente se busca como mejorar no solo el asfalto, sino las capas que lo componen, permitiendo que su durabilidad y resistencia sean mayor.

De acuerdo con lo anterior se ha evidenciado que en Colombia como en otros países, se realizan investigaciones que identifican y analizan las principales características de las capas que conforman los pavimentos flexibles, de igual manera se desarrollan trabajos académicos relacionados con el mejoramiento de éstas capas, mediante la adición de a o agregados, especialmente de uso reciclado, analizando sus propiedades físico mecánicas y determinando su éstos agregado son útiles, particularmente para ser usados como estabilizantes.

Uno de estos aportes es el libro titulado Pavimentos: materiales, construcción y diseño, documento técnico que trata sobre los aspectos más importantes relacionados con pavimentos para carreteras u vías urbanas. En este libro se menciona que las “capas por materiales granulares no tratados o ligados (base, sub base y/o subrasante mejorada), conforman la parte más voluminosa de la estructura de pavimentos, tienen como función principal ayudar a soportar los esfuerzos que transmiten las cargas vehiculares y distribuirlos a la subrasante en magnitudes que sean tolerables por ésta, así mismo manifiesta que éstas capas controlan en gran parte las deformaciones elasto – plásticas asociadas con los fenómenos de fatiga y ahuellamiento en las mezclas asfálticas, ayudan a controlar el agua hacia la subrasante y facilitan los procesos constructivos”².

Como se puede observar, este libro hace énfasis en que, la función de las capas granulares, tiene un valor importante en el comportamiento de los pavimentos, por tanto su mejoramiento es tema indispensable, pues cada vez son mayores las exigencias en construcción de carreteras y vías urbanas; por tanto la investigación dirigida a los tipos de materiales para pavimentos se enfoca en usar agregados o aditivos que mejoren sus características y brinden mayor estabilidad a en los suelos.

¹ SALAZAR DELGADO, Jorge. Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). En: Métodos y Materiales. Noviembre – diciembre, 2011. col. 1, p. 26

² RONDON QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá: ECO, 2015. p. 26

Al respecto, el estudio de bases granulares modificadas, ha permitido establecer que existen materiales como el cemento, la cal, las emulsiones asfálticas, con los cuales ésta capa del pavimento asfáltico puede presentar un comportamiento favorable, como lo expone un Boletín técnico presentado por el Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) de la Universidad de Costa Rica en 2011, el cual concluye que “con la adición de cemento a la base granular se pueden construir capas de base de alta capacidad estructural, además muy competitivas en cuanto a durabilidad y estabilidad volumétrica a largo plazo”³, esto teniendo en cuenta que al incorporar cemento a la base, se mejoran propiedades como “la resistencia mecánica, la resistencia a las condiciones del clima, los indicadores de plasticidad o la degradabilidad (meteorabilidad) de los agregados”⁴, además de ofrecer la oportunidad de reciclar pavimentos que estén deteriorados.

En cuanto a la estabilización de bases granulares con cal, la Nacional Lime Association publica en 2004 el Manual de estabilización de suelo tratado con Cal: Estabilización y modificación con cal, en el cual se expone que la cal es un elemento que trabaja bien en la estabilización, utilizándola para recuperar el espesor total de los pavimentos. Adicionalmente, hace mención sobre como este material puede usarse para el mejoramiento de la calidad de los materiales que conforman la base, en especial los que “contienen cantidad excesiva de finos arcillosos”⁵, esto sumado a la capacidad que tiene la cal de contribuir con la transformación de materiales estructurales, hace que las bases sean de mayor calidad y por tanto su rendimiento sea mejor.

Finalmente, en las bases estabilizadas con asfalto espumado, según el Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica, “la resistencia de la base se aproxima a la de materiales tratados con cemento mientras que mantiene flexibilidad, siendo relativamente resistente a la fatiga. El reciclaje del material existente permite conservar materiales vírgenes y energía, así como reducir costos de acarreo. Todo el procedimiento se realiza en sitio y por lo tanto es más rápido que otros métodos de rehabilitación”⁶.

Ahora bien, en la actualidad se busca así mismo, el mejoramiento de materiales para pavimentos con el uso de elementos amigables con el planeta, o utilizando elementos reciclados que brindan un doble propósito, por un lado aprovechar sus propiedades para la estabilización de pavimentos, y reusar materiales que ya han cumplido su vida útil y que necesitan de un tratamiento y/o disposición adecuada

³ ARCE, Mario. Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. En: PITRA, Boletín Técnico. Agosto – Septiembre, 2011. vol 2, no, 19, p. 7.

⁴ Ibíd., p. 1

⁵ NACIONAL LIME ASSOCIATION. Manual de estabilización de suelo tratado con Cal: Estabilización y modificación con cal [en línea]. Lima: La Asociación [citado 27 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf>

⁶ UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. Bases estabilizadas con asfalto espumado [en línea]. San José: Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales [citado 27 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/campanas/pavimentos-verdes/ficha-2.pdf>>

para que no afecten el medio ambiente, algunos de estos elementos, han sido por ejemplo, el caucho de botas militares, llantas recicladas, y para el caso de la presente investigación el plástico o material PET.

Al respecto el Trabajo titulado “PET de desecho y su uso en concreto” describe investigaciones en las que se usó la radiación como tecnología alternativa para la modificación fisicoquímica de PET de desecho para su uso en el concreto, viendo la oportunidad de ser un sustituto de los agregados minerales utilizados en éste, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas del mismo. Estas investigaciones permitieron determinar que “al agregar fibras de PET provenientes de botellas al concreto, aumentan la resistencia y retardan el agrietamiento, esto debido a la geometría que poseen las fibras que ayuda a la unión del concreto en las secciones fisuradas”⁷.

Así mismo el estudio titulado “Utilization of waste plastic bottles in asphalt Mixture” (Utilización de residuos de botellas de plástico en mezclas de asfalto) realizado por la Universidad de Malaya, y cuyo propósito fue investigar los efectos de la adición de botellas de plástico en el pavimento de carreteras, para lo cual se evaluaron las propiedades de Marshall así como la gravedad específica de la mezcla de asfalto que contenía diferentes porcentajes de botellas de plástico. Los resultados de esta investigación mostraron que los valores de estabilidad y flujo de la mezcla del asfalto aumentaron agregando residuos de botellas plásticas trituradas en la mezcla del asfalto. Además, se demostró que la gravedad específica, el volumen y la rigidez de las mezclas aumentaban añadiendo una cantidad menor de botellas de plástico; igualmente, se concluyó que las mezclas que contienen residuos de botellas de plástico recicladas tienen valores de contenido óptimo de asfalto (OAC) más bajos en comparación con la mezcla convencional, y esto puede reducir la cantidad de aglutinante de asfalto que se puede usar en proyectos de construcción de carreteras. Además, “las mezclas que contenían residuos de plástico mostraron una resistencia a la fatiga significativamente mayor que la mezcla convencional”⁸.

Otro aporte relevante, es el artículo titulado “Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in asphalt pavement: A review” (Utilización de tereftalato de polietileno (PET) en el pavimento de asfalto: Una revisión), en el cual se presenta un resumen del estudio sobre la utilización de tereftalato de polietileno (PET) en la construcción de carreteras. Los resultados del estudio, demostraron que el PET puede mejorar algunas propiedades de la mezcla del pavimento flexible tales

⁷ ÁVILA CÓRDOBA, L.; MARTNEZ BARRERA, G.; BARRERA DÍAZ, C.; UREÑA NUÑEZ, F. y LOZA YÁÑEZ, A. PET de desecho y su uso en concreto [en línea]. Barcelona: Omnia Science [citado 28 agosto, 2017], disponible en Internet: <URL: <http://omniascience.com/monographs/index.php/monograficos/article/viewFile/246/145>>

⁸ TAHER BAGHAEE, Moghaddam; MOHAMED REHAN, Karim y MEHRTASH, Soltani. Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *In: Journal of Engineering Science and Technology*. Junio – Agosto, 2013. vol. 8, no. 3, p. 264.

como el aumento de la estabilidad, la rigidez y la viscosidad. Por lo tanto, puede mejorar el agrietamiento térmico, susceptibilidad a la temperatura, daños por fatiga y resistencia al ahuellamiento. Así como también, se indica que “la utilización de polímeros adicionados como modificadores a mezclas bituminosas mitigarían el problema de la eliminación segura de los residuos de materiales plásticos de una manera ecológica”⁹.

Adicionalmente, el artículo titulado “Soil Stabilization by using plastic waste”¹⁰ (Estabilización del suelo usando desechos plásticos), menciona que en la actualidad se adelantan estudios para la implementación los residuos plásticos como material coadyuvante para dar solución a problemas geotécnicos. Tales como, la estabilización de suelos, siendo esta una alternativa que no sólo contribuye con el medio ambiente, sino que el uso de botellas de plástico como estabilizador del suelo representa también una alternativa económica y rentable; teniendo en cuenta, el hecho de que es cada vez más frecuente, de escasez en materiales y canteras de buena calidad, que puedan ser empleados en terraplenes y rellenos. En este estudio, se analizó el comportamiento del suelo arcilloso adicionado con tres tipos de plásticos. Los resultados, mostraron que hay un aumento considerable en el valor de la capacidad de carga posterior a la incorporación de estos residuos; igualmente, se observó un aumento considerable en la resistencia del suelo a la compresión inconfiada. De acuerdo a lo anterior, se concluyó que la adición del 4% de residuos de plástico de botellas de PET puede mejorar la resistencia al corte de la muestra de suelo hasta 39,9KN/m² (valor máximo obtenido). Además, que los desechos de plástico provenientes de botellas pueden ser mezclados con suelos “blandos”, para obtener una máxima capacidad portante del suelo.

Finalmente, se tiene el estudio Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos realizado en Colombia, y en el cual se utilizó desecho de botellas plásticas como material de adición, para modificar el comportamiento de una base y una subbase granular.

A partir de ensayos de Proctor y CBR se comparó el comportamiento del material natural y el mezclado. Los resultados de la investigación mostraron que “el CBR de una mezcla de materiales granulares, base y subbase, con material de desecho, presentaba un incremento notable. Además, la mezcla modificada, cambiaba el peso unitario del material, obteniéndose una mezcla con mayor resistencia y menor peso. También se demostró una influencia positiva en la

⁹ AHMAD, A.F.; RAZALI, A.R. y RAZELAN, I.S. Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in asphalt pavement: A review. En: Materials Science and Engineering. Abril, 2017. no. 203, p. 1-7

¹⁰ SAKTHI KALA, J.; NANTHINI, T. y MAHENDRAN, K. Soil stabilization by using plastic waste. En: SSRG International Journal of Civil Engineering. April – June, 2017. Special Issue, p. 384.

resistencia del material por parte del desecho de botellas plásticas”¹¹, llegándose a la conclusión que éste es un buen antecedente para el desarrollo de más investigaciones, que permitan comprobar la factibilidad de usar este material reciclado, como aditivo estabilizante, que además de beneficiar las bases y subbases para pavimentos, beneficiará paralelamente al ambiente, al reducir el impacto generado por la disposición de botellas plásticas.

Como se puede observar, especialmente en el ámbito internacional, se han realizado varios estudios sobre la utilización de agregados o aditivos en las bases y asfaltos para pavimentos de carreteras y vías urbanas para estabilizarlas y para que presenten un mejor comportamiento en cuanto a la resistencia, rigidez, estabilidad entre otros.

En cuanto al tema de estudio, la revisión documental permitió determinar que se han realizado investigaciones relacionadas con el uso de PET para la estabilización de asfaltos o concretos, y el último artículo relacionado, en el cual se evaluó la estabilización de bases granulares con la adición de este material y en la que se obtuvo buenos resultados, razón por la cual, la realización de la presente investigación será de gran provecho, pues con ella se podrá seguir explorando cómo se comporta la base granular para pavimentos con la adición de PET reciclado como modificador, bajo las especificaciones de las diferentes normas colombianas.

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 Descripción del problema. La infraestructura vial tiene una significativa importancia en el crecimiento y desarrollo de los países, por lo cual las tecnologías constructivas deberán apuntar hacia la construcción de vías de alta calidad y funcionalidad. Por tanto, se requiere indagar en materiales que aporten durabilidad a las estructuras de pavimentos y estabilidad en sus diferentes capas, de forma que se retrase su deterioro a corto plazo.

Por tal razón, desde los tiempos en que se identificaron los mecanismos de falla en la estructura de los pavimentos, se ha buscado soluciones para mejorar las propiedades de los materiales que conforman dichas estructuras. Tales soluciones deberían enfocarse en los pavimentos tanto flexibles como rígidos, dado que se requiere mejores espesores para distribuir los esfuerzos; y centrarse particularmente en la capa base, cuya función principal es absorber en mayor proporción los esfuerzos transmitidos por el tránsito. Para garantizar el cumplimiento de su función, la base deberá ser adecuadamente compactada, y en casos especiales requerirá algún tipo de mejoramiento y así pueda resistir

¹¹ PINZÓN CORTÉS, Eduardo; MORA ARCINIEGAS, Luis Carlos y MENDIETA SALINAS, Yamid. Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. En: Revista Ingenieros Militares. Julio – noviembre, 2016. no. 11, p. 60

eficientemente las cargas del tránsito sin que se produzcan deformaciones plásticas, y así transmitir esfuerzos de forma adecuada a las capas inferiores del mismo.

En este sentido, garantizar la resistencia de la base granular es indispensable para proporcionar el soporte adecuado a las carpetas asfálticas; de lo contrario, podrían generarse mecanismos de falla, como: fisuras, deterioros por contracción, y por fatiga que se traducen en una eventual pérdida de funcionalidad. Este tipo de deformaciones se presenta con frecuencia en bases estabilizadas con cemento, donde “el agrietamiento por la hidratación-contracción del cemento durante el proceso de secado, se refleja en la capa de rodamiento, generando discontinuidad en la carpeta que eventualmente ocasiona disminución de la calidad en la superficie de rodadura, hasta llegar a hacerla inadecuada para el tránsito vehicular”¹².

Al respecto, investigaciones han determinado que, una de las principales causas de los deterioros en los pavimentos flexibles está asociado con la inestabilidad y deficiencias en las características físico-mecánicas de las bases granulares, pues “en muchos casos esta inestabilidad se debe a una presencia importante de finos plásticos en el material utilizado, puesto que en presencia de humedad estos materiales finos incrementan su plasticidad y su inestabilidad, provocando un aumento de la deformabilidad del pavimento y eventualmente deformaciones o fallas de la carpeta. Cuando los daños se reflejan hasta la carpeta de rodamiento se presenta fisuramiento y como consecuencia permeabilidad en la carpeta, lo cual permite la migración de finos desde la superficie, o incluso permitir que se laven los finos de los materiales de la base y subbase, generando posteriormente hundimientos, deformaciones y daños costosos por un aumento en la cantidad de vacíos o en la plasticidad del material”¹³.

De acuerdo con lo anterior, esta investigación plantea evaluar el comportamiento de la base granular estabilizada con cemento, mediante la adición de residuos PET triturado (tipo escamas) empleando diferentes proporciones peso en los tamaños N 4 que reemplazara el 2%, 4% y 6% de material granular que se encuentra en una franja granulométrica BTC 25 para un tránsito NT3 clase A, y de este modo comprobar si el material PET contribuye con el mejoramiento de la resistencia a la compresión de la base estabilizada con cemento. Lo anterior, de conformidad con lo establecido por las normas técnicas colombianas para materiales granulares, con miras a evitar deterioros en bases que afecten la carpeta de pavimentos rígidos y flexibles, y que a la vez contribuya con la

¹² FLORES LOZA, Gilberto. Efecto de fatiga en un material de base estabilizada con cemento (Pavimento flexible). México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil. Trabajo de maestría, 2011, p. 13.

¹³ VEGA QUIRÓS, Mónica. Variación de la resistencia de una subbase granular debido a la variación del contenido de finos plásticos en granulometrías controladas. En: Revista Infraestructura Vial. Marzo- abril, 2014. vol. 16, no. 27, p. 37

mitigación del impacto ambiental causado por este tipo de desechos.

1.2.2 Formulación del problema. ¿El residuo de PET como aditivo, mejora la resistencia óptima de 3.5 Mpa de la base granular estabilizada con cemento, de conformidad con la normativa colombiana para materiales estabilizados y su uso en el diseño de pavimentos?.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Comparar el comportamiento de la base granular modificada con cemento, reemplazando el 2%, 4% y 6% de material granular con PET reciclado tipo escamas No 4, con el fin de determinar si éste puede ser usado como estabilizante.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar las principales propiedades físicas y mecánicas del polietileno tereftalato (PET), mediante revisión documental.
- Realizar pruebas de laboratorio para caracterizar el material granular que conforma una base BTC 25; en cumplimiento con lo establecido en las normas INVIAS para bases granulares y bases estabilizadas con cemento.
- Determinar el porcentaje óptimo de cemento y PET reciclado para la comparación, en cumplimiento con lo establecido en las normas INVIAS.
- Determinar si el uso de PET reciclado tipo escamas No. 4 mejora la resistencia de la base granular modificada con cemento para pavimentos, al ser utilizado como aditivo, mediante el reemplazo parcial en los materiales granulares.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Lo anterior teniendo en cuenta, que este modelo de modificación para las capas granulares de pavimentos, no se ha visto en el país, ya que por tradición se trabaja con cemento, cal y otros materiales en la estabilización de bases; por lo que esta investigación se convierte en una oportunidad para determinar si el uso de PET en la base granular estabilizada con cemento, puede presentar mejoras en sus propiedades y por tanto comportamientos positivos para su uso en la construcción de carreteras y vías urbanas.

Igualmente, y como parte del compromiso del cuidado del medio ambiente y la minimización de impactos ambientales, se debe considerar la posibilidad que se tiene al poder usar materiales reciclados, como el caso de PET, para la fabricación de estructuras de pavimento, ya que éste en comparación con otros materiales cuenta con propiedades tales como procesamiento fácil, baja densidad, buena

resistencia química, buenas propiedades mecánicas, buenas propiedades de aislamiento eléctrico, bajo costo y buenas propiedades térmicas.

Finalmente, es importante recalcar que los resultados de esta investigación, si son positivos, podrán iniciar un proceso en el cual se pueda reemplazar el material granular No. 4 por material PET reciclado, lo que permitirá construir pavimentos de mejor calidad y rendimiento, disminuyendo los costos, pues el valor del PET estaría por debajo del valor de los materiales granulares que se quieren reemplazar. Adicional a esto, se estaría incentivando el nacimiento de una nueva industria dedicada al reciclaje y procesamiento de botellas PET para ser convertidas en materiales estabilizante para pavimentos, brindando oportunidades de desarrollo sostenible en el sector de la construcción.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcance. El alcance de la presente investigación será el siguiente:

- Presentar resultados de la caracterización de la base granular para corroborar que cumplan con los requisitos de la tabla 2 del artículo INV 351 bases tratadas con cemento.
- Realizar pruebas de laboratorio a 24 cilindros de base estabilizada con cemento al 3%, 4% y 5% según sistema de clasificación AASHTO y PCA y, ésta adicionada con material PET reciclado 2%, 4% y 6% aplicando lo establecido en la norma INV E 614- 13 resistencia a la comprensión de cilindros moldeados de suelo cemento.
- Informe de resultados de los ensayos en donde se compare y analice el comportamiento de la resistencia de la base estabilizada con cemento, para determinar si el material reciclable PET triturado, es útil para ser usado como estabilizante en pavimentos asfálticos.

1.5.2 Limitaciones. Las posibles limitaciones para el desarrollo del proyecto son las siguientes:

- Dificultad en la disponibilidad y utilización de los equipos requeridos (máquina de los ángeles, sulfato de sodio, sulfato de magnesio) para realizar los ensayos.
- Dificultad en el transporte del material requerido desde la fuente de origen hasta la universidad, para realizar los ensayos (base BTC 24 NT3 clase A).
- Financiación del presupuesto requerido para la realización de la investigación.
- Falta de información de referencia, respecto al empleo de material reciclado PET en la estabilización de bases granulares, por lo tanto será necesario comprobar su comportamiento fisicomecánico con pruebas de laboratorio INVIAS.

1.6 MARCO DE REFERENCIA

1.6.1 Marco Teórico

1.6.1.1 Pavimentos Flexibles. Los pavimentos flexibles son estructuras cuya superficie de rodamiento se construye con mezclas asfálticas (combinación de asfalto y agregado pétreo con granulometría variada en función de las necesidades del proyecto), además “están conformados por una carpeta bituminosa apoyada generalmente sobre dos capas no rígidas, la base y la subbase. No obstante puede prescindirse de cualquiera de estas capas dependiendo de las necesidades particulares de cada obra”¹⁴ (véase la Figura 1).

Figura 1. Pavimento Flexible



Fuente. RAMÍREZ, Fernanda. Pavimento flexible y rígido [en línea]. Bogotá: Slideshare [citado 1 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <<https://es.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>>

Para la estructura del pavimento flexible, “los módulos de rigidez de cada capa varían en función del material empleado para su construcción y el proceso constructivo con que sea colocado, sin olvidar que siempre se debe incrementar el módulo de rigidez conforme la capa sea más próxima a la superficie de rodamiento, pues en la superficie se presentan los esfuerzos de mayor intensidad”¹⁵. A continuación, se muestran los valores del módulo de elasticidad recomendados para los materiales que se emplean en las diferentes capas del pavimento, según la guía AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Officials) (véase el Cuadro 1).

