Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Civil | Facultad de Ingeniería

2015

Base estabilizada con cemento, modificada con pet reciclado

Liz Paola Meneses Rincón
Universidad de La Salle, Bogotá

Lizeth Michelle Fuentes Campos
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil

 Part of the Civil Engineering Commons

Citación recomendada

Meneses Rincón, L. P., & Fuentes Campos, L. M. (2015). Base estabilizada con cemento, modificada con pet reciclado. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/301

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO, MODIFICADA CON PET RECICLADO

LIZ PAOLA MENESES RINCÓN

LIZETH MICHELLE FUENTES CAMPOS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ, D, C.

2015

BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO MODIFICADA CON PET RECICLADO

LIZ PAOLA MENESES RINCON

LIZETH MICHELLE FUENTES CAMPOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

Ingeniero Civil

Director temático

Ing. Sandra Elodia Ospina Lozano

Asesora metodológica

Magister. Marlene Cubillos Romero

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL BOGOTÁ D.C.

2015

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá, Abril de 2015

Agradecimientos

Primero que todo a Dios que sin él no podríamos llevar a cabo ninguno de nuestras metas o proyectos propuestos. A la ingeniera Sandra Ospina por acompañarnos y guiarnos en esta etapa de nuestras vidas, que sin sus aportes, guías y consejos no se hubiese podido llegar al punto en el que estamos. A la profesora Marlene Cubillos quien desde nuestro inicio universitario siempre ha estado a nuestro lado para darnos esa voz de aliento cuando hemos sentido desfallecer, y por qué con sus conocimientos en la parte de lectoescritura nos ha apoyado demasiado.

También le queremos a agradecer a todos y cada uno de los miembros de la Universidad de La Salle por prestarnos su ayuda y apoyo en cualquiera de los ámbitos que siempre necesitamos de ustedes, porque, siempre estuvieron dispuestos a brindarnos su apoyo sin ningún tipo de objeción.

Finalmente a nuestras familias que son nuestra motivación a seguir adelante cada día, que son esas personas que pase lo que pase siempre han estado y estarán ahí presentes para darnos la mano siempre que los necesitamos.

Dedicatoria

A Dios ser omnipotente e imperecedero, que es fortaleza, motivación y esperanza cada día de mi vida; que con su espíritu llena mi existencia de ilusión y fortaleza para vencer cada reto, alcanzar metas y desarrollarme en el camino de la verdad, el conocimiento y la fe.

A mis padres Pablo Elías Meneses Toloza y Elizabeth Rincón Martínez, a mis hermanos Leopoldo Meneses Rincón y Pablo Andrés Meneses Rincón, a mis sobrinos y familiares, quienes en todo momento a lo largo de este proceso apoyaron mis ideas y brindaron soluciones en momentos desesperanzadores donde todo se veía sin salida.

A Jhenifer Quintero y Doris Rincón que con sus conocimientos y aportes a mi vida universitaria hicieron posible culminar satisfactoriamente.

A mis docentes que desde el inicio del proceso fueron moldeando en mí una mejor persona capaz de servir a la sociedad desde mi vida profesional.

A todos y cada una de las instituciones que de una u otra forma estuvieron vinculados a mi proceso y trayectoria de conocimientos, quienes ampliaron mi perspectiva y visión en el logro de mi título profesional y fueron fuente de apoyo y realización en cada etapa.

Liz Paola Meneses Rincón

Dedicatoria

Primero que todo a Dios el ser supremo que siempre a pesar de todas las dificultades me ha tomado de la mano y me ha enseñado que no hay obstáculo grande que me pueda llevar a dejar de soñar y de realizar cada una de las metas que me he propuesto en mi vida.

A mis padres Pedro José Fuentes Velandia y Alba Cenia Campos Pérez, a mi hermana y confidente Silvia Fuentes Campos y a mi sobrinito, quienes siempre me han apoyado en cada uno de los proyectos que emprendo y sin importar nada siempre me dan palabras de aliento para seguir adelante aun cuando he pensado que las cosas ya no tienen salida.

A mis amigas Jenny Riaño y Judith Hurtado, quienes siempre han estado a mi lado durante todo mí camino por esta etapa, por que la han sentido tan suya como yo, que sin importarles nada me han ayudado y me han dado palabras de aliento cuando más las he necesitado.

Finalmente a todas las personas que indirectamente han estado presentes en esta gran etapa de mi vida, porque cada uno son sus aportes han ayudado a este proyecto.