Cuadro 1. Módulo de Elasticidad Tipo de las Diferentes Capas del Pavimento

Material	Módulo de Rigidez (psi)
Concreto asfáltico	400.000
Base granular	30.000
Subbase granular	11.000

Fuente. FLORES LOZA, Gilberto. Efecto de fatiga en un material de base estabilizada con cemento (Pavimento flexible). México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil. Trabajo de maestría, 2011. p. 20.

¹⁴ MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería para pavimentos para carretera. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002. p. 2

¹⁵ FLORES LOZA, Op. Cit., p. 24

1.6.1.2 Características de los pavimentos flexibles. Este tipo de pavimentos presenta las características principales:

- **Resistencia estructural.** Debe soportar las cargas impuestas por el tránsito que producen esfuerzos normales y cortantes en la estructura.
- **Durabilidad.** La durabilidad está ligada a factores económicos y sociales. La durabilidad que se le desee dar al camino, depende de la importancia de este.
- **Requerimientos de conservación.** Los factores climáticos influyen de gran manera en la vida de un pavimento. Otro factor es la intensidad del tránsito, ya que se tiene que prever el crecimiento futuro. Se debe de tomar en cuenta el comportamiento futuro de las terracerías, deformaciones y derrumbes. La degradación estructural de los materiales por carga repetida es otro aspecto que no se puede dejar de lado. La falta de conservación sistemática hace que la vida de un pavimento se acorte.
- **Comodidad.** Para grandes autopistas y caminos, los métodos de diseño se ven afectados por la comodidad que el usuario requiere para transitar a la velocidad de proyecto¹⁶.

1.6.1.3 Asfalto. El asfalto es un componente natural de la mayor parte de los petróleos, en los que existe en disolución. El petróleo crudo se destila para separar sus diversas fracciones y recuperar el asfalto. De acuerdo con el Instituto de Asfalto:

Es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controla bien a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación¹⁷.

1.6.1.4 Cemento. El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, es un material inorgánico o mineral que, se pulveriza finamente y luego se amasa con agua para formar una pasta, que se endurece gracias por la aplicación de reacciones y procesos de hidratación, fraguado, permitiendo que se mantenga su resistencia y estabilidad. Dosificado y mezclado adecuadamente con agua y áridos es capaz de producir un mortero que conserve durante un tiempo suficientemente largo su trabajabilidad, para alcanzar, al cabo de periodos definidos, los niveles de resistencia fijados y una duradera estabilidad de volumen.

¹⁶ SÁNCHEZ RIVERA, Sergio Enrique. Ampliación y reconstrucción de la carretera federal México-Puebla de la ciudad de Cholula a Santa María Zacatepec, km. 98+300 al km. 103+300 [en línea]. México: Universidad de las Américas Puebla [citado 29 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/sanchez_r_se/capitulo2.pdf >

¹⁷ THE ASPHALT INSTITUTE. Asphalt Manual. Lexington: Engineering Research, 2007. p.28

“Los cementos están formados por pequeños granos individuales de diferentes materiales pero, en composición, estadísticamente homogéneos. Obtiene un alto grado de regularidad en todas sus propiedades por medio de un proceso de producción continua en masa, especialmente por una molienda y homogeneización adecuados”¹⁸.

1.6.1.5 Cal. La cal es “un material con propiedades químicas muy específicas que varían en función de varios estados físicos que puede alcanzar al ser manipulada. Su origen está en las piedras calizas que son piedras de origen sedimentario que están compuestas mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3)”¹⁹. En el sector de la construcción se usa como medio de ofrecer resistencia, durabilidad y buena apariencia a estructuras como edificios, mediante su incorporación a morteros, usados en el recubrimiento de muros y cubiertas, también para pintar y decorar superficies, o como impermeabilizante para azoteas,

1.6.1.6 Ceniza Volante. De acuerdo con Hansen “Consiste en sustancias vítreas de silicato de aluminio aluminio-ferroso que están parcialmente presentes en la ceniza, en forma de partículas esféricas, cuya granulometría va desde un tamaño infinitesimal hasta 1 mm. Presenta cualidades puzolánicas, es decir, presenta reacción con el hidróxido de calcio para formar aglomerantes”²⁰. Éstas además se emplean en la fabricación de clínker de cemento, al añadirse a la mezcla cruda para hornos de vía seca. Por otro lado cuando las cenizas volantes tienen alto contenido de carbón que no se haya quemado, son insufladas interiormente de la zona de cocción del horno o en el precalcinador obteniéndose una ventaja del valor térmico. Las cenizas volantes se emplean también en la producción de áridos artificiales.

1.6.1.7 Bases. Es la capa que se encuentra bajo la capa de rodadura de un pavimento asfáltico. Debido a su proximidad con la superficie, debe poseer alta resistencia a la deformación, para soportar las altas presiones que recibe. Se construye con materiales granulares procesados o estabilizados y, eventualmente, con algunos materiales marginales.

1.6.1.8 Base Granular. La base la capa de la estructura de pavimento que por lo general subyace a la carpeta asfáltica en un pavimento flexible, a la losa de concreto en uno de rígido y a la capa estabilizada con cementante hidráulico en uno semirrígido. Esta capa escá compuesga por materiales granulares no tratados colocados sobre la subbase. La función principal de esta capa en

¹⁸ TECNOLOGÍA CLASS. Cemento [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://technologyclass.wikispaces.com/file/view/EL+CEMENTO.pdf>>

¹⁹ MISSIONS ARIZONA. El uso de la cal [en línea]. México: [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://missions.arizona.edu/sites/default/files/5%20Soria%20-%20Use%20of%20Lime.pdf>>

²⁰ HANSEN, Richard W. Cenizas volantes [en línea]. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Cenizas%20Volantes/Cenizas%20volantes.pdf>>

pavimentos flexibles es transmitir las cargas impuestas por el tránsito con intensidades adecuadas a las capas subyacentes. Adicionalmente, contribuye al drenaje y facilita los procesos constructivos.

Según el art. 330-13 de Invias, la base granular de acuerdo a la función de la calidad se clasifica en 3 clases A, B y C, ésta se definirá de acuerdo al proyecto, al igual que la granulometría a utilizarse. Igualmente, los agregados para la base granular deben cumplir los requisitos indicados en el Cuadro 2, además de ajustarse a alguna de las franjas granulométricas que se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Requisitos de los Agregados para Bases Granulares

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	BASE GRANULAR		
		CLASE C	CLASE B	CLASE A
Dureza (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%)	E-218	40	40	35
- 500 revoluciones		8	8	7
- 100 revoluciones				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	-	30	25
Evaluación de la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos	E-224	-	70	90
- Valor en seco, mínimo (kN)		-	75	75
- Relación húmedo/seco, mínimo (%)		-		
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)	E-220	12	12	12
- Sulfato de sodio		18	18	18
- Sulfato de magnesio				
Limpieza (F)				
Límite líquido, máximo (%)	E-125	25	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	3	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	E-211	2	2	2
Geometría de las Partículas (F)				
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	35	35	35
Caras fracturadas, mínimo (%)	E-227	50	70	100
- Una cara		-	50	70
- Dos caras				
Angularidad de la fracción fina, mínimo (%)	E-239	-	35	35
Resistencia del material (F)				
CBR (%): porcentaje asociado al grado de compactación mínimo especificado (numeral 330.5.2.2.2); el CBR se medirá sobre muestras sometidas previamente a cuatro días de inmersión.	E-148	≥ 80	≥ 80	≥ 95

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 330 – 13. Base granular tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 330-2

Cuadro 3. Franjas Granulométricas del Material de Base Granular

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	1 ½"	1"	¾"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
% PASA								
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN GRUESA								
BG-40	100	75-100	65-90	45-68	30-50	15-32	7-20	0-9
BG-27	-	100	75-100	52-78	35-59	20-40	8-22	0-9
BASES GRANULARES DE GRADACIÓN FINA								
BG-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	5-15
BG-25	-	100	70-100	50-80	35-65	20-45	10-30	5-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	7 %			6 %		3 %	

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 330 – 13. Base granular tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 330-3

En un pavimento flexible el espesor compacto de esta capa oscila entre 10 y 30 cm. En Colombia el INVIAS clasifica las bases granulares como BG-25, BG-27, BG38 Y BG-40. El número indica el tamaño máximo de partícula del agregado pétreo en mm²¹, los requisitos mínimos de calidad que deben cumplir los agregados pétreos que conforman la capa de BG se presentan a continuación:

Cuadro 4. Granulometría para Bases Granulares no Tratadas

Tamiz		Porcentaje que pasa			
		Gradación fina		Gradación gruesa	
		BG-38	BG-25	BG-40	BG-27
1 ½"	37.5 mm	100	-	100	-
1"	25 mm	70-100	100	75-100	100
¾"	19 mm	60-90	70-100	65-90	75-100
3/8"	9.5 mm	45-75	50-80	45-68	52-78
No. 4	4.75 mm	30-60	35-65	30-50	35-59
No. 40	2.0 mm	20-45	20-45	15-32	20-40
No. 80	0.425 mm	10-30	10-30	7-20	8-22
No. 200	0.075 mm	5-15	5-15	0-9	0-9

*La relación entre el porcentaje que pasa al tamiz No. 200 y el porcentaje que pasa el tamiz No. 40 no deberá exceder de 2/3, y el tamaño máximo nominal no deberá exceder de 1/3 del espesor de la capa compactada (Invias, 2013).

Fuente. RONDON QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá: ECO, 2015. p. 338

► **Base estabilizada.** Según la Federal Highway Administration (FHWA) (Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos), el término base estabilizada, se refiere a materiales de pavimentación que corresponde a mezclas de una o más fuentes de material granular, cemento y una cantidad suficiente de

²¹ RONDÓN QUINTANA y REYES LIZCANO, Op. Cit., p. 339

agua; dando como resultado materiales húmedos, cuya consistencia es no plástica, y que pueden ser compactados para formar una masa densa y ganar fuerza resistencia. El propósito de una capa estabilizada de base es proporcionar un estado que soporte la carga entre la capa de pavimento, que recibe directamente las cargas de la rueda del tráfico vehicular, y el suelo subyacente, igualmente se puede usar para proporcionar soporte para pavimentos flexibles o rígidos, pero se utilizan con mayor frecuencia en pavimentos flexibles²².

La estabilización se obtiene agregando un producto cementante que comúnmente está encaminado a generar reacciones químicas en el material para incrementar su resistencia al corte, por lo cual “se deberá evaluar el comportamiento mecánico del material a estabilizar para determinar la factibilidad de adicionar el cementante. Las pruebas a realizar para establecer si es propicio el material, serán a través de la medición de su rigidez, y pruebas encaminadas a conocer la pérdida de estabilidad por saturación, conforme a la normatividad de la S.C.T.”²³

Las proporciones de mezcla para una base estabilizada apropiadamente diseñada se determinan en el laboratorio durante las pruebas del diseño de mezcla. Una base estabilizada bien diseñada debe estar debidamente compactada y debe ser capaz de desarrollar suficiente resistencia y durabilidad para cumplir o exceder los criterios de diseño. Por tanto, deben evaluarse las siguientes propiedades en las bases estabilizadas correctamente:

- Resistencia a la compresión : se refiere a la capacidad de una mezcla de base estabilizada bien compactada que desarrolle un nivel mínimo especificado de resistencia a la compresión no confinada, bajo condiciones de curado especificadas.
- Durabilidad: esto se refiere a la capacidad de una mezcla de base estabilizada bien compactada para resistir los efectos de deterioro de la congelación y descongelación cíclica, y / o mojado y secado, una vez que el material ha alcanzado su resistencia de diseño.
- Densidad máxima en seco: la densidad máxima o el peso unitario compactado de una mezcla de base estabilizada que se ha compactado o muy cerca del contenido de humedad óptimo utilizando procedimientos de compactación de laboratorio prescritos.
- Humedad óptima: el contenido de humedad en el que se alcanza la máxima densidad en seco de una mezcla base estabilizada en el laboratorio utilizando procedimientos de compactación prescritos.

²² FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction [en línea]. New Jersey: Department of Transportation [citado 4 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/app5.cfm>>

²³ FLORES LOZA, Op. Cit., p. 34

- Densidad compactada: la densidad real de una base estabilizada que se ha compactado en el campo de acuerdo con las especificaciones del proyecto.
- Estabilidad Volumétrica: esto se refiere a la capacidad de una base estabilizada bien compactado para mantener sus dimensiones volumétricas y resistir reacciones químicas potencialmente expansivas después de la colocación y compactación.
- Módulo Resiliente: esta propiedad define la relación entre la tensión axial repetida aplicada a un material de base y la respuesta de deformación del material y se puede usar en un diseño de pavimento multicapa²⁴.

Por otro lado, el Departamento de transporte de Estados Unidos, expone que los mecanismos de estabilización pueden dividirse en dos grandes áreas: mecánica y química. La estabilización mecánica incluye compactación, mezcla de agregados para mejorar la gradación y adición de cemento asfáltico. El cemento asfáltico no reacciona químicamente con los materiales que se estabilizan, pero recubre las partículas e imparte adhesión y ayuda a la impermeabilización. La estabilización química incluye la adición de materiales tales como cal, cemento o ceniza volante en combinación o solo. Estos materiales reaccionan químicamente con el material que se está estabilizando o reaccionan solos para formar compuestos de cementación²⁵.

La compactación, es la primera forma de estabilización, mejora la resistencia y reduce la permeabilidad. Otra forma de estabilización mecánica consiste en mezclar los agregados con el suelo natural. Al cambiar la gradación del material in situ con material adicional, se pueden obtener mejoras en la capacidad de compactar el suelo a niveles apropiados. También puede obtenerse una reducción en la susceptibilidad del material a la humedad y puede resultar una resistencia y un rendimiento mejorados. A continuación se describen los tipos de estabilización para sueños y capas granulares, así como los tipos de estabilizantes para bases.

1.6.1.8 Tipos de Estabilización de Suelos y Capas Granulares. Las capas granulares en ocasiones requieren ser estabilizadas con determinado material, para lo cual se usan técnicas que “básicamente pueden ser mecánicas, mezclando dos o más suelos o gravas de características complementarias, o emplear diversos aditivos (cal y cemento principalmente) que actúan física y/o químicamente sobre las propiedades del material a mejorar”²⁶. El propósito de la

²⁴ AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures. Washington: AASHTO, 1993

²⁵ U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Stabilized Base Courses for Advanced Pavement Design Report 1: Literature Review and Field Performance Data [en línea]. Virginia: National Technical Information Service (NTIS) [citado 3 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance_hf/library/documents/media/human_factors_maintenance/courses.pdf>

²⁶ BAÑON BLÁZQUEZ, Luis. Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento. Provincia de Alicante: Universidad de Alicante, 2000. p. 22-17

estabilización es aumentar la resistencia mecánica, asegurándose que las condiciones de humedad varíen dentro de unos rangos reducidos, para tener una estabilidad adecuada a las cargas, así como una variación volumétrica reducida, aumentando la durabilidad de la capa. De acuerdo a lo anterior, los tipos de estabilización son:

➤ **Estabilización Mecánica.** Es una técnica de mejora basada en la mezcla de diversos materiales con propiedades complementarias, de forma que se obtenga un nuevo material de mayor calidad y que cumpla las exigencias deseadas. Las propiedades que se mejoran son la plasticidad y/o la granulometría; la primera afecta a la susceptibilidad del material al agua y su capacidad drenante; la segunda incide sobre su resistencia, trabajabilidad y compactación final.

➤ **Estabilización in situ con cal.** La utilización de este material permiten mejorar las propiedades de resistencia a compresión a largo plazo, así mismo la reducción del índice de plasticidad (IP), aumentando además la humedad óptima de compactación. Finalmente la cal aumenta la trabajabilidad al volverse más disgregable y granular.

➤ **Estabilización con cemento (suelocemento).** Con ésta se mejora la resistencia mecánica, al volver más rígida la estructura interna y conferir una mayor capacidad portante al suelo, llegándose a alcanzar resistencias a los 7 días de 20 a 50 kp/cm²; genera una insensibilidad al agua impidiendo el lavado de finos, evitando fenómenos de pumping o soplado. Asimismo mejora la resistencia a la helada y aumenta la durabilidad del firme. Finalmente, permite una reducción de la plasticidad, mejorando considerablemente las propiedades reológicas del suelo, aunque puede dotarlo de una rigidez excesiva en ciertos casos²⁷.

1.6.1.9 Bases tratadas con cemento. Las bases tratadas con cemento, son el producto de realizar una combinación de suelos finos y/o granulares, cemento y agua compactados y curados para conseguir propiedades mecánicas específicas. Estos materiales se mezclan en proporciones de acuerdo a una dosificación racional, y que se ejecuta teniendo en cuenta las normas aplicables al suelo,

Al respecto, en Colombia la norma que regula el uso de bases tratadas con cemento es el artículo 351 – 13, según el cual ésta debe ser constituida por “una mezcla uniforme de agregados pétreos, cemento hidráulico, agua y eventualmente aditivos”²⁸; al respecto, el cemento hidráulico, es un producto que se obtiene de la pulverización del clinker que forma una mezcla uniforme, “consistiendo esencialmente en silicatos de calcio hidratados que generalmente puede contener

²⁷ BAÑÓN, Luis y BEVIÁ, José. Manual de carreteras [en línea]. Alicante: Univesidad de Alicante [citado 12 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1787/1/MC_Tomo_2.pdf>

²⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 351 – 13. Base tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p.351-1

adiciones de sulfato de calcio”²⁹.

Por otro lado, y según el Art. 351-13 en función a la calidad, se tienen dos clases de agregados para la base trata con cemento, la base Clase A para un nivel de tránsito NT2 y base Clase B para un nivel de tránsito NT3, la escogencia de una de las dos dependerá del proyecto a realizarse o en función del nivel de tránsito. En cuanto a los requisitos de calidad de los agregados, éstos deben estar libres de materia orgánica o cualquier sustancia que perjudique el correcto fraguado del cemento, además de cumplir con los requisitos que se indican a continuación (véase el Cuadro

Cuadro 5. Requisitos de los Agregados para Base de Tratada con Cemento

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	CLASE DE AGREGADO	
		CLASE B	CLASE A
Dureza (O)			
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), máximo (%)	E-218	40	35
- 500 revoluciones		8	7
- 100 revoluciones			
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	30	25
Resistencia mecánica por el método del 10 % de finos			
- Valor en seco, mínimo (kN)	E-224	70	90
- Relación húmedo/seco, mínimo (%)		75	75
Durabilidad (O)			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%)			
- Sulfato de sodio	E-220	12	12
- Sulfato de magnesio		18	18
Limpieza (F)			
Límite líquido, máximo (%)	E-125	-	-
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	0	0
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	30	30
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10
Contenido de materia orgánica, máximo (%)	E-121	1	1
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2
Geometría de las partículas (F)			
Índices de alargamiento y aplanamiento, máximo (%)	E-230	-	35
Caras fracturadas (una cara), mínimo (%)	E-227	50	60
Resistencia del material (F)			
CBR para una compactación del 95 % del ensayo modificado de compactación (norma INV E-142), medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo (%)	E-148	60	80
Características químicas (O)			
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO_4^{2-} , máximo (%)	E-233	0.5	
Reactividad álcali - agregado: Concentración SiO_2 y reducción de alcalinidad R	E-234	$SiO_2 \leq R$ cuando $R \geq 70$ $SiO_2 \leq 35 + 0.5R$ cuando $R < 70$	

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 351 – 13. Base tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 351-2

²⁹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 501 – 13. Suministro de cemento hidráulico. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 501-1

De igual manera, la base tratada con cemento debe ajustarse a las siguientes franjas granulométricas (véase el Cuadro 5).

Cuadro 6. Requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento

TIPO DE GRADACIÓN	TAMIZ (mm / U.S. Standard)							
	37.5 1 ½"	25.0 1"	19.0 ¾"	9.5 ¾"	4.75 No. 4	2.00 No. 10	0.425 No. 40	0.075 No. 200
	% PASA							
BTC-38	100	70-100	60-90	45-75	30-60	20-45	10-30	2-15
BTC-25	-	100	70-100	50-80	35-65	25-50	15-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0 %	6 %		3 %			1.5 %	

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 351 – 13. Base tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 351-3

➤ **Especificaciones de la base tratada con cemento según la PCA.** Según La Portland Cement Association (PCA), la base tratada con cemento, tiene como propósito formar un material de pavimento durable, es usada como base de estructuras de pavimentos, la cual es requerida como capa de rodadura, sus propiedades estructurales dependen de “los agregados, así como del contenido de cemento, de las condiciones de compactación, curado y de la edad. Son usuales valores de resistencia a la compresión de 3 a 6 MPa, módulo de rotura de 0,7 a 1 MPa y de módulo de elasticidad de 7.000 a 14.000 MPa³⁰. La edad hace una diferencia porque el cemento continuará hidratándose con el tiempo, lo que aumentará la fuerza.

A continuación se puede observar los rangos generales para la resistencia a la compresión, el módulo de ruptura, el módulo de elasticidad y la relación de Poissin establecidos por la PCA (véase el Cuadro 6).

Cuadro 7. Propiedades de la Base Tratada con Cemento Según la PCA

Propiedades	Valor de 7 días
Fuerza compresiva	300 – 800 psi (2.1 – 5.5 MPa)
Módulo de ruptura (resistencia a la flexión)	100 – 200 psi (0.7 – 1.4 MPa)
Módulo de elasticidad	600,000 – 1,000.000 psi (4,100 – 6,900 MPa)
El coeficiente de Poisson	0.15

Fuente. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). Guide to cement – based integrated pavement solutions. Iowa: Institute for transportation, 2011. p. 6-3

³⁰ QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. Estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos. Panamá: Federación Interamericana De Cemento, 2007. p. 16

En cuanto a los requisitos granulométricos la PCA estipula que deben ser T_{max} 50mm (2”). Así mismo, los requerimientos mínimos de resistencia a la compresión (curado húmedo) la PCA indica los siguientes:

Cuadro 8. Resistencias Mínima a la Compresión Simple PCA

Tipo de suelo	Resistencias mínima a la compresión simple (kg/cm ²)	
	7 días	28 días
Suelos arenosos y gravas	21.09 – 42.18	28.12 – 70.30
Suelo limosos	17.57 – 35.15	21.09 – 63.27
Suelos arcillosos	14.06 – 28.12	17.57 – 42.18

Fuente. QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. Estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos. Panamá: Federación Interamericana De Cemento, 2007. p. 24

Cabe mencionar que la resistencia a la compresión simple aumenta considerablemente con el tiempo, aumentando en 90 días de una a tres veces más que a los 7 días.

Adicionalmente, la PCA sugiere en el momento del diseño de la mezcla tener un contenido inicial de cemento, teniendo en cuenta además la clasificación del suelo, el cual será:

Cuadro 9. Contenido inicial del cemento en el diseño de la mezcla

Contenido de cemento inicial % en peso	MÉTODO PCA
5	GW, GP, GM
6	SW, SP, SM GM, GP, SM, SP
7	GM, GC, MS, SC
9	SP
10	CL, ML, MH, CH
11	--
12	CL, CH
13	MH, CH

Fuente. QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Carlos Antonio. Estado del arte del suelo cemento en estructuras de pavimentos. Panamá: Federación Interamericana De Cemento, 2007. p. 31

1.6.1.10 Suelo Cemento (Artículo 350 – 13 INVIAS). “El suelo cemento es un material elaborado a partir de una mezcla de suelos finos y/o granulares, cemento y agua, la cual se compacta y se cura para formar un material endurecido con

propiedades mecánicas específicas³¹, generalmente el contenido del cemento por su peso es de 3 a 7% de materiales secos y a largo plazo; mientras que su resistencia a la compresión suele ser superior a 4MPa.

En Colombia se definen dos clases de suelo-cemento en función de los criterios del diseño de la mezcla, de acuerdo al art. 350 – 13 del INVIAS, los cuales son:

Cuadro 10. Clases de Suelo Cemento

CLASE DE SUELO-CEMENTO	SC-D	SC-R
Criterios de diseño de la mezcla Numeral 350.4.1.1	Durabilidad	Durabilidad y Resistencia

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 350 – 13. Suelo – cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 350-1

Así mismo, el suelo cemento debe cumplir con los requisitos general que se muestra a continuación (véase el Cuadro 9), además de ajustarse a alguna de las franjas granulométricas establecidas en la norma (véase el Cuadro 10).

Cuadro 11. Requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	GRADACIÓN TIPO A	GRADACIÓN TIPO B
Composición (F)			
- Granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar.	E-123	Tabla 350 - 3	
- Tamaño máximo, fracción máxima del espesor de la capa compactada		1/2	
Limpieza (F)			
Límite líquido, % máximo	E-125	30	35 (Nota 1)
Índice de plasticidad, % máximo	E-125 y E-126	12	15 (Nota 1)
Contenido de materia orgánica, % máximo	E-121	1.0	
Características químicas (O)			
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO_4^{2-} , % máximo	E-233	0.5	
Reactividad álcali - agregado: Concentración SiO_2 y reducción de alcalinidad R	E-234	$SiO_2 \leq R$ cuando $R \geq 70$ $SiO_2 \leq 35 + 0.5R$ cuando $R < 70$	

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 350 – 13. Suelo – cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 350-2

³¹ QUINTANILLA RODRÍGUEZ, Op. Cit., p. 15

Cuadro 12. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento

TIPO DE GRADACIÓN		TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
		50.0	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
		% PASA								
Tipo A	A-50	100	70-100	60-100	50-90	40-80	30-70	20-55	10-40	2-20
	A-25	-	-	100	70-100	60-100	50-85	40-70	20-45	2-25
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		0 %	7 %				6 %			3 %
Tipo B	B-50-1	100	-	-	-	-	40-80	-	-	2-35
	B-50-2	100	-	-	-	-	60-100	-	-	0-50
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		0 %	-				8 %			5 %

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 350 – 13. Suelo – cemento. Bogotá: INVIAS, 2013. p. 350-2

1.6.1.11 Tereftalato de polietileno (PET). El PET “es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado. Es extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas. pertenece al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres”³².

1.6.1.12 Propiedades. El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química.

Existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y los de mayor peso molecular, grado ingeniería.

Este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas. Su punto de fusión es alto, lo que facilita su planchado, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos.

³² QUIMINET. Todo lo que quería saber del PET [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 11 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro> +3089010>

El PET presenta las siguientes propiedades:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Biorientable
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / performance.
- Liviano³³.

1.6.1.13 Utilización del PET en la Ingeniería Civil. Debido a la problemática que representa el exceso de los residuos de PET a nivel mundial, se han creado soluciones perspicaces para la reutilización y reciclaje de estos productos. Muchas de estas soluciones son prácticas relacionadas con la ingeniería civil, específicamente con la construcción.

➤ **Construcción de Viviendas.** Una de las aplicaciones que se les ha dado a los envases de PET es en la construcción de viviendas de bajo costo con resultados realmente favorecedores. Estas construcciones representan un sistema innovador que optimiza la utilización de recursos disponibles obteniendo estructuras resistentes, duraderas y económicas. El sistema constructivo con base en botellas desechables de PET, permite ahorrar hasta el 50% en materiales, si se compara con la construcción tradicional, logrando con ello ser una solución muy útil para poblaciones en estado de pobreza.

➤ **Concreto polimérico PET.** A través de la descomposición química del PET se obtiene poliéster insaturado el cual, mediante entrecruzamiento, forma una especie de red tridimensional resultando una estructura interconectada, amplia y muy fuerte. Si esta matriz es llenada con arena y grava, el producto resultante es un concreto polimérico, ya que la pasta de agua-cemento es sustituida por el polímero obtenido del reciclado del tereftalato de polietileno.

➤ **Ladrillos.** El Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE), en Argentina, es una asociación civil que se dedica a investigar y desarrollar modelos habitacionales asequibles. Entre las patentes que han realizado se encuentran los

³³ BLOG TECNOLOGÍAS DE PLÁSTICOS. PET [en línea]. Bogotá: Blogspot [citado 11 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro+> 3089010>

ladrillos y paneles hechos mediante el reciclado del tereftalato de polietileno. Los ladrillos hechos con base en la molienda del PET no requieren hornos para su secado evitando así contaminantes por el uso de combustible en hornos. El PET se utiliza como reemplazo de la arena en la creación del concreto.

➤ **Paneles.** Las cáscaras de cacahuates, utilizadas como materia prima y combinadas con resina poliéster obtenida del reciclaje de envases de PET, brindan una alternativa para fabricar paneles livianos y aislantes, cuya aplicación puede ser dada en cielorrasos. Las características fundamentales de este material están dadas por su bajo peso y buena capacidad de aislación térmica. En consecuencia, su aplicación es muy pertinente para el acondicionamiento de viviendas³⁴.

1.6.2 Marco conceptual.

➤ **Estabilidad volumétrica.** “Se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambios de humedad, relacionado esto con variaciones estacionales o con la actividad del ingeniero. La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para estos suelos, diferente al uso de cargas, capas permeables, introducción de agua, etc. Se trata de transformar la masa de arcilla expansiva bien sea en una masa rígida o en una granulada, con sus partículas unidas por lazos suficientemente fuertes para resistir presiones internas de expansión”³⁵.

➤ **Resistencia.** Es el mínimo esfuerzo compresivo necesario para romper una muestra no confinada de suelo. “La propiedad de los suelos para soportar cargas y conservar su estabilidad, depende de la resistencia al corte de los suelos. La resistencia equivale, a su vez, a la suma de los valores de la cohesión y el ángulo de rozamiento de un suelo, que no son parámetros constantes del suelo, pero si coeficientes empíricos que pueden variar en largos intervalos para un mismo suelo según las condiciones de pre compresión, drenaje y otras variables”³⁶.

➤ **Permeabilidad.** Permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire, mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Muchos factores afectan a la permeabilidad del suelo, en ocasiones, se trata de factores en extremo localizados, como fisuras y cárcavas, y es difícil hallar valores representativos de la permeabilidad a partir de mediciones reales. Un estudio serio de los perfiles de suelo proporciona una indispensable comprobación de dichas

³⁴ MUÑOZ PÉREZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad De Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p. 23

³⁵ RICO RODRÍGUEZ, A., y DEL CASTILLO, H. La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Bogotá: Arcos de Belén, 1974

³⁶ BUSTOS ORTIZ, Daniel Fernando y SARMIENTO SALAZAR, Jhonatan Leonardo. Análisis del comportamiento de base granular estabilizada con cemento sustituyendo con material no biodegradable tereftalato de polietileno (PET) en la fracción del agregado que pasa el tamiz #4 y se retiene en el #16. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2016, p. 14

mediciones³⁷. Las observaciones sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, la disposición por capas, los poros visibles y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre y la capa de arcilla, constituyen la base para decidir si es probable que las mediciones de la permeabilidad sean representativas.

➤ **Compresibilidad.** “La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización que existen influyen significativamente en el desempeño del material analizado”³⁸.

➤ **Durabilidad.** Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico; de esta manera, los problemas de durabilidad en las vías terrestres suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento. “En rigor, estos problemas pueden afectar tanto a suelos naturales como a los estabilizados, si bien en estos últimos los peores comportamientos suelen ser consecuencia de diseños inadecuados, tales como la mala elección del agente estabilizador o un serio en su uso, tal como podría ser el caso cuando se ignora la bien conocida susceptibilidad de los suelos arcillosos estabilizados con cemento a la presencia de sulfatos”³⁹.

➤ **Comportamiento del PET a altas temperaturas.** Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados centígrados. La temperatura máxima a la que el PET presenta resistencia es de 71 °C. El PET cristalizado (opaco) es una excepción ya que tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C⁴⁰.

La siguiente tabla resume el comportamiento que presenta el PET frente a la temperatura:

³⁷ RICO RODRÍGUEZ, A., y DEL CASTILLO, Op. Cit., p. 20

³⁸ *Ibid.*, p. 15

³⁹ *Ibid.*, p. 15

⁴⁰ MUÑOZ PÉREZ, Op. cit., p. 23

Cuadro 13. Comportamiento del PET Frente a la Temperatura

Concepto	Valor	Unidad
Punto de fusión	250/260	°C
Punto de ablandamiento según la prueba Vicat B	170	°C
Calor específico	1-04/1.05	kJ/(kg*K)
Coefficiente de expansión lineal	$>6.10^{-5}$	°C ⁻¹
Temperatura de transición vítrea	80	°C
Expansión térmica	70	E-6/K
Temperatura de servicio	-40/100	°C

Fuente. MUÑOZ PÉREZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad De Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p. 22

➤**Comportamiento frente a factores atmosféricos.** Este polímero no es afectado por ácidos ni gases, razón por la cual presenta buena resistencia a la intemperie. Aunque, cuando los envases tienen una exposición prolongada al aire libre pierden su tonicidad, se fragmentan y dispersan. Las botellas enterradas duran más.

La exposición que deben tener los envases en el exterior para presentar fragmentaciones no se conoce con exactitud. Según ensayos realizados en el Centro Experimental de la Vivienda Económica en Argentina, en donde placas y mampuestos fabricados con PET reciclado fueron dispuestos a la intemperie, el PET resultó ser un material con excelente resistencia a los efectos del ambiente. El resultado obtenido muestra que los elementos probados son resistentes a la acción de los rayos ultravioleta y a los ciclos de humedad, observándose una disminución de resistencia a la compresión posterior al envejecimiento del orden del 25 %⁴¹.

1.6.3 Normatividad aplicada. En Colombia en la elaboración de Bases estabilizadas se rige bajo los parámetros estipulados en las normas INVIAS, a continuación se presentan las normas que se tendrán en cuenta en el proyecto: Artículo 351 – 13. Base tratada con cemento

Artículo 501 – 13. Suministro de cemento hidráulico.

INV E- 213-13 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino.

INV E -180 Clasificación de suelos y de mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (SISTEMA AASHTO).

INV E-148-13CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.

⁴¹ Ibid., p. 23

INV E-238-13. Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval

INV E-211-13. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznableles en los agregados

INV E-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos

INV E-224-13 Determinación del valor del 10% de finos.

INV E-133-13. Equivalente de arena de suelos y agregados finos

INV E-230-13. Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras

INV E-126-13. Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos

INV E-227-13. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

INV E-218-13. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm por medio de la máquina de los Ángeles

INV E-220-13. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio

INV E-235-13. Valor de azul de metileno en agregados finos

INV E-614-13 Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.

1.7 METODOLOGÍA

1.7.1 Tipo de investigación. Se desarrollará una investigación experimental, en la cual se usan pruebas de laboratorio y principios encontrados en el método científico, para analizar eventos determinados. En este caso se realizarán ensayos de laboratorio en los cuales se adicionará una proporción de material PET triturado a una mezcla de base para pavimentos flexibles, con lo cual se podrá estudiar sus características de físicas y mecánicas como aditivo estabilizante, y cuyos resultados serán comparados con una muestra de la misma mezcla pero con adición de cemento y otra en su estado natural, es decir sin aditivos.

Así mismo, el tipo de estudio será mixto es decir “representan un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo

estudio”⁴², esto ya que se aplicará técnicas de recolección y análisis de la información de forma cuantitativa y cualitativa. El enfoque cuantitativo porque se realizará una medición numérica a la información recopilada, y, cualitativo por que se hará una revisión documental del tema de estudio.

1.7.2 Fuentes de información. Se incluyen las siguientes fuentes de información.

1.7.2.1 Fuentes Primarias. Normas INVIAS aplicables para el estudio de bases granulares estabilizadas, resultados ensayos de laboratorios.

1.7.2.2 Fuentes Secundarias. Se utilizarán documentos como manuales, guías, libros y trabajos de grado relacionados con el tema.

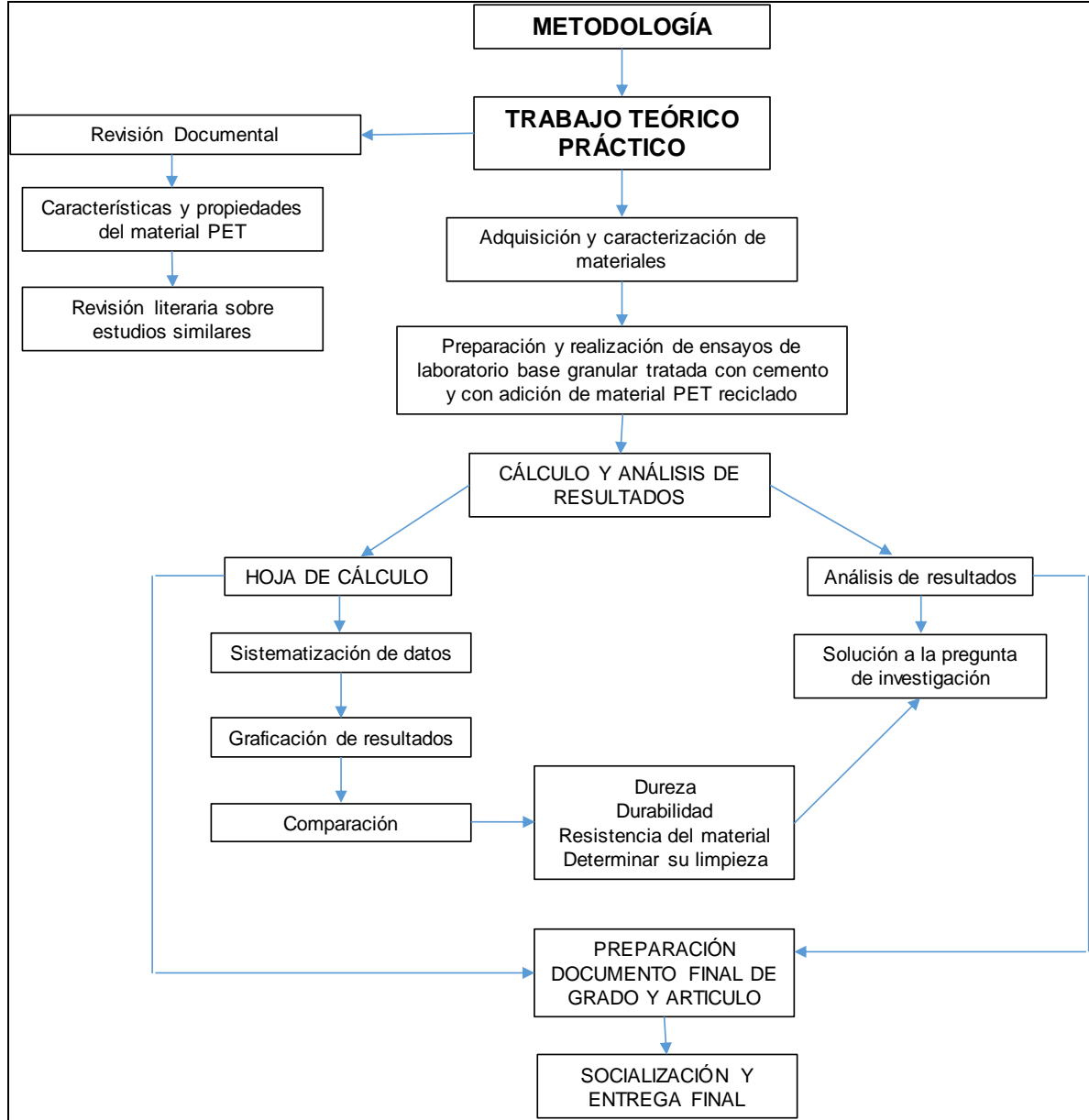
1.8 DISEÑO METODOLÓGICO

El trabajo se desarrollará en cuatro etapas principales, cada una de ellas con actividades específicas como se muestra a continuación:

Se pretende llegar a un modelo experimental, buscando aprender más sobre la estabilización de bases de suelo-cemento con PET como material reciclable, con el fin de analizar sus propiedades y modificarlo de acuerdo a esos cambios, y de esta forma, poderlo aplicar a estructuras de pavimentos en un futuro (véase la Figura 2)

⁴² Ibid., p. 546

Figura 2. Metodología Realización de la Investigación



Fuente. El Autor

1.8.1 Primera Etapa: Revisión documental para el proyecto. En esta etapa se llevará a cabo una revisión documental sobre materiales PET, indagando sobre conceptos generales, sus principales características fisicoquímicas. Así mismo se hará una revisión literaria sobre estudios e investigaciones que se han realizado similares al presente trabajo, y que servirán como punto de referencia para el desarrollo práctico.

1.8.2 Segunda Etapa: caracterización de materiales y realización de ensayos.

En esta etapa se llevaran a cabo las siguientes actividades:

- Adquisición, selección y caracterización de materiales a usar para cada ensayo, según los requerimientos estipulados en las normas INVIAS, estos materiales serán adquiridos en la cantera Concescol.
- Alistamiento y caracterización del cemento a usar según normas según los requerimientos estipulados en las normas INVIAS
- Alistamiento del material PET, el cual será reciclado y triturado manualmente por el autor para dejar partículas de #4.
- Realización de ensayos para caracterización de base granular.

1.8.3 Tercera Etapa: Cálculos y análisis de resultados. En esta etapa se realizará la clasificación física y mecánica de base tratada con cemento y la ésta adicionada con PET reciclado, esto para hacer la comparación de los resultados obtenidos y analizar la influencia del material en las propiedades de la mezcla, para finalmente determinar las ventajas de usar el material PET en la estabilización de bases para pavimentos, según proporciones utilizadas.

1.8.4 Cuarta Etapa: Desarrollo del informe final. En esta etapa se elaborará el documento final del trabajo realizado el cual incluirá la investigación teórica práctica realizada, laboratorios y las recomendaciones necesarias de la investigación. Así mismo se elaborará el artículo referente al trabajo realizado y la presentación para la divulgación de resultados.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO PET

2.1 GENERALIDADES DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO PET

2.1.1 Conceptos Básicos. El polietileno tereftalato (PET) es un poliéster de condensación que se produce mediante una reacción entre un di-ácido y un di-alcohol. Las principales materias primas para su producción son el di-metil tereftalato (DMT), ácido tereftálico (TPA) y etilén glicol (EG). De acuerdo con, el Ministerio de Ambiente, el PET está constituido de petróleo crudo, gas y aire, según investigaciones, “Un kilo de PET es 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene principalmente a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar el etilenglicol. La combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol produce como resultado el PET”⁴³.