Lizeth Michelle Fuentes Campos

Tabla de Contenido

Introducción 1

Capítulo 1: Generalidades de la Investigación 2

1.1 Línea – Grupo – Centro 2

1.2 Descripción del Proyecto 2

1.2.1 Planteamiento del Problema 2

1.2.2 Formulación del Problema 3

1.2.3 Justificación 3

1.2.4 Objetivos 4

Capítulo 2: Marco Referencial 4

2.1 Antecedentes Teóricos 4

2.2 Marco Teórico 6

2.3 Marco Conceptual 10

2.4 Marco Normativo 11

2.5 Metodología 12

2.6 Tipo de Investigación 15

2.7 Diseño de Investigación 15

Capítulo 3: Caracterización 16

3.1 Caracterización Física del Material 16

3.1.1 Proceso de trituración del PET. 16

3.1.2 Caracterización Física del Material. 17

3.1.3 Límite Líquido de los Suelos - I.N.V. E – 125 – 07 19

3.1.4 Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - I.N.V. E – 126 – 07 21

3.1.4.1 Material con 5%,10% y 15% de PET 26

3.1.5 Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos I.N.V. E – 213 – 07 26

3.1.6 Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la Máquina de los Ángeles – I.N.VE – 218 – 07 28

3.1.7 Equivalente de arena – I.N.VE – 133 – 07 29

3.1.8 Porcentaje de Caras Fracturadas – I.N.V.E – 227 – 07 30

3.1.9 Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras I.N.V.E – 230 – 07 31

3.1.10 Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o magnesio – I.N.V.E – 220 – 07 .....

Capítulo 4: Diseño de Mezcla Suelo-Cemento 33

4.1 Relaciones Humedad – Masa Unitaria de Mezclas de Suelo-cemento I.N.V. E – 806 – 07 33

4.1.1 Mezcla de suelo – cemento 35

4.1.2 Mezcla de suelo-cemento – 5% de PET 36

4.1.3 Mezcla suelo – cemento – 10% de PET 38

4.1.4 Mezcla suelo – cemento – 15% de PET 39

4.2 Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo-cemento I.N.V. E809 – 07 40

4.2.1 Mezcla Suelo – Cemento 43

4.2.2 Mezcla Suelo – Cemento – 5% PET 46

4.2.3 Mezcla Suelo – Cemento – 10% PET 47

4.2.4 Mezcla Suelo – Cemento 15% PET 48

Capítulo 5: Análisis de resultados 51

Conclusiones 57

Bibliografía 59

Anexos 61

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland 18

Tabla 2. Requisitos granulométricos del material para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland. 19

Tabla 3. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo-cemento según la PCA (Portland Cement Association) 34

Tabla 4. Resultados - Ensayo de Compactación y Resistencia a la Compresión..... 50

Tabla 5. Resumen de Ensayos – Características Físicas 52

Lista de figuras

Figura 1. Curva de Fluidez - Material Granular..... 20

Figura 2. Clasificación del suelo con respecto al límite líquido e índice de plasticidad. Fuente. Autoras .....

Figura 3. Carta de plasticidad AASHTO y SUCS Fuente. Autoras 23

Figura 4. Clasificación del Suelo – Material Natural. Fuente. Autores 25

Figura 5. Gráfica curva granulometrica- Material Natural. Fuente. Autoras..... 27

Figura 6. Gráfica curva granulométrica PET 28

Figura 7. Curva de compactación para la mezcla suelo – cemento..... 36

Figura 8. Curva de compactación de suelo-cemento-5% de PET 37

Figura 9. Curva de compactación de la mezcla suelo – cemento – 10% de PET 38

Figura 10. Curva de compactación de suelo-cemento-15% de PET 39

Figura 11. Gráfica Resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento 45

Figura 12. Gráfica resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-5% PET 46

Figura 13. Gráfica resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-10% PET 47

Figura 14. Gráfica Resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-15% PET 48

Figura 15. Resistencia Vs %PET para el 5% Cemento. Fuente. Autoras 53

Figura 16. Resistencia Vs %PET para el 7% Cemento. Fuente. Autoras 54

Figura 17. Resistencia Vs %PET para el 9% Cemento. Fuente. Autoras 54

Figura 18. Gráfica densidad seca Vs %PET. Fuente. Autoras 55

Figura 19. Gráfica % óptimo de cemento Vs %PET. Fuente. Autoras 56

Lista de imágenes

Imagen 1. 26

Imagen 2. 26

Imagen 3. 41

Imagen 4. 41

Imagen 5. 41

Imagen 6. 41

Imagen 7 48

Imagen 8. 42

Imagen 9. 43

Imagen 10. 43

Lista de Anexos

- Anexo B. Formatos de laboratorio.
- Anexo C. Tabla Análisis Granulométrico Material Natural.