De acuerdo con la Enciclopedia Británica El PET se produce por la polimerización de etilenglicol y ácido tereftálico. El etilenglicol es un líquido incoloro obtenido de etileno, y el ácido tereftálico es un sólido cristalino obtenido de xileno. Cuando se calientan juntos bajo la influencia de catalizadores químicos, etilenglicol y el ácido tereftálico produce PET en forma de una masa fundida y viscosa que puede hilarse directamente a las fibras o solidificarse para su posterior procesamiento como un plástico. En términos químicos, el etilenglicol es un diol, un alcohol con una estructura molecular que contiene dos grupos hidroxilo (OH), y el ácido tereftálico que es un ácido aromático dicarboxílico, un ácido con una estructura molecular que contiene un carbono grande de seis caras (o anillo aromático) y dos grupos carboxilo (CO - { 2 } H)⁴⁴.

Así mismo, bajo la influencia del calor y los catalizadores, los grupos hidroxilo y carboxilo reaccionan para formar grupos de éster (CO-O), que sirven como enlaces químicos que unen múltiples unidades de PET en polímeros de cadena larga. La presencia de un gran anillo aromático en las unidades de repetición de PET proporciona al polímero notable rigidez y resistencia, especialmente cuando las cadenas de polímero están alineadas entre sí en una disposición ordena.

Por otro lado, el PET es un polímero de alta producción con diversas aplicaciones, esto debido a su naturaleza semi- cristalina que puede variar de varía de amorfa a

⁴³ COLOMBIA. Ministerio de Ambiente Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía ambiental proceso básico para transformación de plástico [en línea]. Bogotá: El Ministerio [citado 24 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL:

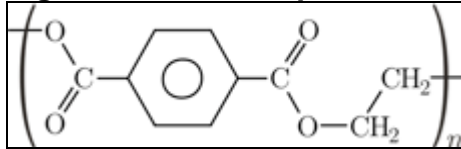
http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia_ambiental_proceso_basico_para_transf_plastico.pdf>

⁴⁴ ENCICLOPEDIA BRITÁNICA. Tereftalato De Polietileno PET [en línea]. Londres: La Enciclopedia [citado 20 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: https://www.britannica.com/science/polyethy_lene-terephthalate>

bastante cristalina, proporciona variedad de propiedades físicas y mecánicas, ajustándose a la elaboración de materias primas como fibras, películas, botellas y diferentes partes moldeadas, las cuales se convierten en productos finales como ropa, alfombras, empaques entre otros.

2.1.2 Estructura química. La resina PET es un poliéster termoplástico compuesto por cadenas de tereftalato de polietileno como se muestra en la Figura 1

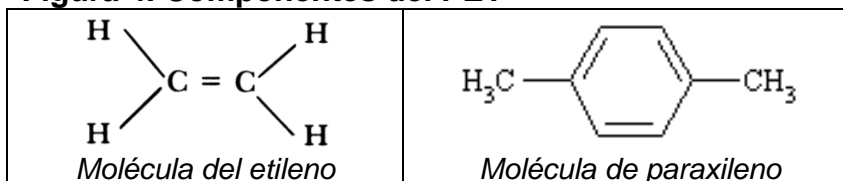
Figura 3. Unidad repetitiva de PET



Fuente. MUÑOZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (pet) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p.33

Se fabrica a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: el etileno ($\text{CH}_2 = \text{CH}_2$) y el paraxileno.

Figura 4. Componentes del PET

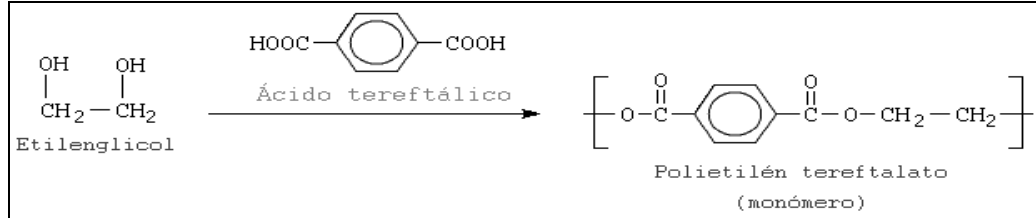


Fuente. MUÑOZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (pet) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p.33

El etileno se transforma en etilenglicol ($\text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$) y el paraxileno se utiliza para producir ácido tereftálico. Ambos productos se ponen a reaccionar a altas temperaturas y bajo condiciones especiales de presión para obtener la resina PET en estado sólido y amorfo. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo⁴⁵.

⁴⁵ MUÑOZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (pet) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p.33

Figura 5. Obtención del PET



Fuente. MUÑOZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (pet) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012. p.34

2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del PET. El PET es un material duro, rígido, resistente y dimensionalmente estable que absorbe muy poca agua. Sus propiedades le permiten ser una barrera a los gases, así mismo sus propiedades presentan mejoras a medida que el peso molecular aumenta. El PET presenta las siguientes propiedades y características:

2.1.3.1 Densidad. La densidad es la cantidad de materia que tienen los materiales plásticos por unidad de volumen. Influye en el peso de los productos plásticos y en la productividad de un proceso. La densidad es un factor económico que vuelve favorable la aplicación de un plástico sobre otro. El transformador compra kilogramos de material y vende unidades terminadas.

Amorfo 1.33 / 1.37 g/cm³
Semicristalino 1.45 / 1.51 g/cm³
Densidad aparente 0.85 g/cm³

2.1.3.2 Conductividad térmica. “La conductividad térmica es la cantidad de calor que transmiten los materiales plásticos a través de ellos. Con esta propiedad se conoce si el material tiene un buen aislamiento térmico, siendo mejores los que presentan valores bajos. El PET presenta un valor de conductividad térmica de 0.24 W/mK”⁴⁶.

2.1.3.3 Absorción de agua. “Es la cantidad de agua que los plásticos tienden a retener, reflejándose en un aumento de peso en la muestra, después de estar en contacto continuo con un ambiente húmedo. Es importante esta característica al fabricar las piezas, ya que a valores altos de absorción, los plásticos varían considerablemente sus dimensiones”⁴⁷.

⁴⁶ Ibíd., p. 35

⁴⁷ MADRIGAL GUZMÁN, José Fernando y SHASTRI, Ranganath. Manual de plásticos para diseñadores [en línea]. Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/Art%C3%ADculos/MANUALES/Manual%20de%20PI%C3%A1sticos%20para%20dise%C3%B1adores%20Shastri%20Corr%204.pdf>>

Absorción de agua ASTM 0.16 %
Absorción de agua 24 hr < 0.7 %
Absorción de agua al equilibrio 0.1 %

2.1.3.4 Permeabilidad. La permeabilidad que se mide en el envasado con plásticos es la cantidad de un determinado gas, generalmente oxígeno y vapor de agua (humedad) aunque con frecuencia también dióxido de carbono y nitrógeno, que traspasa el material por una determinada unidad de superficie, en un determinado tiempo y bajo unas determinadas condiciones. Cuanto menor es la permeabilidad a un gas, mayor es su barrera al mismo⁴⁸. El PET presenta muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.

La siguiente tabla muestra los valores de permeabilidad del PET.

Cuadro 14. Valor de Permeabilidad del PET

Oxígeno 23°C, 100% RF	2
Nitrógeno 23°C , 100% RF	9
Permeabilidad al vapor de agua	0.9
Dióxido de carbono	5.1

Fuente. MADRIGAL GUZMÁN, José Fernando y SHASTRI, Ranganath. Manual de plásticos para diseñadore [en línea]. Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/Art%C3%ADculos/MANUALES/Manual%20de%20PI%C3%A1sticos%20para%20dise%C3%B1adores%20Shastri%20Corr%204.pdf>>

2.1.3.5 Comportamiento frente a la temperatura. Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados centígrados. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. La temperatura máxima a la que el PET presenta resistencia es de 71 °C. El PET cristalizado (opaco) es una excepción ya que tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 °C⁴⁹.

Debido a que el PET tiene una temperatura de transición vítrea baja, los productos fabricados con dicho material no pueden calentarse para su esterilización y posterior reutilización, por lo que el PET reciclado sólo puede utilizarse en un bajo porcentaje en la fabricación de nuevos envases para alimentos y bebidas.

⁴⁸ MADRIGAL GUZMÁN, José Fernando y SHASTRI, Ranganath. Manual de plásticos para diseñadore [en línea]. Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/Art%C3%ADculos/MANUALES/Manual%20de%20PI%C3%A1sticos%20para%20dise%C3%B1adores%20Shastri%20Corr%204.pdf>>

⁴⁹ PÉREZ, Leonardo. Características Del PET (Poli Etiléno Tereftalato) [en línea]. Bogotá: Blogspot [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://reciclajesleonardo.com/2012/03/01/ caracteristicas-del-pet-poli-etileno-tereftalato/>>

La siguiente tabla resume el comportamiento que presenta el PET frente a la temperatura:

Cuadro 15. Comportamiento del PET frente a la Temperatura

CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Punto de fusión	250 / 260	°C
Punto de ablandamiento según la prueba Vicat B	170	°C
Calor específico	1.04 / 1.05	kJ/(kg*K)
Coefficiente de expansión lineal	$< 6 \cdot 10^{-5}$	°C ⁻¹
Temperatura de transición vítrea	80	°C
Expansión térmica	70	E-6/K
Temperatura de servicio	-40 / 100	°C

Fuente. PÉREZ, Leonardo. Características Del PET (Poli Etiléno Tereftalato) [en línea]. Bogotá: Blogspot [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://reciclajesleonardo.com/2012/03/01/caracteristicas-del-pet-poli-etileno-tereftalato/>>

2.1.3.6 Comportamiento frente a factores atmosféricos. Este polímero no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos por lo que presenta buena estabilidad a la intemperie. Sin embargo, cuando los envases tienen una exposición prolongada al aire libre pierden su tonicidad, se fragmentan y dispersan. Las botellas enterradas duran más.

Según ensayos realizados en el Centro Experimental de la Vivienda Económica en Argentina, en donde placas y mampuestos fabricados con PET reciclado fueron dispuestos a la intemperie, el PET resultó ser un material con excelente resistencia a los efectos del ambiente. Las placas y mampuestos estuvieron expuestos durante dos años, sometidos a la lluvia, al sol y a otras inclemencias del clima, sin presentar alteraciones dimensionales ni daños aparentes. Debido a los resultados obtenidos, investigadores argentinos realizaron en el laboratorio del Instituto Nacional de Tecnología Industrial un ensayo de envejecimiento acelerado a elementos hechos con PET, utilizando el método de Q.U.V Panel. El resultado obtenido muestra que los elementos probados son resistentes a la acción de los rayos ultravioleta y a los ciclos de humedad, observándose una disminución de resistencia a la compresión posterior al envejecimiento del orden del 25 %⁵⁰.

⁵⁰ MUÑOZ, Op. cit. p.33

2.2 REVISIÓN LITERARIA

Se realiza una revisión literaria en la que se incluyen trabajos de grado y artículos relacionados con el tema de estudio, con los cuales se quiere determinar los porcentajes de material PET utilizados para los ensayos de laboratorio realizados en éstos, con esta información se justificará la cantidad de PET granulado que se usará en esta investigación.

Para empezar los Especialistas en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas Eduardo Pinzón, Luis Mora Yamid Mendieta⁵¹, analizaron muestras de base y sub base granular en su estado natural y adicionada con desechos de botellas plásticas PET en proporciones del 1%, 3%, 6% y 9%, estas proporciones correspondieron al porcentaje en peso de aditivo con respecto al peso total de la muestra. El estudio se centró en analizar la propiedad de resistencia del material granular mediante ensayos de Proctor y CBR, observándose que el material estabilizado mejoró su resistencia en comparación con el material natural, al adicionar el 1% y 3% de escamas de PET, teniendo como resultado un incremento de CBR del 47% y 35% respectivamente, en comparación al del material natural. En el caso de la adición de 6% y 9% se obtuvo un CBR inferior al obtenido con el material granular original de base, posiblemente porque en ese caso el porcentaje (%) de escamas de PET en volumen fue alto, por cuanto la densidad del material adicionado fue menor.

Por otro lado, estudiantes de la Universidad de la Salle, realizaron una investigación, en la cual se analizó el comportamiento de la base estabilizada con cemento modificada con PET reciclado, los ensayos se realizaron con una mezcla de suelo-cemento según el procedimiento del Artículo 341 – 07 del Inviás, se realizaron 3 diseños de suelo-cemento (5% 7% 9% de cemento) con tres porcentajes diferentes de PET (5% 10% y 15%) teniendo en cuenta las especificaciones de materiales y construcción Invias 2007 e IDU 2005. En los resultados se observó que el suelo-cemento-PET que ofrece mejores resultados es el que contiene el 5% de grano de PET con respecto a las otras proporciones, ya que es la que necesita menor porcentaje óptimo de cemento y arroja mayor resistencia⁵².

Otra investigación también de estudiantes de la Universidad de la Salle, analizó el comportamiento de la base granular estabilizada con cemento sustituyendo con material PET en la fracción del agregado que pasa el tamiz #4. Con el fin de analizar el comportamiento físico y mecánico de una base estabilizada con cemento, se utilizó la proporción de porcentajes de cemento dados por la PCA (3%, 5% y 7%) y reemplazando una parte del material granular (Pasa No 4-

⁵¹ PINZÓN CORTÉS; MORA ARCINIEGAS y MENDIETA SALINAS, Op. Cit., p. 66

⁵² MENESES RINCÓN, Liz Paola y FUENTES CAMPOS, Lizeth Michelle. Base estabilizada con cemento, modificada con PET reciclado. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2015.

Retiene No 16) por PET en diferentes proporciones (25%, 50%, 75% y 100%). Los resultados mostraron que el porcentaje de PET para la mezcla con mejor comportamiento tuvo fue el 75%, ya que en primera instancia, el artículo 351 de Inviás exige un cumplimiento con la resistencia a la comprensión y el 75% en PET cumple con la resistencia mínima de 3.5 MPa, mostrando también el mejor comportamiento en el ensayo de compresión de fragmentos de vigas rotas y un incremento significativo en la resistencia a la flexión (42%), a pesar de que este último no es el máximo incremento, es suficiente, logrando un equilibrio entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante presentes en una vía, ya que deben diseñarse vías capaces de soportar estos esfuerzos por igual y este porcentaje cubre ambas⁵³.

Así mismo, la investigación realizada por una ingeniera de la Universidad Costa Rica, sobre el variación de la resistencia de una subbase granular con adición de de finos plásticos en granulometrías controladas, se realizaron ensayos proctor Modificado (AASHTO T180) y CBR para determinar los principales parámetros de compactación, densidad seca máxima y humedad óptima de compactación para las siguientes combinaciones de material: i) subbase con finos plásticos (4%, 8% y 12%); ii) subbase con finos plásticos estabilizados con cal (4%, 8% y 12%) y iii) subbase con finos no plásticos (4%, 9,7% y 12%)⁵⁴.

Por otro, a nivel internacional, se han realizado estudios sobre la estabilización de diferentes tipos de suelos con PET; por ejemplo se tiene el estudio realizado por expertos del colegio de Ingeniería de Amal Jyothi en Kanjirapally India⁵⁵, se examinó la capacidad potencial de estabilizar el suelo con residuos de plástico, para determinar el efecto de las fibras de plástico en arcilla limosa, realizándose pruebas proctor estándar y pruebas de compresión no confinadas en muestras no tratadas y muestras con fibras plásticas al 0,25%, 0,5%, 1% y 1,5%, los autores encontraron que la densidad seca máxima aumentó de 1,29 para la muestra de suelo no tratado a 1,383 para la muestra de suelo con 0,5% de reemplazo de plástico. Pero a partir de entonces, el valor disminuye. El aumento en la densidad seca máxima se debe a la disminución en el número de vacíos debido a la adición de plástico, lo que mejoraría la compactación, que a su vez puede reducir la OMC y aumentará la densidad seca máxima.

Mercy Joseph Poweth y otros investigaron el efecto de los gránulos de plástico en una muestra de suelo débil con plástico y sin gránulos de plástico en diferentes porcentajes. El porcentaje de plástico residual se tomó como 0.25%, 0.5%, 0.75%.

⁵³ BUSTOS ORTIZ, Daniel Fernando y SARMIENTO SALAZAR, Jhonatan Leonardo. Análisis del comportamiento de base granular estabilizada con cemento sustituyendo con material no biodegradable tereftalato de polietileno (PET) en la fracción del agregado que pasa el tamiz #4 y se retiene en el #16. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2016.

⁵⁴ VEGA, Op. cit, p. 38

⁵⁵ Jasmin Varghese Kalliyath, et.al. Soil stabilization using plastic fibers. *In: Int..J. of Science Technology and Engineering*. June, 2016. vol.2, no. 12.

Se obtuvo la densidad seca máxima cuando se añadió 0,25% de plástico y OMC fue menor que el suelo sin plástico para este porcentaje de suelo. El valor adicional de CBR disminuye cuando se agrega 0.25% de plástico, pero se encontró que aumentó en 0.75% de plástico. Los autores también observaron que para el mismo porcentaje de plástico, el esfuerzo cortante fue máximo⁵⁶.

Harish y Ashwini, H.M., estudiaron el efecto de las tiras de botellas de plástico como un estabilizador para dos muestras de suelo, suelo rojo y suelo de algodón negro. El suelo rojo consiste en 4% de grava, 88% de arena y 8% de limo y arcilla y suelo de algodón negro 2.6% de grava, 15.1% de arena y 82.3% de limo y 0.18% de arcilla. Usaron rayas de plástico para hacer el pavimento y se descubrió que había un aumento en la resistencia del suelo. Los autores realizaron una prueba de razón de CBR para descubrir MDD y OMC. Observaron un aumento en la fuerza del suelo y la relación de rodamiento de 2.9 para el suelo rojo y 3.3 para el suelo de algodón negro al mezclar el 0.7% de las tiras plásticas de desecho con el suelo rojo y el 0.5% del suelo de algodón negro⁵⁷.

⁵⁶ MERCY Joseph Poweth et. al., Effect of plastic granules on the properties of soil. En: Int. J. of Engineering Research and Applications. June, 2014. vol. 4, no. 4, p:160

⁵⁷ Harish,C. y ASHWINI, H. M. Stabilization of soil by using plastic bottle strips as a stabilizer. En: Int. Res. J. of Engineering and Technology. January, 2015. vol.4, p- 1877.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA BASE

Para la realización los ensayos de caracterización se usará la base granular proveniente de la cantera CONCRESCOL, y se procede a verificar si cumple con los requerimientos y parámetros establecidos en el artículo 351 - 13 INVÍAS para bases granulares estabilizadas con cemento.

3.1.1 Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino E-213. Este ensayo tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

El ensayo se realiza después de coger una muestra de suelo granular y seco, una cantidad según el tamaño máximo, se pesó seco al horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se lava este material sobre una malla para lavado # 200.

Se seca al horno y se registra el peso inicial, se procede a realizar una separación de las partículas por medio de unas mallas para tamizado, (tamices), estos tamices presentan diferentes espacios entre las diferentes mallas. Registrándose los pesos retenidos en cada tamiz, obteniendo así unos pesos en las diferentes mayas, para realizar una curva granulométrica (véase la Figura 4)

Figura 6. Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino I.N.V. E – 213

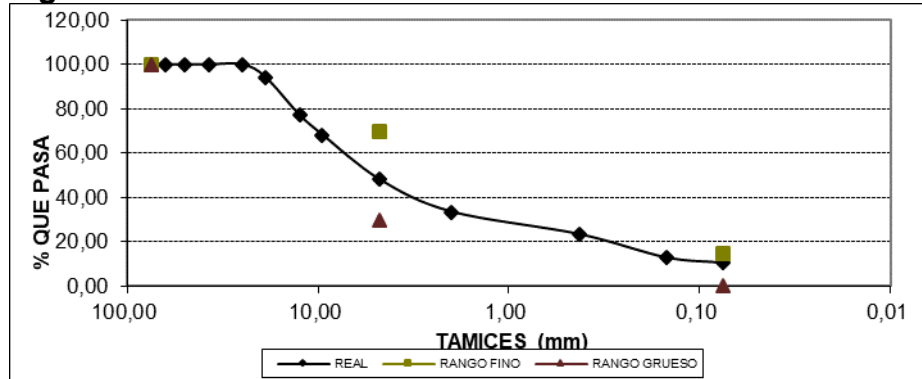


Fuente. El Autor

De acuerdo con los resultados obtenidos se pudo clasificar la base granular dentro de un rango del porcentaje que pasa desde el tamiz de 1 pulgada hasta el tamiz

No 200 (véase la Figura 5), observando que se encuentra dentro de la franja granulométrica BTC 25 según los requisitos granulométricos del agregado para base tratada con cemento Artículo 351-13.

Figura 7. Curva Granulométrica de la Base

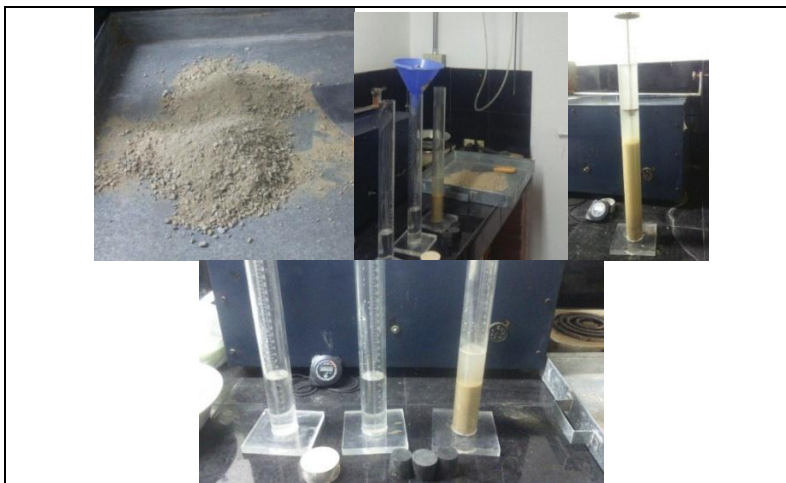


Fuente. El Autor

3.1.2 Equivalente de arena de suelos y agregados finos INVE – 133-13. Este ensayo se hace con el fin de determinar las proporciones relativas de polvo y material de apariencia arcillosa o finos plásticos del material de tamaño inferior a 4.75 mm.

Para el ensayo se tomaron 1500 g de material pasante #4, el cual se llevó a tres probetas marcas hasta 380 milímetros, llenándose hasta 100 ml de un floculante, depositándose en las probetas, y agitando el material, después de 10 minutos se lava el material por medio de irrigación dentro de la probeta se dejan en reposo durante 20 minutos y se toman las lecturas de arcilla y de arena.

Figura 8. Ensayo Equivalente de arena de suelos y agregados finos INVE – 133-13



Fuente. El Autor

El resultado de este ensayo muestra en promedio 32% de equivalente, cumpliendo de esta manera para los requisitos de las especificaciones de la norma 351 para bases granulares estabilizadas con cemento.

3.1.3 Evaluación de la resistencia de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos INVE-224. Este procedimiento se hace para evaluar la resistencia mecánica de un agregado grueso a la trituración al ser sometido a esfuerzo de compresión, determinando la carga necesaria, para producir en el agregado grueso, un 10% de finos, que son constituidos por el material que pasa el tamiz de 2.36 mm (No 8) después de ser sometido a esta prueba.

El ensayo se realizó a las partículas retenidas en el tamiz de 3/8 y que aseveró tamiz de 1/2, tomándose una cantidad de material que llene un recipiente con unas medidas según norma INV 224, se tomaron dos puntos para ser pesados, uno se sumerge en agua y el otro se ensaya en seco, los dos se ensayan en una máquina de compresión registrándose la carga que resiste para obtener un porcentaje de trituración que este entre 7.5 a 12.5% el cálculo del ensayo en seco y el de húmedo es el 10%de finos (véase la Figura 7).

Figura 9. Ensayo Evaluación de la resistencia de la resistencia mecánica por el método del 10% de finos INVE-224



Fuente. El Autor

Se obtuvo como resultado que el valor en seco mínimo fue de 152 kN y el % de relación Húmedo / Seco fue de 85,7%, cumpliendo con lo que establece la tabla 2 del artículo 351-13 para la resistencia mecánica por el método del 10 % de finos (véase el Anexo Resultados de ensayos).

3.1.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y llenantes minerales INVE-235 – 12. Este ensayo se hace con el fin de determinar la cantidad de material potencialmente dañino (incluyendo arcilla y material orgánico) presente en la fracción fina de un agregado.

Para el ensayo se tomaron 10gr de material pasante el tamiz #200, con la solución de azul de metileno preparada, los 10 gr del material se pusieron en un recipiente con la cantidad de agua indicada en la norma y se procede a batir por medio de una máquina con aspas o en una batidora que cumpla con las revoluciones indicadas según norma, luego se procedió a adicionar solución cada minuto, hasta sacando una gota y colocándola sobre un papel filtro, observándose la titulación hasta que se forme una aureola alrededor de la gota, se calcula la cantidad utilizada hasta encontrar la gota con la aureola según norma (véase la Figura 8).

Figura 10. Ensayo Azul de metileno



Fuente. El Autor

Se obtuvo que la muestra tenía presencia de material fino dañino o perjudicial para la mezcla equivale de 7.5 mg de azul por gramo de material seco que pasa por el tamiz 75 μm (No. 200) (VA), aunque es un valor significativo se encuentra dentro de los límites permitidos por la norma.

3.1.5 Ensayo Contenido de vacíos en agregados finos no compactados INVE-239. Se usa para determinar el contenido de vacíos de una muestra de agregado fino no compactada, la cual cuando es medido en cualquier agregado de gradación conocida, el contenido de vacíos provee una indicación de la angularidad de ese agregado, esfericidad y textura de la superficie que pueden ser comparadas con las de otros agregados finos ensayados con la misma gradación. Cuando el contenido de vacíos es medido en un agregado fino con gradación tal como se recibe, este puede ser un indicador del efecto del agregado fino en la manejabilidad de una mezcla en la cual puede ser empleado.

Para la realización del ensayo se utilizó el método A, tomándose de las partículas pasantes de el tamiz #4, y unos pesos retenidos en los tamices # 16, 30, 50, 100 la suma de esos retenidos es de 190g esta cantidad se utilizó para llenar un

recipiente con un volumen conocido y su peso, ese ensayo se hizo con una altura según norma, realizándose 2 veces para apuntar los pesos, luego se calculó según norma y se halló el porcentaje de vacíos.

Figura 11. Preparación Ensayo Contenido de vacíos en agregados finos no compactados INVE-239.



Fuente. El Autor

Se tuvo como resultado que el material tenía una Gravedad Específica G_{sb} 2,48 C° y un porcentaje de Absorción de 0,30%, así mismo el material tuvo una angularidad de fracción fina sin compactar de 40.6%, pasando el nivel mínimo aceptado por la norma INVIAS.

3.1.6 Ensayo de resistencia de agregados a la degradación por abrasión en el micro-Deval - INVE-238. Este ensayo tiene como propósito medir la resistencia a la abrasión de una muestra de agregado grueso.

Para su realización se ensayó se toma material con a unos pesos retenidos en unos tamices según norma los cuales fueron tomados se reúnen se introducen dentro de una olla sumergiéndolos en agua con unas esferas para dejarlos durante una hora, se tapa la olla y se pone en una maquina con rodillos a dar vueltas durante dos horas, después se sacó el material y se lavó para ser secado en un horno y así calcular el porcentaje de pérdida.

Figura 12. Ensayo de resistencia de agregados a la degradación por abrasión en el micro-Deval



Fuente. El Autor

Se obtuvo como resultado que el porcentaje de desgaste $(Pa-Pb)/Pa$ fue del 8,1%, es decir que el material tiene buenas características mecánicas y no presenta gran porcentaje de degradación por abrasión y se encuentra dentro de los límites establecidos en el artículo 351 – 13.

3.1.7 Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos ensayo modificado de compactación (Método D) I.N.V.E – 142. Se realiza con el fin de determinar la humedad óptima con la cual se van a elaborar los cilindros suelo cemento de la norma 614.

Para esto, se toman cinco puntos de material pasante #3/4 seco, a cada uno de los puntos se le agrega una cantidad de agua en porcentaje aumentando de dos en dos cada punto, se compactan en un molde con un volumen conocido y su peso, en cinco capas y 56 golpes cada capa, se enrazan los moldes y se registran los pesos de cada uno de los puntos, y se halla la densidad máxima y la humedad óptima.

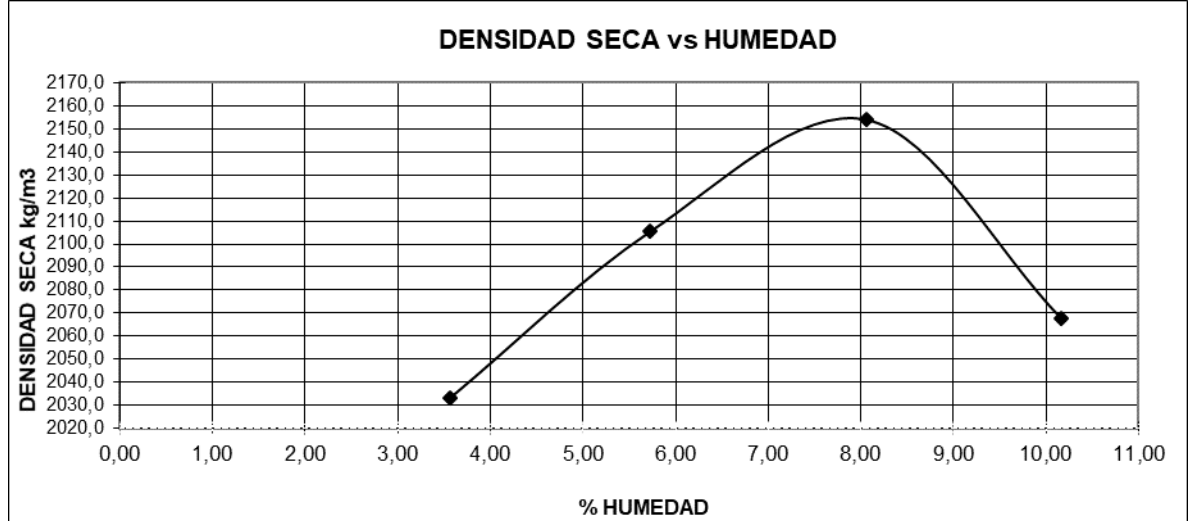
Figura 13. Relaciones de humedad - masa unitaria seca en los suelos ensayo modificado de compactación



Fuente. El Autor

De acuerdo con los resultados se obtiene una densidad seca máxima de 2.154,0 kg/m³, y la humedad óptima para usarse en la elaboración de los cilindros será del 8,1% como se muestra en la Figura 12.

Figura 14. Densidad seca vs humedad



Fuente. El Autor

3.1.8 Solidez (sanidad) de agregados INV E-220. Este ensayo se hace para determinar la Resistencia de los agregados petros, cuando se encuentran expuestos a la intemperie.

En este ensayo se le practica a las partículas retenidas en los tamices de 1" hasta el numero #4 para las partículas gruesas y del tamis #4 hasta el tamis #50 para partículas finas, para realizar este ensayo se cogen unos pesos de material retenidos en cada uno de los tamices como indica la norma, se prepara la solución a utilizar de Sulfato de Magnesio y se sumerge el material en la solución 16 horas, después se escurre la solución, y se pone a secado el material hasta estar seco, este proceso se repite durante cinco ciclos después del quinto ciclo se lava el material y se pone a secar en un horno, se haya la diferencia de pesos y porcentaje de perdida.

Figura 15. Esayo Solidez (sanidad) de agregados INV E-220



Fuente. El Autor

De acuerdo con lo anterior, se tiene que el porcentaje de pérdida en agregados finos y gruesos es de 10%, encontrándose dentro del rango establecido por el artículo 351 -13 tabla 2.

3.1.9 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados I.N.V. E -211. Se realiza con el fin de determinar el porcentaje de terrones de arcilla y de las partículas deleznable en los agregados.

El ensayo se realiza se le practica a las cantidades que queden retenidas en los tamices mayores de del #4, de cada tamis se pasa una cantidad de material según norma, se sumerge en agua destilada durante 24 horas. Después de las 24 horas se saca el material lavándolo en agua, se pone a secar en un horno a 110 grados, se pesan y se allá las diferencias de peso.

Figura 16. Ensayo Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados



Fuente. El Autor

Se encontró que el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados finos fue 1% y en los agregados gruesos fue 0%, cumpliendo con los límites establecidos en la tabla 2 del artículo 351-13, es decir que es un material apto para utilizar en las bases estabilizadas con cementos.

3.1.10 Relación de soporte del suelo en el laboratorio C.B.R método I saturado - I.N.V. E-148. Tiene como propósito determinar el índice de resistencia de los suelos en la base que contenga tamaños máximos en partículas de menos de 19 mm.

Figura 17. Ensayo Relación de soporte del suelo en el laboratorio C.B.R



Fuente. El Autor

CBR después de obtener una densidad y una humedad óptima, se compactan tres puntos pasaste tamiz #3/4, en un molde con un volumen y un peso conocido uno se compacta en cinco capas y 56 golpes, el segundo con cinco capas y 25 golpe y el tercero con cinco capas y 10 golpes. Se enrasan y se pesan se registran los pesos y se sumerge en agua por 96 horas, durante el tiempo de sumergidos se le toman lecturas de expansión por medio de un deformimetro. Después de las 96 horas se secan del agua y se fallan en una máquina de compresión se registran las lecturas de resistencia durante unos tiempos exigidos por norma y así obtenemos la resistencia al corte.

LECTURAS OBTENIDAS DEL C.B.R. CORREGIDO A 0.2"

**AL 95% DE COMPACTACION EL C.B.R
CORRESPONDIENTE ES**

95 %

3.1.11 Índice de aplanamiento y de alargamiento INVIAS E -230. Este ensayo se hace con el fin de determinar el índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados que se van a usar en carreteras.

Este ensayo se les practicó a las partículas retenidas en los tamices con tamaños mayores del número 4, el de alargamiento se realizó con una plantilla con medidas según norma, este ensayo se le hace a cada uno de los pesos retenidos en cada tamiz, se tomaron una por una la partícula y se hace pasar por este espacio que hay entre las barras. Las partículas retenidas se pesan, para mirar el porcentaje retenido en cada uno de los tamices y así con cada retenido en cada tamiz.

Para el de aplanamiento se hace con una plantilla plana con unos orificios con medidas según norma, se hace pasar una por una las partículas sin ejercer fuerzas para que estas pasen, las partículas que pasen son las que se evalúan, se registra el peso de las partículas que pasaron y se mira el porcentaje. Este ensayo se le práctica a cada uno de los retenidos los dos ensayos

Figura 18. Índice de aplanamiento y de alargamiento



Fuente. El Autor

Este ensayo se realiza a la totalidad de las partículas retenidas sobre cada tamiz obteniendo como resultados los siguientes:

Total índice de aplanamiento	27%
Total índice de alargamiento	30%

Cumpliendo de esta manera con lo establecido en la norma cuyo valor máximo permitido es de 35%

3.1.12 Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INVIAS E -227. Se realiza con el fin de determinar el porcentaje de masa por conteo en agregados gruesos con número de caras fracturadas.

El ensayo se practicó a todas las partículas retenidas en el tamiz #4, este se hace al material todo en conjunto todos los retenidos se unen se registra su masa inicial

se procede a separar las partículas de una cara fracturada, las de dos o más caras fracturadas y las redondas, estos pesos se registran en el formato según norma se calcula el porcentaje de caras fracturadas.

Figura 19. Ensayo Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INVIAS E -227



Fuente. El Autor

Una vez finalizada la realización de todos los ensayos se elabora una tabla general en donde se comparan los parámetros máximos y mínimos establecidos por las normas INV-E 351, determinando si la base escogida para la investigación cumple con estos requisitos (véase el Cuadro 16).

Cuadro 16. Requisitos de los agregados para base tratada con cemento INVIAS-13

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INVIAS	CLASE DEL AGREGADO	RESULTADOS DE LABORATORIO	
		A		
DUREZA				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo%	E-238	25	8,1	Cumple
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos. -Valor en seco, mínimo(KN) -Relación húmedo/seco, mínimo %	E-224	90 75	152 85,7	Cumple
DURABILIDAD				
Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). - sulfato de magnesio	E-220	18	10	Cumple
LIMPIEZA				
Limite líquido, máximo (%)	E-125	–	–	Cumple
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 E-126	0	0	Cumple
Equivalente de arena, mínimo(%)	E-133	30	32	Cumple
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	7,5	Cumple
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo(%)	E-211	2	-FINOS 1 GRUESOS 0	Cumple

Cuadro 16. (Continuación)

GEOMETRÍA DE LAS PARTÍCULAS				
Índice de alargamiento y aplanamiento, máximo(%)	E-230	35	I. APLANAMIENTO 27 I. ALARGAMIENTO 30	Cumple
Caras fracturadas (una cara) mínimo (%)	E-227	60	100	Cumple
HUMEDAD OPTIMO, DENSIDAD SECA MÁXIMA				
Relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)	E-142	– –	DENSIDAD SECA MÁXIMA(Kg/m ³) 2.154,0 HUMEDAD OPTIMA (%) 8,1	Cumple
RESISTENCIA DEL MATERIAL				
CBR para una compactación del 95% del ensayo modificado de compactación (INV-142), medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión, mínimo (%)	E-148	80	95	Cumple

Fuente. El Autor

Como se puede observar todos los ensayos cumplieron con los requisitos establecidos por la norma, en algunos tuvo valores por encima de lo requerido, es decir, se encuentra en condiciones óptimas para hacer utilizada como una base estabilizada con cemento para pavimentos.

Así mismo, se clasificó la base de acuerdo a la granulometría determinando que es una base tipo BTC 25 clase A para un tráfico NT 3 según EL Artículo 351 INVIAS.

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO

Para la realización de los ensayos de la base estabilizada con cemento, se utilizó un cemento Portland tipo 1 de uso general, que se caracteriza por sus condiciones hidráulicas, así mismo el cemento presentó condiciones de cero humedad, sin terrones de cemento, de acuerdo con lo establecido por el Artículo 351 de Invias. En este sentido, cabe mencionar que, en el alcance de la investigación no se contempla la caracterización del cemento mediante ensayos de laboratorio, por tanto, se escogió un cemento tipo comercial que tuviera la calidad en cuanto a cumplimiento de los parámetros que exige la norma, para este tipo de material.

Para encontrar el porcentaje óptimo de cemento a ser utilizado en la estabilización de la base con la cual se harán las comparaciones de resistencia con y sin adición de PET, se aplicó el método PCA según norma INVE-180 – 13 Clasificación de suelos y de mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (sistema AASHTO); en donde el resultado de la prueba de laboratorio análisis granulométrico de suelos por tamizado INVE-213, establece que la base se clasifica dentro del grupo A1a, tomando como referencia los valores

establecidos en la Figura 18, la cual establece que el porcentaje del material que pasa por los tamices No. 10, No 40. y No. 200, encontrándose dentro de los rangos máximos permitidos para este material.

Figura 20. Clasificación de Suelos por sistema AASHTO

Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasan por la malla no. 200)							
Clasificación general	A-1			A-2			
Clasificación del grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-12-6	A-2-7
Análisis por cribas (%)							
Malla no. 10	50 máx						
Malla no. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla no. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa la malla no. 40							
Límite líquido (<i>LL</i>)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (<i>PI</i>)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Calificación de la capa	Excelente a buena						
Materiales de lodo y arcilla (Más del 35% de la muestra total pasa por la malla no. 200)							
Clasificación general	A-4	A-5		A-6	A-7		
					A-7-5 ^a A-7-6 ^b		
Análisis por cribas (%)							
Malla no. 10							
Malla no. 40							
Malla no. 200	36 mín		36 mín	36 mín			36 mín
Para la fracción que pasa la malla no. 40							
Límite líquido (<i>LL</i>)	40 máx		41 mín	40 máx			41 mín
Índice de plasticidad (<i>PI</i>)	10 máx		10 máx	11 mín			11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos			Principalmente suelos arcillosos			
Calificación de la capa	Regular a pobre						
^a Si $PI \leq LL - 30$, es un A-7-5.							
^b Si $PI > LL - 30$, es un A-7-6.							

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Clasificación de suelos y de mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (sistema AASHTO). INVE-180 – 13. Bogotá: INVIAS, 2013

Según esta tabla a continuación se comparan los valores máximos permitidos en los tres tamices con los resultados obtenidos de la granulometría realizada a la base seleccionada para la investigación (véase el Cuadro 17).

Cuadro 17. Comparación Valores máximos para clasificación de grupo, norma INVE 180 Vs. Resultados Prueba de Granulometría INVE 213

Tamiz	Valor de referencia máximo INVE 180	Resultado Prueba de Granulometría INVE 213	Nivel de cumplimiento
10	50	33.55	Cumple
40	30	23.34	Cumple
200	15	10.41	Cumple

Fuente. El Autor

De acuerdo con los valores establecidos anteriormente, la base se clasificó como A1a, por tanto, el porcentaje requerido de cemento para la estabilización serán 3, 4 y 5 según la clasificación de la PCA para las mezclas de suelo- cemento (véase el Cuadro 18).

Cuadro 18. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo- cemento según la PCA (Portland Cement Association)

GRUPO DE SUELO SEGÚN LA AASHTO	% DE CEMENTO REQUERIDO EN PESO	CONTENIDO DE CEMENTO ESTIMADO PARA LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN EN PESO	CONTENIDO DE CEMENTO PARA LA PRUEBA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO EN PESO
A1 - a	3 a 5	5	3 - 4 - 5 - 7
A1 - b	5 a 8	6	4 - 6 - 8
A2	5 a 9	7	5 - 7 - 9
A3	7 a 11	9	7 - 9 - 11
A4	7 a 12	10	8 - 10 - 12
A5	8 a 13	10	8 - 10 - 12
A6	9 a 15	12	10 - 12 - 14

Fuente. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C. Suelo – Cemento [en línea]. México: IMCC [citado 25 abril, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.imcyc.com/ct2008/abr08/ingenieria.htm>>

Se tomaron tres porcentajes diferentes para poder hacer una comparación mejor comparación y darle un mayor valor a la investigación.

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Se utilizó un tipo de agua tipo potable de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, la cual cumple con los parámetros para realizar los ensayos, la cual se caracteriza por su nivel de limpieza, y cero contenido de material orgánicos o sustancias que pudieran alterar la obtención de los resultados esperados.