NOTA: Considerando la gran extensión de las normas y especificaciones indicadas anteriormente, éstas son presentadas en medio magnético. Adicionalmente, dichos documentos pueden ser consultados en la página Web del INVIAS (www.invias.gov.co) en la sección Documentos Técnicos (Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras).

Introducción

Los caminos estabilizados se han utilizado desde civilizaciones antiguas como la Inca o la Azteca, como parte clave del desarrollo de diversas actividades. Con el tiempo se crearon grandes condiciones para la realización de muchos experimentos en mezclas de suelo y cemento que mostraron las posibilidades de aprovechar los suelos existentes, modificados en mayor o menor grado para así después ser compactados.

El suelo-cemento modificado con PET reciclado en bases estabilizadas, es un tema que no se ha manejado, por lo tanto no se tienen antecedentes de dichos trabajos; por esto, con este proyecto se pretende analizar cada una de las propiedades de este material como modificador, en comparación con los modificadores normales utilizados usualmente en estructuras de pavimentos.

Por esto se llevará a cabo una serie de laboratorios experimentales donde se estudiará cada uno de los materiales y sus componentes, para así llegar a un resultado final de la recomendación de un nuevo material como modificador para bases.

Capítulo 1: Generalidades de la Investigación

1.1 Línea – Grupo – Centro

Modelación – INDETEC

En la línea de nuevos materiales para carreteras del programa ingeniería civil de la Universidad de la Salle.

El objetivo general de esta línea es investigar, desarrollar e implementar modelos físicos, numéricos y analíticos para estudiar el comportamiento de los materiales y sus propiedades. Dentro de este objetivo esta investigar el estudio y comportamiento del suelo-cemento con aditivos modificadores y estudiar sus propiedades.

1.2 Descripción del Proyecto

1.2.1 Planteamiento del Problema

El suelo-cemento es un material que se ha venido utilizando a través de los años, específicamente en estructuras de pavimentos. En la actualidad se ha venido implementando con mayor uso, ya que tanto los consultores como las entidades encargadas de la administración vial coinciden en que la demanda de un transporte de calidad requiere una mayor durabilidad de los materiales, estructuras de pavimentos y subrasantes.

Para esto se va a utilizar un material reciclable para la modificación del suelo-cemento, lo que se busca con esto es disminuir el impacto ambiental que tiene la explotación de bancos de material

para la generación del suelo-cemento, ya que los materiales reciclables por ser reutilizados se enfrentan a menos contaminación para la ciudad.

1.2.2 Formulación del Problema

"La aplicación del reciclado del PET en base estabilizada, puede disminuir el impacto ambiental generado por los métodos convencionales en el uso de agregados pétreos"

1.2.3 Justificación

Esta investigación se quiere llevar a cabo con el fin de explorar cómo se comporta un material reciclable con el suelo-cemento, más específicamente usando PET como modificador.

La idea, es llevar a cabo un modelo experimental simplificado con el fin de analizar cada una de las propiedades y comportamientos de una estructura de pavimento "suelo-cemento".

Este modelo no se ha visto en el país, ya que tradicionalmente se trabaja con cemento, cal, y otros materiales en la estabilización de bases; mientras en este documento se propone el uso de materiales reciclables. Por lo tanto, se quiere ensayar una mezcla utilizando PET y determinar si es posible disminuir el impacto ambiental debido a los gases emitidos y otras sustancias por la utilización de materiales pétreos en la fabricación de una estructura de pavimento.

1.2.4 Objetivos

Objetivo General

Conocer las características físicas y mecánicas del suelo-cemento-PET reciclado y, si es posible, proponerlo como un nuevo material constructivo, cumpliendo con las especificaciones mínimas con las cuales se van a comparar.

Objetivos Específicos

Realizar ensayos de laboratorio necesarios para conocer las propiedades mecánicas del agregado base para el diseño del suelo-cemento.

Diseñar suelo-cemento con tres porcentajes de PET diferentes, utilizando las especificaciones de materiales y de construcción INVIAS 2007 e IDU 2005.