3.4 CARACTERIZACIÓN DEL PET RECICLADO TIPO ESCAMAS

Este material se obtuvo en la Universidad Nacional de Colombia, ya que ésta cuenta con los equipos para triturar el PET tipo No. 4, ya que es la línea de producción más procesada y que se ajustaba a las características de la investigación, esto, teniendo en cuenta que el material No. 4, es el que mayor peso retenido presenta en la gradación de la base, por tanto, se ajusta al propósito de investigación.

Para determinar los porcentajes de PET reciclado que se adicionarán a la base estabilizada con cemento, para hacer la comparación de resistencia a la comprensión, se tomó como referencia las investigaciones analizadas en la revisión documental expuesta en el capítulo 2 numeral 2.2, en donde los porcentajes de PET utilizados fueron:

1%, 3% 6% y 9% Eduardo Pinzón, Luis Mora Yamid Mendieta
5%, 10% y 15% Universidad de la Salle
25%, 50%, 75% y 100% Universidad de la Salle
4%, 8% y 12% Universidad Costa Rica

Por tanto, para esta investigación se tomaron 2%, 4% y 6% de PET reciclado para adicionar a la base estabilizada con cemento, al no haber sido utilizados en otras investigaciones, para determinar el mayor porcentaje de PET y el mínimo porcentaje de cemento que tenga una resistencia a la comprensión óptima de 3.5 Mpa que es lo que se establece para bases estabilizadas con cemento, y así poder reemplazar material granular por PET, convirtiendo este tipo de material de construcción en uno amigable con el planeta, reduciendo el impacto ambiental que genera la explotación de canteras en Colombia.

4. ANÁLISIS DE LA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO ADICIONA CON PET RECICLADO TIPO ESCAMAS

4.1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO SEGÚN NORMA INV E – 614 – 13

4.1.1 Preparación de ensayo. Una vez caracterizados los materiales a ser usados en el ensayo de resistencia a la compresión, se inicia la preparación del ensayo de laboratorio según norma INVE-614-13, para lo cual se empleó el método A, ya que solo se retiene el 5,56% de material granular en el tamiz ¾" que se encuentran dentro de los parámetros establecidos por la norma, y que se realiza con el fin de obtener una medida relativa de la resistencia debido a la relación altura / diámetro (1.15) de los cilindros.

Por otro lado, para determinar la humedad óptima, se tuvo en cuenta, la revisión literaria, con la cual se pudo establecer que, según la norma INV E-612-13 (Humedecimiento Y Secado De Mezclas Compactadas De Suelos Cemento) el valor de humedad no varía en un porcentaje fuera del 1% ± de la humedad óptima obtenida a partir del ensayo INV E-142-13 (Relaciones de Humedad – Peso Unitario Seco En Los Suelos – Ensayo Modificado De Compactación), por tanto el porcentaje de humedad tomado para la elaboración de cada uno de los cilindros de la presente investigación fue de 8.1% de humedad.

Finalmente, para la elaboración de los cilindros se usó el material pasante del tamiz ¾" BTC-25 en una proporción para cada cilindro de 2500 gramos, reemplazando los porcentajes tanto de cemento como de material PET reciclado establecidos en su caracterización de la siguiente manera:

Cuadro 19. Porcentajes de material que se reemplazara en la Base granular modificada

Porcentaje de PET(%)	Porcentajes de cemento(%) según PCA	% de agua
0	3, 4 y 5	8.1
2	3, 4 y 5	8.1
4	3, 4 y 5	8.1
6	3, 4 y 5	8.1

Fuente. El Autor

Por cada porcentaje de PET se elaboraron dos cilindros por porcentaje de cemento, es decir dos cilindros al 3%, dos al 4% y dos al 5% de cemento con 0% de PET. dos cilindros al 3%, dos al 4% y dos al 5% de cemento con 2% de PET; dos cilindros al 3%, dos al 4% y dos al 5% de cemento con 4% de PET y, dos cilindros al 3%, dos al 4% y dos al 5% de cemento con 6% de PET; para un total de 24 cilindros.

Se procede a unir los materiales obteniendo una mezcla homogénea, la cual fue compactada mediante 3 capas cada una de 25 golpes, enrazando los cilindros dejándolos sin vacíos y con una superficie totalmente lisa. Cada cilindro fue dejado en el molde durante 24 horas, luego se retiró y se dejó en un cuarto de secado, aplicando tratamiento de curado todos los días, agregándole agua en su superficie por un periodo de 7 días.

Figura 21. Preparación de los Cilindros



Fuente. El Autor

Al cumplir este período de curado, los cilindros son sumergidos en agua durante 4 horas según lo establecido en la norma INVE 614, y luego se procedió a fallarlos en la máquina universal MTS inmediatamente, obteniendo una carga máxima a la falla para cada uno de los cilindros.

Figura 22. Fallo de Cilindros con Máquina Universal MTS



Fuente. El Autor

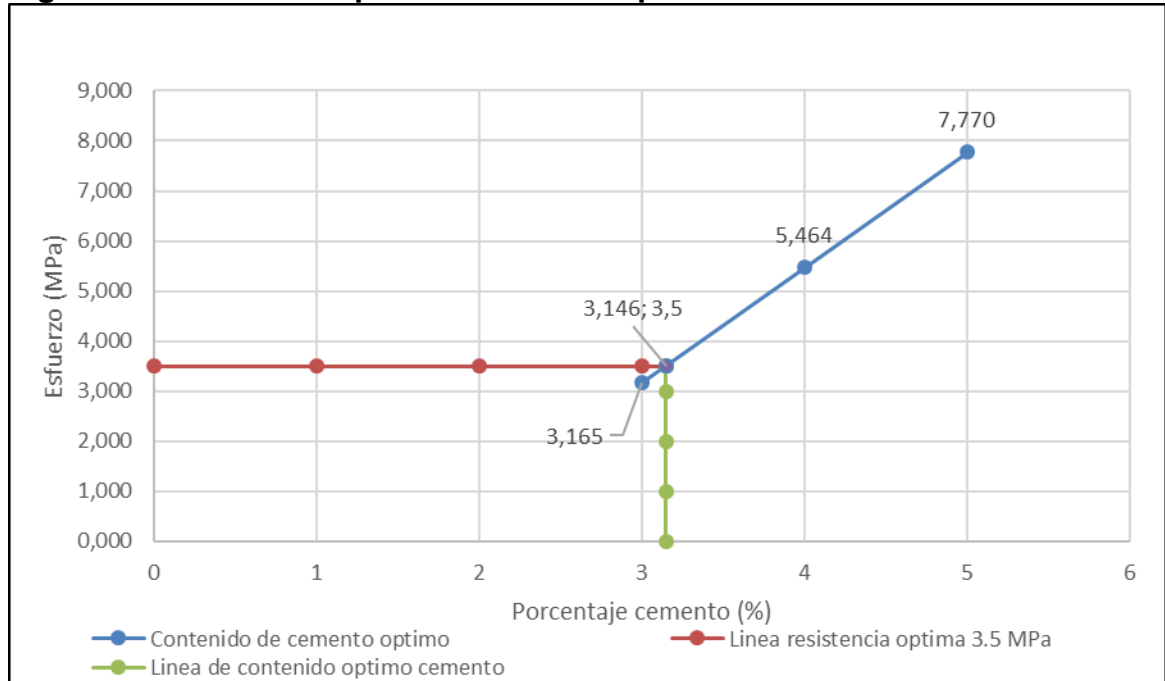
4.2 RESULTADOS

Una vez ejecutado el procedimiento de la norma 614, se obtuvo los siguientes resultados:

4.2.1 Base Granular estabilizada con cemento al 3%, 4% y 5% de Cemento.

Una vez fallados los cilindros correspondientes a la base granular estabilizada con los tres porcentajes de cemento, se obtienen resultados para el porcentaje de cemento Vs. La resistencia a la comprensión, así como para el porcentaje óptimo de cemento para una resistencia óptima de 3.5 Mpa, para finalmente hallar el porcentaje de cemento Vs el peso unitario seco, y éste para el porcentaje óptimo de cemento, como se muestra a continuación:

Figura 23. Contenido óptimo de cemento para la base

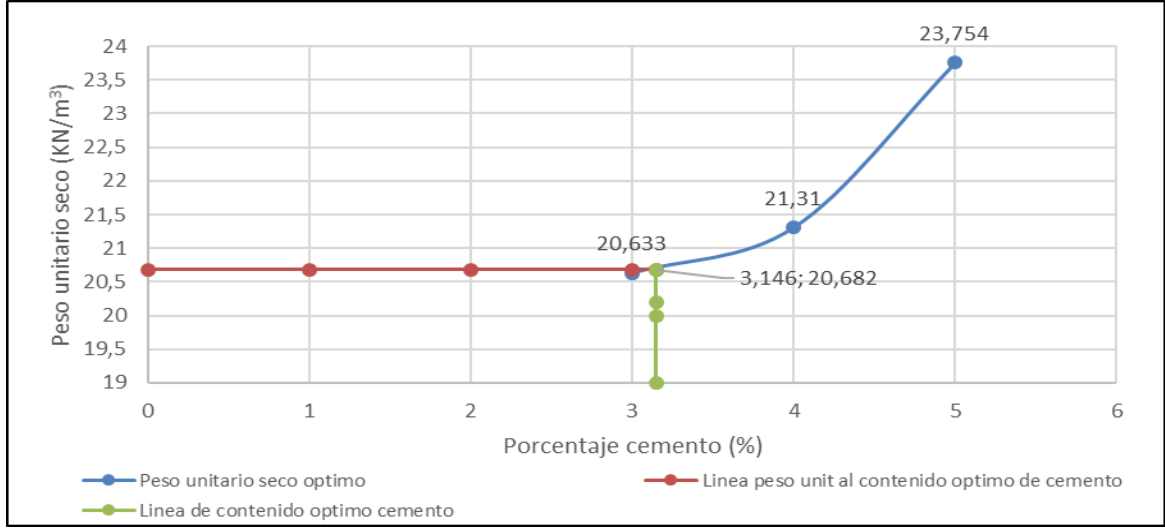


Fuente. El Autor

Como se puede observar en la Figura 21 el porcentaje óptimo de cemento sin adición de material PET, para obtener una resistencia óptima de 3.5 Mpa, fue 3.146%.

Por otro lado, el peso unitario seco óptimo para el porcentaje óptimo del cemento hallado 3.146%, usado para la estabilización de la base granular es de 20.633 KN/m³ (véase la Figura 22).

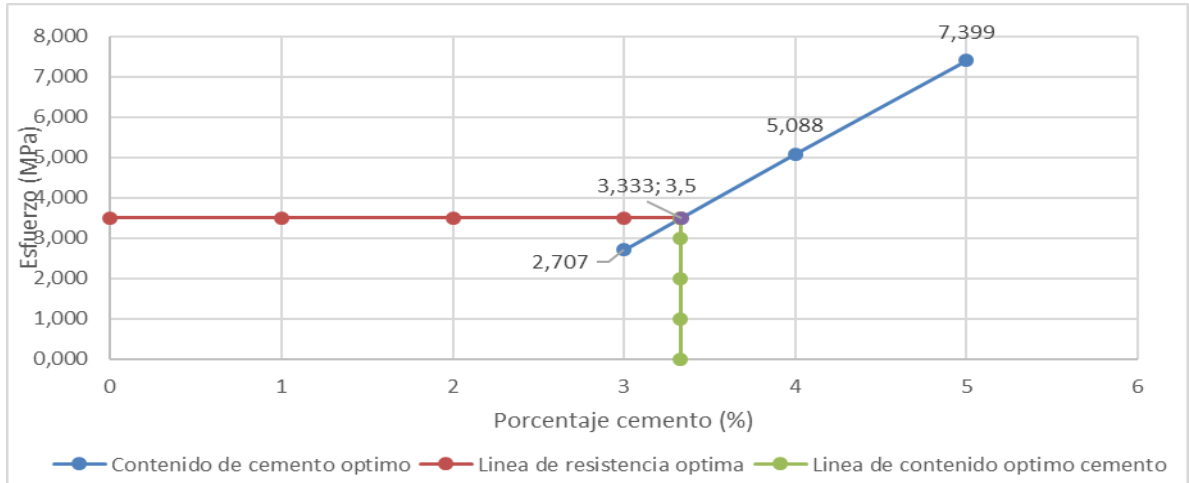
Figura 24. Peso Unitario Seco del Cemento



Fuente. El Autor

4.2.2 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 2% y cemento al 3%, 4% y 5%. Al fallar los cilindros de base cemento con el 2% de material PET adicionado, se obtienen que, el valor óptimo de cemento es de 3.333% de cemento para una resistencia óptima de 3.5 Mpa (véase la Figura 23).

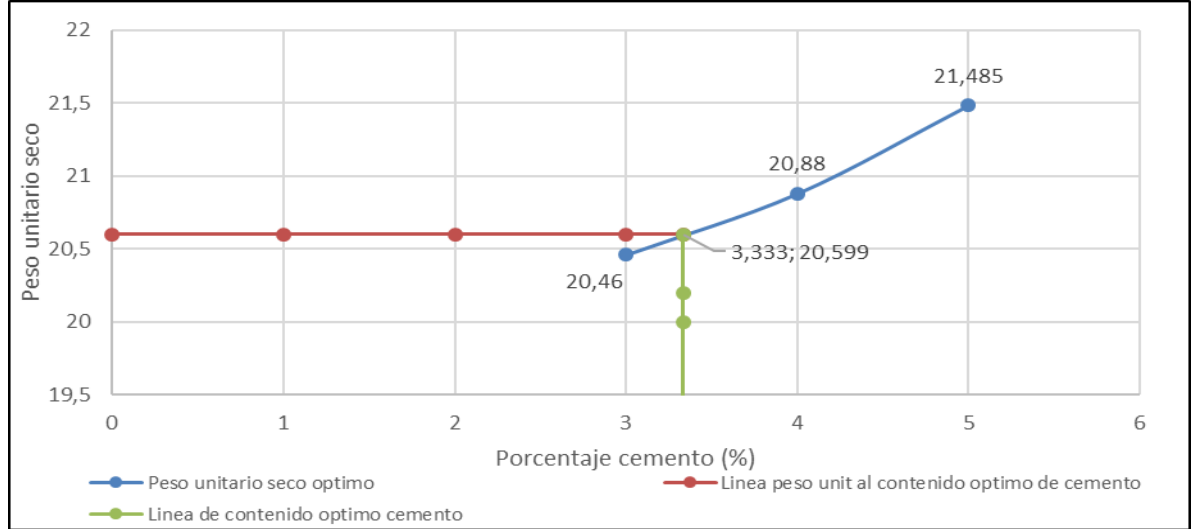
Figura 25. Contenido óptimo de cemento para la base adiciona con 2% de PET



Fuente. El Autor

Por otro lado, el peso unitario seco óptimo para el porcentaje óptimo del cemento hallado 3.33%% con 2% de material PET, usado para la estabilización de la base granular fue de 20.599 KN/m³ (véase la Figura 24)

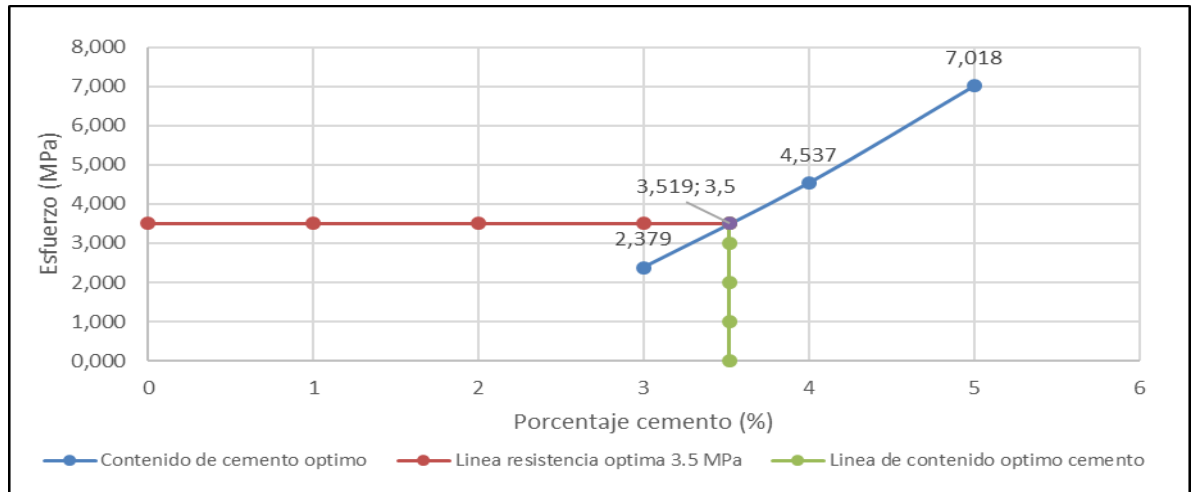
Figura 26. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 2% de PET



Fuente. El Autor

4.2.3 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 4% y cemento al 3%, 4% y 5%. Al fallar los cilindros de base cemento con el 4% de material PET adicionado, se obtienen que, el valor óptimo de cemento es de 3.519% de cemento para una resistencia óptima de 3.5 Mpa (véase la Figura 25).

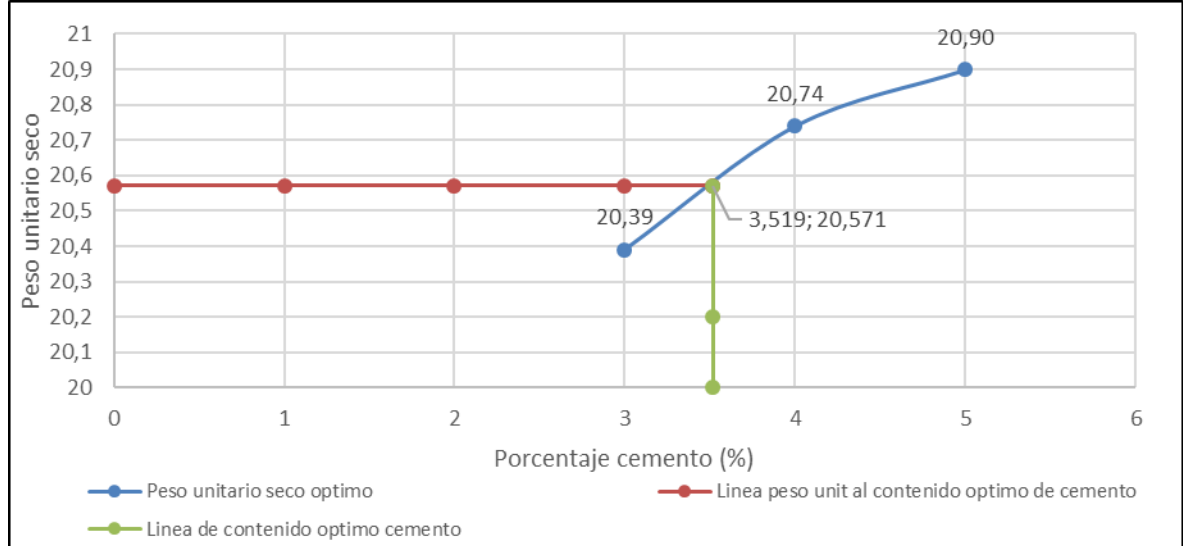
Figura 27. Contenido óptimo de cemento para la base adición con 4% de PET



Fuente. El Autor

Por otro lado, el peso unitario seco óptimo para el porcentaje óptimo del cemento hallado 3.519% con 4% de material PET, usado para la estabilización de la base granular fue de 20.571 KN/m³. (véase la Figura 26)

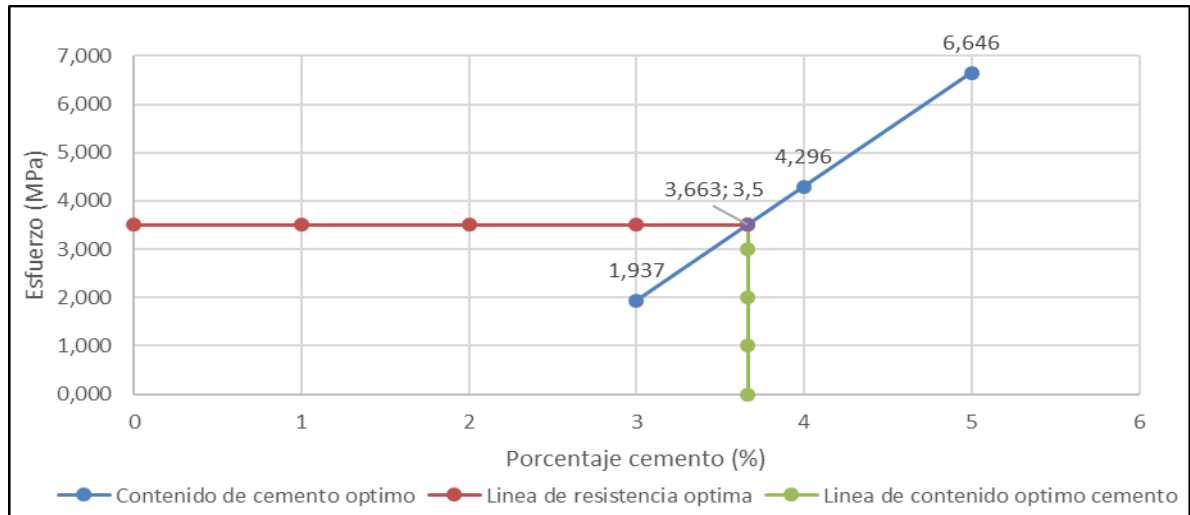
Figura 28. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 4% de PET



Fuente. El Autor

4.2.4 Base estabilizada con cemento sustituyendo material granular por PET #4 al 6% y cemento al 3%, 4% y 5%. Al fallar los cilindros de base cemento con el 6% de material PET adicionado, se obtienen que, el valor óptimo de cemento es de 3.663% de cemento para una resistencia óptima de 3.5 Mpa (véase la Figura 27).