Analizar los resultados obtenidos de la mezcla suelo-cemento-PET para proponer algún uso con fines constructivos en bases estabilizadas con cemento.

Proponer un material alternativo que ofrezca beneficios ambientales, donde se pueda reducir la explotación de material pétreo y el uso de rellenos sanitarios.

Capítulo 2: Marco Referencial

2.1 Antecedentes Teóricos

En Colombia, el estudio del suelo-cemento se ha venido trabajando desde la Segunda Guerra Mundial, con aplicaciones en carreteras con más de 50 años de experiencia. Pero, trabajos como

tal con materiales reciclables PET no tienen antecedentes teóricos en estructuras de pavimentos. En Colombia se han encontrado trabajos con el material de botellas PET, en la construcción de viviendas, fibras textiles y otros.

En nuestro país, desde el año 2002 se conoce la fabricación de fibras textiles por parte de la empresa Fibra Andina en Ibagué con material PET reciclado, para este año se hizo una producción de una camiseta con 2 botellas de dicho material, con proyecciones a realizar otro tipo de prendas como cachuchas y bolsos.

El proyecto de investigación que más se conoce hasta el momento, es el de concreto polimérico PET (CP-PET), fue realizado en Venezuela en el año 2008, quienes estudiaron:

Que dicha mezcla puede utilizarse en la construcción de elementos de obras civiles, cuyas cargas y durabilidad estén limitadas a cierto rango. Se puede utilizar como mezcla para elementos que no requieran de estética o para bloques u otros elementos que no soporten importantes cargas. La densidad del CP-PET es menor que la de los concretos o morteros convencionales lo que provoca que la mezcla sea más liviana, propiedad que la hace interesante en estructuras sometidas a bajas cargas.

Realizando investigaciones de campo, en Perú se encontró que existen trabajos en Concretos Polimérico: a partir de botellas descartables, en donde se trabajó el material PET como pegamento o aglutinante para obtener como producto final un Concreto Polimérico.

Se han realizado otras clases de estabilizaciones del suelo-cemento, como por ejemplo: la estabilización con granos de caucho, en donde se estudian todas y cada una de las caracterizaciones

mecánicas del material, llegando a establecerse como material óptimo para la estabilización de una base con suelo-cemento.

Por esto, se quiere llegar como primera medida a establecer un modelo para Colombia, en cuanto materiales de estructuras de pavimentos, teniendo como referencia las normas Invías colombianas, en donde se habla de las bases estabilizadas con cemento, los distintos ensayos y materiales a utilizar, que como se ha dicho, es lo que comúnmente se usa en el país. Esta medida va a ser utilizada al final y se comparará con el nuevo material PET junto con sus propiedades, para así buscar una solución a los costos y mitigación del impacto ambiental que se tenga en la ciudad.

2.2 Marco Teórico

De acuerdo con lo estudiado, 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 específicas[1].

Este material se puede utilizar como capa de apoyo de otros materiales tratados o como capa resistente. También, esta mezcla se puede realizar en una planta de mezclado, o se puede hacer in situ.

Como base principal del proyecto se usará un material reciclado PET para modificar el suelo-cemento, en bases estabilizadas. Para esto, es necesario tener en cuenta que: la mayoría de estos

[1]. Disponible en: htm#uno>.http://ingeniería-vicil2009.blogspot.com/2010/09/carreteras-de-suelo-cemento.html (19/OCT/11)

pavimentos rígidos son de 15 cm. de espesor, los cuales son puestos en servicio en vías secundarias y vías residenciales.

El suelo-cemento posee como tal unas propiedades estructurales que, básicamente, dependen del tipo de suelo, condiciones del curado y de su edad. A lo largo de la vida útil de diseño de un pavimento de suelo-cemento su resistencia promedio es mucho mayor que los valores dados para los 28 días como lo es común en cualquier tipo de material para pavimentos.

El PET, Polietileno Tereftalato, es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión y a las caídas, además posee alto grado de transparencia y brillo, es reciclable 100%[2].

Este material tiene amplios campos de trabajo, por ejemplo, fibras, tuberías, perfiles, piezas inyectadas y construcción. En pocas palabras es un plástico de alta calidad que se obtiene a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: etileno y paraxileno; este se puede presentar en forma de pequeños *chips*, los cuales se llevan a un proceso de secado y una vez estén secos, son fundidos. Este proceso de calentamiento debe ser controlado de forma gradual para así poder ser moldeados y dar con el tamaño final deseado según se requiera.

El PET, como se decía anteriormente, es un material fácil de reciclar, aunque hace unos diez o quince años existían muy pocos recuperadores de dicho material. Es decir, se obtenía una producción muy pequeña, pero gracias a la evolución del tema del reciclado, han ido surgiendo

[2] Disponible en: http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=305 (19/OCT/11)

más plantas de reciclaje; por lo tanto, han sido bastantes los avances en cuanto a la producción del material.

Este reciclado se puede hacer de dos métodos: el químico y el mecánico, a los cuales también se les puede hacer su recuperación por medio energético.

El primer paso para su reciclado es su selección desde los residuos procedentes de recogida selectiva o recogida común. En el primer caso, el producto recogido es de mucha mayor calidad, principalmente por una mayor limpieza[3].

Para el proceso mecánico, se debe hacer primero una identificación y clasificación del material, después se le debe hacer el respectivo lavado y triturado, separación de partículas pesadas, luego se le debe hacer un lavado final, un secado mecánico y almacenar la escama. En la segunda parte esta escama se seca, se le incrementa su viscosidad y se cristaliza, de esta forma queda lista para transformarla en nuevos elementos.

El proceso de obtención del envase inicia con la extracción del petróleo para después ser refinado, agregándole ácido tereftalato y etilenglicol para hacer una resina en polvo, luego se extruda para obtener los granos de PET.

Este material, como cualquier otro, tiene desventajas y ventajas, por ejemplo, las desventajas que se encuentran son: el costo de los equipos de inyección, o el tiempo de exposición a la intemperie; por otro lado, las ventajas son: su alta claridad, transparencia, barrera a gases u aromas,

[3] Disponible en: http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?idarticulo=305 (19/OCT/11)

además del precio del PET, pues es uno de los materiales reciclables que no ha sufrido tantas fluctuaciones en los últimos cinco años en comparación con otros materiales.

Características generales[4].

Cristalinidad.

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química.
- Buenas propiedades térmicas.
- Totalmente reciclable.
- Ligero.

Para finalizar, se estudiará el impacto ambiental que produce la explotación de estos agregados pétreos, es por esto que se lleva a cabo el estudio del PET para la mitigación de todo este tipo de contaminaciones.

[4] Disponible en: http://www.quiminet.com/artículos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.html (19/OCT/11)

2.3 Marco Conceptual

POLIETILENO: es un material termoplástico blanquecino de transparente a traslucido y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes.

RECICLAJE: es un proceso fisicoquímico o mecánico que consiste en someter a una materia o un producto ya utilizado, a un ciclo de tratamiento total o parcial para obtener una materia prima o un nuevo producto.

PET: es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo crudo, gas y aire, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático.

SUELO-CEMENTO: material elaborado a partir de una mezcla de suelos finos y/o granulares, cemento, agua, la cual se compacta y se cura para formar un material endurecido.

POLÍMEROS: son macromoléculas, formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS: consiste en modificar las propiedades del material existente para hacerlo cumplir, en mejor forma, los requisitos deseados por el suelo, o por lo menos que la calidad obtenida sea la adecuada. Existen varios métodos para la estabilización, el más conocido es la compactación mecánica, pero existen también: el método de drenaje, eléctrico, químico, de calor y calcinación, por la adición de agentes estabilizantes específicos, etc.

ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO: consiste en la adición de cemento hidráulico a una masa de suelo con el objeto de modificar algunas características físicas y mejorar sus condiciones mecánicas. La naturaleza fibrosa del silicato de calcio que se forma cuando los

granos del cemento entran en contacto con el agua genera masas minúsculas que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos. La solución formada por la mezcla de cemento y agua reacciona con las partículas del suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrumar las partículas de suelos con cargas negativamente, produciéndose su floculación por la acción de la gravedad. Si se compacta la mezcla, se produce una producción de calcio con la sílice y alúmina de tamaños coloidales, lo que genera complejos compuestos de silicatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla. A esta acción se le llama puzolánica.

RESISTENCIA: esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento y se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión.

MATERIAL A ESTABILIZAR: el material estabilizado con cemento portland fue un suelo natural proveniente de excavaciones en zonas de préstamo, el cual provenía de canteras localizadas al sur de la ciudad de Bogotá.

2.4 Marco Normativo

Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta las siguientes normas del 2007 del Instituto Nacional de Vías (Invías). *Ver Anexos.*

INV E – 104 - 07: Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.