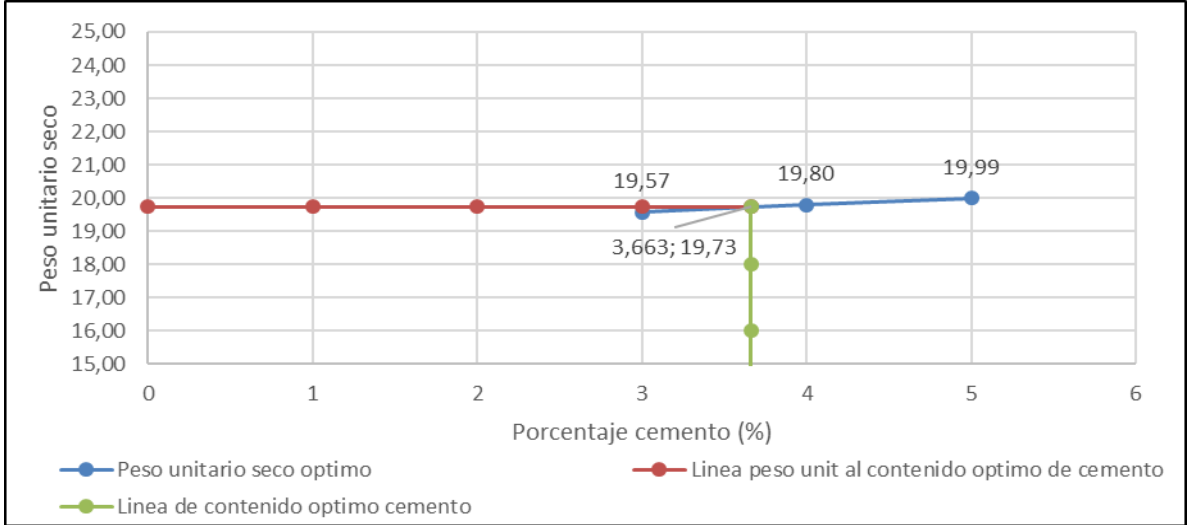
Figura 29. Contenido óptimo de cemento para la base adiciona con 6% de PET



Fuente. El Autor

Por otro lado, el peso unitario seco óptimo para el porcentaje óptimo del cemento hallado 3.663% con 6% de material PET, usado para la estabilización de la base granular fue de 19.73 KN/m³. (véase la Figura 28)

Figura 30. Peso Unitario Seco del Cemento óptimo con 6% de PET

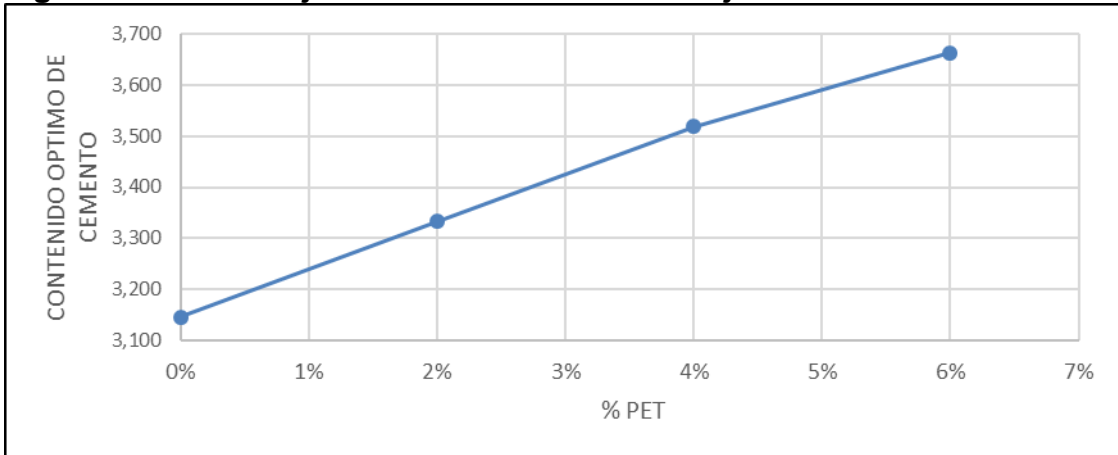


Fuente. El Autor

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.3.5 Comparación Resistencia Vs. % de PET. Con los resultados obtenidos de los ensayos de acuerdo a los porcentajes óptimos de cemento, se concluye que a medida que aumenta la cantidad de PET se debe aumentar la cantidad de cemento para obtener una resistencia máxima óptima de esfuerzo a la compresión Mpa que se encuentre dentro de los parámetros permitidos por el Artículo INVE 351-13 (véase a Figura 29).

Figura 31. Porcentaje de Cemento Vs. Porcentaje de PET



Fuente. El Autor

Así mismo, al finalizar los ensayos de resistencia a la compresión se obtuvo la cantidad de PET que requiere mayor porcentaje de cemento para llevar a la resistencia óptima de 3.5 Mpa; observándose que los rangos establecidos por la

PCA para la elaboración de una base estabilizada con cemento se comportan de manera indiferente a los parámetros establecidos por el Artículo INVE 351 – 13, que dice que la resistencia mínima debe ser de 3.5MPa y el máximo es 7.0 MPa.

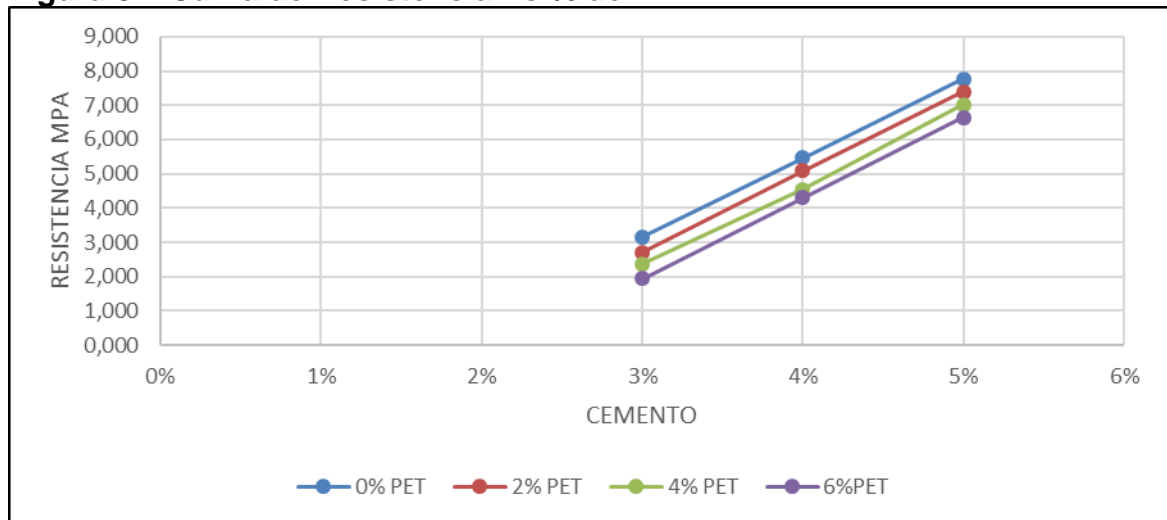
Por tanto, comparando los 3 resultados obtenidos para la resistencia a la compresión de la base granular estabilizada con cemento al 3%, 4% y 5% y adicionada con el 2%, 4% y 6% de materia PET se pudo observar que, a medida que se aumenta el porcentaje de PET en el mayor porcentaje de cemento, la resistencia de la base estabilizada aumenta, presentando el mejor comportamiento con el 6% de PET para un 5% de cemento, que presenta una resistencia de 6,646 MPa (véase el Cuadro 20 y la Figura 30), que se acerca al máximo parámetro establecido por el Artículo 351 – 13 para resistencia a la compresión de cilindros, mejorando el resultado más alto obtenido de la base estabilizada con cemento al 4% sin adición de PET que fue de 5,464 MPa de PET, por cuanto se podría considerar usar este porcentaje de material PET para estabilizar la base cemento.

Cuadro 20. Comparación de resultados Vs. Criterios de diseño para la mezcla de base tratada con cemento 351-13

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INVIAS	NIVEL DE RESISTENCIA	RESULTADOS EN LABORATORIO			
		R 3.5	BASE + CEMENTO 3,4,5%	BASE + PET 2% + CEMENTO 3,4,5%	BASE + PET 4% + CEMENTO 3,4,5%	BASE + PET 6%+ CEMENTO 3,4,5%
Resistencia a la compresión a 7 días, (Mpa) mínima	E-614	3,5	3,165 5,464 7,770	2,707 5,088 7,399	2,379 4,537 7,018	1,937 4,296 6,646

Fuente. El Autor

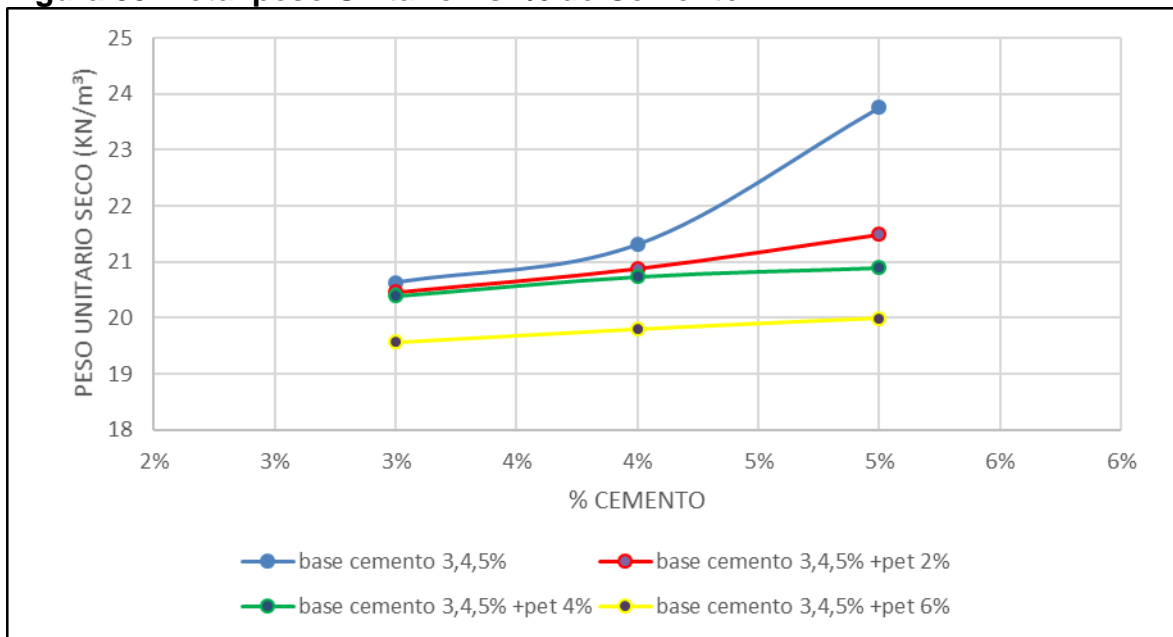
Figura 32. Curva de Resistencia Vs.% de PET



Fuente. El Autor

4.3.6 Comparación total peso unitario Vs % de cemento. Al revisar los resultados del ensayo, se tuvo que el peso unitario mínimo fue para la base estabilizada con 3% de cemento y 6% de PET, que arrojó la menor resistencia comportándose como una mezcla de porcentajes no óptima para la estabilización, el aumento de esta resistencia se ve obligado al aumento de cemento lo que no es amigable con el medio ambiente.

Figura 33. Total peso Unitario Vs. % de Cemento



Fuente. El Autor

Así mismo, se pudo determinar que el peso unitario seco mayor, se encuentra ubicado en la base sin modificación con PET, es decir base estabilizada con 5% cemento; máximo porcentaje permitido de acuerdo a la PCA; esta combinación hace que se lleve la resistencia a la compresión a un punto máximo, sin embargo, con este porcentaje de utilización de cemento se estará excediendo el consumo de materiales, lo que puede generar impacto medio ambiental sea aún mayor teniendo en cuenta que en su proceso de fabricación el medio ambiente se ve afectado negativamente; además que se generarían mayores costos para la construcción de pavimentos, pues el valor comercial del cemento es elevado, lo que no sería viable, ya que en la actualidad lo que se busca en la industria es desarrollar procesos constructivos eficientes amigables con el planeta, mediante el uso responsable de materiales y que genere menores costos.

Por tanto, y teniendo en cuenta que, se ha evidenciado un excesivo consumismo, que ha hecho que miles de residuos plásticos sean arrojados al medio ambiente sin ningún tipo de una metodología reciclable, con la implementación del PET como material de construcción, se plantea utilizar el mínimo contenido de cemento

y el máximo contenido de PET, que genere una resistencia óptima a la comprensión establecida como parámetro de diseño de pavimentos, mínimo de 3,5 MPa, según lo exigido por el artículo INVE 351-13, Tabla 351-16, lo que ofrecería un material amigable con el planeta y aceptable para la construcción de vías en Colombia.

De acuerdo con lo anterior se propone como resultado óptimo para el diseño de mezclas para bases estabilizadas con cemento y PET el siguiente porcentaje, que cumple con el máximo porcentaje de PET empleando el mínimo contenido de cemento para la obtención de una resistencia óptima de 3,5 MPa.

Cuadro 21. Contenidos de Cemento y PET para Bases estabilizadas con resistencia óptima de 3.5 MPa

%cemento		Δx Peso unitario seco (KN/m ³)	2% PET
Óptimo	3,333	20,599	

Fuente. El Autor

4.4 INTERACCIÓN QUÍMICA DE LA SUPERFICIE AGREGADO – CEMENTO - MATERIAL PET

De acuerdo con estudios realizados, “la resistencia a corte de un suelo está condicionada por su cohesión y por la fricción interna de los granos, ningún suelo posee las propiedades para resistir esfuerzos a tracción, por lo que la fuerza de fricción interna del suelo podría ser incrementada agregando materiales de refuerzo, evidenciándose que el plástico es un material resistente a este tipo de esfuerzos, convirtiéndose así en un agregado favorable para complementar la resistencia en los suelos sometidos a tracción”⁵⁸.

Sin embargo, la investigación realizada por Vázquez Ruiz y Casanova en 2009, estableció que las aplicaciones más frecuentes de los materiales compuestos se encuentran en materiales estructurales donde son importantes la rigidez, la resistencia y la baja densidad, y son solo moderadamente costosos. Aquí las fibras de cemento, arena y PET son fuertes y rígidas, pero con poca ductilidad. El agua tiene dos papeles muy importantes; es un medio que transfiere aglutinamiento y genera la interface entre el cemento, la arena y el agua. Entre el agua, la arena y el cemento hay reacción química, pero entre estos tres y el PET no hay reacción alguna solo cierta adherencia⁵⁹.

⁵⁸ LÓPEZ ORTIZ, José Alberto. Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET). Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia. Facultad de Ingeniería Civil. Modalidad trabajo de grado, 2013

⁵⁹ VÁZQUEZ RUIZ, J.L y CASANOVA DEL ANGEL, F. Elaboración de concreto ligero con agregado PET. En: El Portulano de la Ciencia. Julio – Agosto, 2009. vol. 8, no. 22, p. 811-824

Lo anterior se debe a que la superficie del material PET es demasiado lisa y poco rugosa, razón por la cual para mejorar la adherencia y cohesión del PET al cemento y por tanto a la base, se debe mejorar la rugosidad y optimizar su textura, lo cual se logra según el Instituto de Estudios Ambientales IDEA ⁶⁰ lijando previamente las superficies lisas del material PET para mejorar la adherencia y cohesión del plástico con el concreto; ya que si no se hace esto, se puede presentar reducción de la resistencia del suelo cemento adicionado con PET, si no se usa un mayor contenido de cemento, lo que se evidenció en los resultados de los ensayos en donde para obtener una mayor resistencia de la base cemento, se debía utilizar mayor cantidad de cemento y material PET.

4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PARA LA APLICACIÓN DE LA PRÁCTICA DEL USO DE PET COMO ADITIVO PARA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO

Para realizar la evaluación económica del uso de PET como aditivo para la base estabilizada con cemento en modelos constructivos, se realiza la simulación mediante un ejercicio práctico tomado del catálogo de estructuras del Manual de Diseño de Pavimentos de Concreto (para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito)⁶¹.

4.5.1 Información Supuesta básica. Se toma un proyecto particular de pavimentación cuya información básica supuesta es la siguiente:

- Suelo de soporte: base granular sin límite líquido sin índice de plasticidad A1-a
- Tráfico: Tpd: 1153
- (Autos 43% - Buses 30% - Camiones 27%)
- (2p: 8% - 2g: 6% - 3:6% - 3S2: 4% - 3S3: 3%)
- Periodo de Diseño: 20 años
- Crecimiento anual del tránsito del 2 %
- Se solicitan concretos con módulos de rotura (M_r) entre 42 y 44 kg/cm²
- Se trata de una vía de dos carriles en un solo sentido.

4.5.2 Variables de diseño a partir de la información básica. De acuerdo con las correlaciones de suelos tipo grava sin LL ni IP se tiene un CBR mayor a 20; (subrasante) se escoge CBR=95% (de la base).

⁶⁰ MORA CHACÓN, Wbeimar Fabián. Concreto Ecológico a Partir de Material PET, Vidrio y Tapas de Bebidas Refrescantes y Alcohólicas. En: Boletín Ambiental Instituto de Estudios Ambientales IDEA. Junio, 2016. no. 31, p. 6

⁶¹ LONDOÑO NARANJO, Cipriano y ALVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008.

Así mismo, se tienen en cuenta los análisis del tráfico en el período de diseño mediante teorías de proyección, el tránsito futuro se encuentra en el rango de T4 (9E6<EALS<17E6).

Por otro lado, dada la condición de alto volumen de tráfico comercial en cuantía y frecuencia, se proyecta un pavimento de concreto con transferencia de cargas con dovelas y con bermas como confinamientos laterales D y B.

Concretos con alta resistencia y durabilidad encajan los MR = 42 kg/cm² ó MR = 44 kg/cm²

Con estas suposiciones T4 (Tránsito medio) – S5 (calidad del suelo de soporte) – DyB (dovelas y bermas losas de concreto) – MR4 (módulos de rotura) iniciales puede dar elección de la estructura deseada.

Por tanto, para T4 se observa en el Cuadro Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo a la combinación de variables y T4 como factor principal. Se registran las alternativas existentes para los demás parámetros (S5 – DyB - MR).

Cuadro 22. Espesores de losa de concreto (cm) de acuerdo con la combinación de variables y T4 como factor principal

		ESPEORES DE LOSA DE CONCRETO (cm) DE ACUERDO CON LA COMBINACIÓN DE VARIABLES																			
		Tránsito T4																			
		S1				S2				S3				S4				S5			
		DyB	Dy no B	No D y B	No D y no B	DyB	Dy no B	No D y B	No D y no B	DyB	Dy no B	No D y B	No D y no B	DyB	Dy no B	No D y B	No D y no B	DyB	Dy no B	No D y B	No D y no B
SN	MR1	30				29				26	30	29		26	29	28	30	25	29	27	30
	MR2	29				28				25	29	29		25	28	28	30	24	28	27	30
	MR3	28				27				25	28	29		24	27	28	30	23	27	27	30
	MR4	26	30			25	29			23	27	29		23	26	28	30	22	26	27	30
BG	MR1	28				28				26	30	28	30	25	29	28	30	25	28	27	29
	MR2	27				27				25	29	28	30	24	28	28	30	24	27	27	29
	MR3	26				26	30			24	28	28	30	23	27	28	30	23	26	27	29
	MR4	25	29			24	28			23	26	28	30	22	26	28	30	22	25	27	29
BEC	MR1	25	28			24	28	27	29	23	26	26	28	22	25	25	27	22	25	25	27
	MR2	24	27			23	27	27	29	22	25	26	28	21	24	25	27	21	24	25	27
	MR3	23	26			22	26	27	29	21	24	26	28	21	24	25	27	21	23	25	27
	MR4	22	25			22	25	27	29	21	24	26	28	21	24	25	27	21	23	25	27

Fuente. LONDOÑO NARANJO, Cipriano y ALVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008.

De acuerdo con lo anterior, se tiene entonces, la siguiente alternativa de elección de pavimento de concreto que cumple con todas las exigencias que se solicitan:

- Alternativa: A1
- Soporte: BEC 15 CM
- Resistencia (Kg/cm²): MR 45
- Espesor De La Losa (Cm): 21
- Pavimento en concreto de tráfico medio, construcción por carriles de 3.65 m

4.5.3 Cálculo Valor Total de Materiales por Alternativa. Tomando los datos anteriores, se procede a hacer el cálculo de costos para un tramo de pavimento en concreto de tráfico medio de 100 ml, cuyas características serán las siguientes (véase el Cuadro 23)

Cuadro 23. Características del Tramo de Pavimento en Concreto

TRAMO	K0+00
	K0+100
L (m)	100
ESPESOR BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO(m)	0,15
ANCHO DE CARRIL(m)	3,65
Densidad seca base BTC-25 (Kg/m³)	2108

Fuente. El Autor

De acuerdo con estas características se calculó primero el costo del tramo de pavimento cemento + base BCT 25 + Agua. Luego, se realizan los mismos cálculos, pero reemplazando el material inicial con el 2%, 4% y 6% de material PET, que fueron los porcentajes tomados para la realización de la presente investigación y con los cuales se obtuvo el nivel de resistencia óptimo; hasta obtener el peso inicial final (Kg) que cumpla con la normatividad para este tipo de suelos.

Una vez se tienen las cantidades se consultan los precios actuales del mercado para cada una y se realiza el cálculo del valor total, para cada una de las alternativas. A continuación, se presentan los resultados obtenidos (véase los Cuadros 24, 25, 26 y 27)

Cuadro 24. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento

TRAMO 1: BASE+CEMENTO							
% CEMENTO	3,146	RESISTENCIA(Mpa) 3,5					
% AGUA	8,1						
VOLUMEN DEL TRAMO (m3)	54,75						
MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	115413						
CANTIDAD DE CEMENTO A USAR (Kg)	3630,9						
CANTIDAD DE AGUA A USAR (ml)	9348,5						
PESO MATERIAL TOTAL (Kg)	128392,3						
COSTOS							
CEMENTO			BASE GRANULAR BTC-25			AGUA	
#BULTOS (50Kg)	VALOR TOTAL		m3	VALOR TOTAL		m3	VALOR TOTAL
73	\$1.452.357,2		54,75	\$2.190.000,0		9,3	\$93.000,0
valor unidad bulto de cemento \$	\$20.000,0		valor metro cubico unidad \$	\$40.000,00		valor metro cubico Bogota	\$10.000,0
costo total CEMENTO+BASE BTC 25+AGUA					\$3.735.357,2		

Fuente. El Autor

Cuadro 25. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 2%

TRAMO 2: BASE+CEMENTO+PET AL 2%									
% CEMENTO	3,333	RESISTENCIA (Mpa) 3,5							
% AGUA	8,1								
% PET	2								
VOLUMEN DEL TRAMO (m3)	54,75								
MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	115413								
%PET-MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	2308,26								
PESO INICIAL FINAL (Kg)	113104,74								
VOLUMEN DEL TRAMO FINAL (m3)	53,65								
CANTIDAD DE CEMENTO A USAR (Kg)	3769,8								
CANTIDAD DE AGUA A USAR (ml)	9161,5								
CANTIDAD DE PET A USAR (Kg)	2238,5								
PESO MATERIAL TOTAL (Kg)	128274,5								
COSTOS									
CEMENTO		BASE GRANULAR BTC-25		AGUA		PET			
#BULTOS (50Kg)	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	Kg	VALOR TOTAL		
75	\$1.507.912,4	53,65	\$2.146.000,0	9,16	\$91.600,0	2238,5	\$2.238.500,0		
valor unidad bulto de cemento \$	\$20.000,0	valor metro cubico unidad \$	\$40.000,00	valor metro cubico Bogota	\$10.000,0	valor kg de pet #4	\$1.000,0		
costo total CEMENTO+BASE BTC 25+AGUA+PET						\$5.984.012,4			

Fuente. El Autor

Cuadro 26. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 4%

TRAMO 3: BASE+CEMENTO+PET AL 4%									
% CEMENTO	3,519	RESISTENCIA (Mpa) 3,5							
% AGUA	8,1								
% PET	4								
VOLUMEN DEL TRAMO (m3)	54,75								
MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	115413								
%PET-MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	4616,52								
PESO INICIAL FINAL (Kg)	110796,48								
VOLUMEN DEL TRAMO FINAL (m3)	52,56								
CANTIDAD DE CEMENTO A USAR (Kg)	3898,9								
CANTIDAD DE AGUA A USAR (ml)	8974,5								
CANTIDAD DE PET A USAR (Kg)	4431,9								
PESO MATERIAL TOTAL (Kg)	128101,8								
COSTOS									
CEMENTO		BASE GRANULAR BTC-25			AGUA			PET	
#BULTOS (50K)	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	Kg	VALOR TOTAL		
78	\$1.559.571,3	52,56	\$2.102.400,0	8,97	\$89.700,0	4431,9	\$4.431.859,2		
valor unidad bulto de cemento \$	\$20.000,0	valor metro cubico unidad \$	\$40.000,00	valor metro cubico Bogota	\$10.000,0	valor kg de pet #4	\$1.000,0		
costo total CEMENTO+BASE BTC 25+AGUA+PET					\$8.183.530,5				

Fuente. El Autor

Cuadro 27. Costos totales de Tramo 1 Base +Cemento + PET al 6%

TRAMO 4: BASE+CEMENTO+PET AL 6%									
% CEMENTO	3,663	RESISTENCIA (Mpa) 3,5							
% AGUA	8,1								
% PET	6								
VOLUMEN DEL TRAMO (m3)	54,75								
MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	115413								
%PET-MASA DEL MATERIAL INICIAL (Kg)	6924,78								
PESO INICIAL FINAL (Kg)	108488,22								
VOLUMEN DEL TRAMO FINAL (m3)	51,47								
CANTIDAD DE CEMENTO A USAR (Kg)	3973,9								
CANTIDAD DE AGUA A USAR (ml)	8787,5								
CANTIDAD DE PET A USAR (Kg)	6509,3								
PESO MATERIAL TOTAL (Kg)	127759,0								
COSTOS									
CEMENTO		BASE GRANULAR BTC-25		AGUA		PET			
#BULTOS (50K)	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	m3	VALOR TOTAL	Kg	VALOR TOTAL		
79	\$1.589.569,4	51,47	\$2.058.800,0	8,8	\$88.000,0	6509,3	\$6.509.293,2		
valor unidad bulto de cemento \$	\$20.000,0	valor metro cubico unidad \$	\$40.000,00	valor metro cubico Bogota	\$10.000,0	valor kg de pet #4	\$1.000,0		
costo total CEMENTO+BASE BTC 25+AGUA+PET					\$10.245.662,6				

Fuente. El Autor

4.5.4 Análisis de Resultados Evaluación Económica modelo Constructivo. Para realizar la evaluación económica, se toman los valores totales obtenidos, y se comparan para determinar cuál de las alternativas es la más económica, a continuación se puede observar el resultado obtenido (véase el Cuadro 28 y la Figura 34).

Cuadro 28. Comparación de costos Según Composición de Material para El Pavimento

COMPOSICIÓN DE MATERIALES PARA EL PAVIMENTO	COSTO TOTAL
% CEMENTO 3,146 - % AGUA 8,1 - RESISTENCIA 3,5 Mpa	\$ 3.735.357,00
% CEMENTO 3,333 - % AGUA 8,1 - %PET 2 - RESISTENCIA 3,5 Mpa	\$ 5.984.012,39
% CEMENTO 3,519 - % AGUA 8,1 - %PET 4 - RESISTENCIA 3,5 Mpa	\$ 8.183.530,45
% CEMENTO 3,663 - % AGUA 8,1 - %PET 6 - RESISTENCIA 3,5 Mpa	\$ 10.245.662,60

Fuente. El Autor

Figura 34. Comparación de costos Según Composición de Material para El Pavimento



Fuente. El Autor

Como se puede observar la alternativa más económica para la construcción de un tramo de pavimento en concreto de 10 ml, es la que se compone de base - cemento al 3.146% con agua 8.1%, ya que su costo total será de \$3.735.357, pues como se puede observar cada una de las alternativas con adición de Material PET incrementa su valor en aproximadamente el 60%; esto debido a que el valor comercial de mercado del kilogramo de PET es superior al costo de la base que es

el material que está reemplazando, y que, como se pudo determinar en los resultados de la investigación, al aumentar el porcentaje de material PET, se tiene que aumentar el porcentaje de cemento para que la adherencia a la mezcla sea óptima, por lo cual también se tendría que hacer una mayor inversión en cemento.

De lo anterior, se destaca que, el valor comercial del kilogramo de material PET es elevado, dada su condición de material reciclado, esto debido a que, es una industria que en Colombia aún no se ha desarrollado a plenitud, pues no se han realizado suficientes investigaciones que permitan identificar alternativas para su reutilización, y en este caso, como material para construcción en ingeniería civil; sin embargo, es bueno considerar que la alternativa que se presentó en esta investigación contribuye con el manejo de este material en pro de la conservación de medio ambiente, por lo que se debería considerar incentivar el desarrollo de esta industria en el país.

5. CONCLUSIONES

Finalizada la investigación se puede concluir que el material PET es muy estable e inerte, además es fuerte, resistente al ataque de microorganismos, no reacciona con diferentes sustancias y no se degrada biológicamente, así mismo es un material liviano que se puede reciclar en un 100% convirtiéndose de esta manera en un material amigable con el planeta, generando impactos ambientales positivos en cuando a su manejo post consumo, ya que puede usarse en diferentes actividades como por ejemplo en el sector de la construcción.

Se pudo establecer que la base granular utilizada para esta investigación presentó características optimas en sus diferentes componentes, ya que cumplió con todos los requisitos de los agregados para base tratada con cemento según normas INVIAS-13, teniendo una base de alta calidad, que inclusive supero los requerimientos, así mismo, tratarse de un suelo que se encuentra en el grupo A1A no posee índice de plasticidad, generando de esta manera, mayor nivel de confiabilidad a los resultados del ensayo de resistencia a la comprensión para base cemento con adición de PET.

Con la realización de las pruebas de laboratorio, se pudo establecer que, gracias a sus propiedades de impermeabilidad, es decir que no absorbe agua, el PET no modifica ninguna parte de humedad de la base granular, por tanto, ésta se mantiene constante a la óptima de acuerdo a los resultados de las comprobaciones de humedad realizados, obteniendo una mezcla que se comporta igual que la mezcla natural de base cemento, endureciéndose a los 7 días y manteniendo su volumen, sin presentar ningún cambio significativo que muestre reacciones negativas del PET al ser usado en la base.

Por otro lado, al hacer la combinación de diferentes porcentajes de PET con diferentes porcentajes de cemento, se encontró que a mayor cantidad de PET, es decir 6% adicionado, se requiere mayor porcentaje de cemento 5%, combinación que permite tener una relación óptima máxima de resistencia a la comprensión de 6,646 MPa, evidenciándose de esta manera que se puede usar como un método de construcción que se ajusta a los parámetros máximos permitidos estipulados en el Artículo 351 – 13 que es de 7 MPa.

Así mismo, el material PET reciclado al 2%, puede ser usado como aditivo para las bases granulares estabilizadas con cemento, reemplazando el material No. 4, manteniendo la resistencia a la comprensión óptima mínima exigida por la normatividad colombiana Artículo 351 – 13 que es de 3.5 MPa, con el menor porcentaje de cemento usado equivalente al 3,333%; haciendo que esta alternativa sea una amigable con el planeta al poder reutilizar el material PET que como se sabe, es un material que tarde aproximadamente 700 años en degradarse, y que por presentar propiedades como impermeabilidad, resistencia a la fluencia, dureza de la superficie, estabilidad dimensional, buenas propiedades

de fricción por deslizamiento y resistencia a la abrasión, entre otras, puede permitir que los pavimentos tengan un mejor rendimiento.

Se concluye que la utilización de PET en la construcción de la base cemento para pavimentos es viable y genera impactos positivos al medio ambiente, ya que en Colombia la producción de este material alcanza alrededor de 11 millones de toneladas y de éste solo se reutiliza el 17% de este material, por lo que su reciclaje y posterior reutilización como material de construcción aumentará este porcentaje significativamente, disminuyendo por consiguiente la generación de residuos que son desechados en rellenos o dejados en los ecosistemas contaminando el ambiente.

Finalmente se concluye que, utilizando la combinación óptima sugerida de base tratada con cemento al 3.33% adicionada con 2% de material PET, se obtendrá un material de calidad con una resistencia a la compresión dentro de los parámetros mínimos exigidos por la normatividad colombiana para bases estabilizadas para pavimentos, cuyos costos disminuirán pues se usará el mínimo de cemento posible, y el máximo de PET que al ser un material reciclado tendrá un costo menor que el del cemento, en diferencia con una base estabilizada con cemento los costos aumentan debido a que el kilogramo del pet comprado con el kilogramo de cemento es relativamente mas costoso.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar nuevas investigaciones en las que se analice el comportamiento de la base granular en su estado natural y adicionada con material PET, para determinar si la resistencia a la compresión tiene un mejor comportamiento, con lo que se podrá reemplazar no sólo material granular sino el cemento por PET reciclado como material estabilizante para bases granulares para pavimentos.

Se recomienda realizar estudios en los que se analice el proceso constructivo de pavimentos usando la combinación de base estabilizada con cemento al 3.33% con adición de material PET reciclado al 2%, para verificar su rendimiento en comparación con un pavimento construido con base cemento natural.

Realizar estudios de verificación de los costos producción de bases granulares estabilizadas con cemento adicionada con material PET para comprobar si el uso de este material permite reducir el valor costos en los procesos constructivos de pavimentos.

Se plantea proponer una ley en la cual se subsidien las construcciones que utilicen materiales reciclados o que toda construcción deba tener un porcentaje de utilización de materiales reciclados los cuales contribuyen a la sostenibilidad del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, A.F.; RAZALI, A.R. y RAZELAN, I.S. Utilization of polyethylene terephthalate (PET) in asphalt pavement: A review. En: Materials Science and Engineering. Abril, 2017. no. 203.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS AASHTO. Guide for Design of Pavement Structures. Washington: AASHTO, 1993

ARCE, Mario. Bases estabilizadas con cemento: Algunos comentarios sobre sus ventajas e inconvenientes. En: PITRA, Boletín Técnico. Agosto – Septiembre, 2011. vol 2, no, 19.

ÁVILA CÓRDOBA, L.; MARTNEZ BARRERA, G.; BARRERA DÍAZ, C.; UREÑA NUÑEZ, F. y LOZA YÁÑEZ, A. PET de desecho y su uso en concreto [en línea]. Barcelona: Omnia Science [citado 28 agosto, 2017], disponible en Internet: <URL: <http://omniascience.com/monographs/index.php/monograficos/article/viewFile/246/145>>

BAÑON BLÁZQUEZ, Luis. Manual de carreteras. Volumen II: construcción y mantenimiento. Provincia de Alicante: Universidad de Alicante, 2000.

BAÑÓN, Luis y BEVIÁ, José. Manual de carreteras [en línea]. Alicante: Univesidad de Alicante [citado 12 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1787/1/MC_Tomo_2.pdf>

BLOG TECNOLOGÍAS DE PLÁSTICOS. PET [en línea]. Bogotá: Blogspot [citado 11 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro+3089010>>

BUSTOS ORTIZ, Daniel Fernando y SARMIENTO SALAZAR, Jhonatan Leonardo. Análisis del comportamiento de base granular estabilizada con cemento sustituyendo con material no biodegradable tereftalato de polietileno (PET) en la fracción del agregado que pasa el tamiz #4 y se retiene en el #16. Bogotá: Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2016.

ENCICLOPEDIA BRITÁNICA. Tereftalato De Polietileno PET [en línea]. Londres: La Enciclopedia [citado 20 marzo, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.britannica.com/science/polyethylene-terephthalate>>

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction [en línea]. New Jersey: Department of Transportation [citado 4 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/app5.cfm>>

FLORES LOZA, Gilberto. Efecto de fatiga en un material de base estabilizada con cemento (Pavimento flexible). México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería Civil. Trabajo de maestría, 2011.

HANSEN, Richard W. Cenizas volantes [en línea]. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Cenizas%20Volantes/Cenizas%20volantes.pdf>>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Artículo 340 – 13. Base estabilizada con emulsión asfáltica. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Artículo 351 – 13. Base tratada con cemento. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Artículo 501 – 13. Suministro de cemento hidráulico. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada INV E-148-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato micro-deval INV E-238-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados INV E-211-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Determinación del límite líquido de los suelos INV E-125-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Determinación del valor del 10% de finos INV E-224-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Equivalente de arena de suelos y agregados finos INV E-133-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Índices de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras INV E-230-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

----- . Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E-126-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

------. Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso INV E-227-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

------. Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm por medio de la máquina de los Angeles INV E-218-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

------. Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio INV E-220-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

------. Valor de azul de metileno en agregados finos INV E-235-13. Bogotá: INVIAS, 2013.

LONDOÑO NARANJO, Cipriano y ALVAREZ PABÓN, Jorge Alberto. Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Medellín: Instituto Colombiano de Productores de Cemento, 2008.

LÓPEZ ORTIZ, José Alberto. Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET). Envigado: Escuela de Ingeniería de Antioquia. Facultad de Ingeniería Civil. Modalidad trabajo de grado, 2013

MADRIGAL GUZMÁN, José Fernando y SHASTRI, Ranganath. Manual de plásticos para diseñadores [en línea]. Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <http://evirtual.uaslp.mx/Habitat/innobitat01/CAHS/Art%C3%ADculos/MANUALES/Manual%20de%20PI%C3%A1sticos%20para%20dise%C3%B1adores%20Shastri%20Corr%204.pdf>>

MISSIONS ARIZONA. El uso de la cal [en línea]. México: La Empresa [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://missions.arizona.edu/sites/default/files/5%20Soria%20-%20Use%20of%20Lime.pdf>>

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería para pavimentos para carretera. 2 ed. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002.

MORA CHACÓN, Wbeimar Fabián. Concreto Ecológico a Partir de Material PET, Vidrio y Tapas de Bebidas Refrescantes y Alcohólicas. En: Boletín Ambiental Instituto de Estudios Ambientales IDEA. Junio, 2016. no. 31.

MUÑOZ PÉREZ, Liliana. Estudio del uso del polietileno tereftalato (PET) como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad De Ingeniería. Modalidad trabajo de grado, 2012.

NACIONAL LIME ASSOCIATION. Manual de estabilización de suelo tratado con Cal: Estabilización y modificación con cal [en línea]. Lima: La Asociación [citado 27 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf>

PÉREZ, Leonardo. Características Del PET (Poli Etiléno Tereftalato) [en línea]. Bogotá: Blogspot [citado 20 febrero, 2018]. Disponible en Internet: <URL: <https://reciclajesleonardo.com/2012/03/01/caracteristicas-del-pet-poli-etileno-tereftalato/>>

PINZÓN CORTÉS, Eduardo; MORA ARCINIEGAS, Luis Carlos y MENDIETA SALINAS, Yamid. Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. En: Revista Ingenieros Militares. Julio – noviembre, 2016. no. 11.

QUIMINET. Todo lo que quería saber del PET [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 11 septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.plastico.com/temas/En-Colombia,-el-reciclaje-de-PET-botella-a-botella-tiene-futuro+3089010>>

RICO RODRÍGUEZ, A., y DEL CASTILLO, H. La ingeniería de suelos en las vías terrestres. Bogotá: Arcos de Belén, 1974

RONDON QUINTANA, Hugo Alexander y REYES LIZCANO, Fredy Alberto. Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá: ECO, 2015.

SAKTHI KALA, J.; NANTHINI, T. y MAHENDRAN, K. Soil stabilization by using plastic waste. En: SSRG International Journal of Civil Engineering. April – June, 2017. Special Issue.

SALAZAR DELGADO, Jorge. Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047). En: Métodos y Materiales. Noviembre – diciembre, 2011. vol. 1.

SÁNCHEZ RIVERA, Sergio Enrique. Ampliación y reconstrucción de la carretera federal México-Puebla de la ciudad de Cholula a Santa María Zacatepec, km. 98+300 al km. 103+300 [en línea]. México: Universidad de las Américas Puebla [citado 29 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/sanchez_r_se/capitulo2.pdf>

TAHER BAGHAEI, Moghaddam; MOHAMED REHAN, Karim y MEHRTASH, Soltani. Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. In: Journal of Engineering Science and Technology. Junio – Agosto, 2013. vol. 8, no. 3.

TECNOLOGÍA CLASS. Cemento [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 12 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://technologyclass.wikispaces.com/file/view/EL+CEMENTO.pdf>>

THE ASPHALT INSTITUTE. Asphalt Manual. Lexington: Engineering Research, 2007. 480 p.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Stabilized Base Courses for Advanced Pavement Design Report 1: Literature Review and Field Performance Data [en línea]. Virginia: National Technical Information Service (NTIS) [citado 3 octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: https://www.faa.gov/about/initiatives/maintenance_hf/library/documents/media/human_factors_maintenance/courses.pdf>

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA. Bases estabilizadas con asfalto espumado [en línea]. San José: Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales [citado 27 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/sitio-nuevo/images/campanas/pavimentos-verdes/ficha-2.pdf>>

VEGA QUIRÓS, Mónica. Variación de la resistencia de una subbase granular debido a la variación del contenido de finos plásticos en granulometrías controladas. En: Revista Infraestructura Vial. Marzo- abril, 2014. vol. 16, no. 27.