INV E – 123 - 07: Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

INV E – 125 - 07: Determinación del límite líquido de los suelos.

INV E – 126 - 07: Límite plástico e índice de plasticidad.

INV E – 133 – 07: Equivalente de arena de suelos y agregados finos.

INV E – 213 - 07: Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

INV E – 218 –07: Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5mm por medio de la máquina de los ángeles.

INV E – 227 – 07: Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.

INV E – 230 – 07: Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras.

INV E – 806 - 07: Relaciones de humedad – peso unitario de mezclas suelo-cemento.

INV E – 809 - 07: Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo-cemento.

2.5 Metodología

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.

PRIMERA ETAPA: Revisión de la literatura para Anteproyecto.

Esta etapa inicia con una revisión de los estudios previos acerca de la modificación de bases granulares. Sin embargo, no se encontraron investigaciones previas sobre modificaciones de suelo-

cemento con PET, por consiguiente se toma como punto de partida el Artículo 341 – 07 del Invías para analizar el procedimiento a seguir.

SEGUNDA ETAPA: Realización de ensayos.

Como primer paso de los ensayos se diseñó la mezcla de suelo-cemento según el procedimiento del Artículo 341 – 07 del Invías "Base estabilizada con cemento". Seguidamente, se adicionarán tres diferentes porcentajes de PET (5%, 10% y 15%), estos serán incluidos en solo peso y no en volumen. El material a estabilizar debe cumplir con los requisitos establecidos en el Artículo 341 de 2007 del Invías.

Fueron tomadas las normas del Instituto Nacional de Vías del 2007 (Invías - 07) y el Artículo 341 – 07 para el diseño de la mezcla suelo-cemento, documentos claves para el desarrollo de esta investigación. El material a estabilizar se preparó siguiendo la norma INV E-104 en la cual se describen los procedimientos para la preparación de muestras de suelo por cuarteo.

Después de obtener el valor de la humedad natural, se prosiguió a realizar el ensayo de límites de Atterberg para el suelo natural (0% de PET) y para la mezcla de suelo con las distintas proporciones de PET (5%, 10% y 15%) como lo muestra el Artículo 341 – 07 del Invías. Se tuvo en cuenta las normas INV E – 125 – 07 e INV E – 126 – 07, determinación del límite liquido de los suelos y limite plástico e índice de plasticidad respectivamente.

Al comparar los resultados obtenidos con los requisitos del Artículo en mención, se continuó realizando los ensayos INV E – 213 – 07, análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, INV E – 133 – 07: equivalente de arena de suelos y agregados finos, INV E - 211 – 07:

determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables en los agregados, INV E – 218 – 07: resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5mm por medio de la máquina de los ángeles, INV E – 227 – 07: porcentaje de caras fracturadas en los agregados, INV E – 230 – 07: índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras.

Una vez se obtuvo la clasificación del suelo, se procedió a realizar la mezcla de este material con el cemento de acuerdo a la dosificación indicada en la Tabla 2 de la Norma General de Dosificación de suelo–cemento, elaborada por la PCA. El siguiente ensayo que se realizó fue el INV E – 806 – 07, el cual indica las relaciones de humedad–peso unitario de mezclas suelo-cemento, con el fin de encontrar el porcentaje recomendable de agua y realizar los ensayos posteriores.

A continuación se realizaron las probetas de suelo-cemento y suelo–cemento PET para colocarlas en el cuarto de curado durante siete (7) días y fallarlas a compresión para encontrar el porcentaje óptimo de cemento, fue necesario tomar tres (3) proporciones diferentes de cemento de acuerdo a la misma tabla de la PCA nombrada anteriormente; asimismo, se hicieron tres (3) probetas por cada porcentaje, de tal manera que por cada mezcla de suelo–cemento o suelo–cemento PET se realizaron nueve (9) probetas de acuerdo a la INV E – 808 – 07, preparación en el laboratorio de probetas suelo-cemento y luego de siete (7) días se fallaron como lo indica la INV E – 809 – 07: resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo-cemento.

TERCERA ETAPA: Cálculos y análisis de resultados.

Se clasificó física y mecánicamente la base estabilizada con cemento combinada con PET, con el fin de comparar los resultados obtenidos y determinar cómo influye el PET en las propiedades de la mezcla, determinando las ventajas de usar el material en la estabilización de suelos con cemento, apoyándonos en las tres proporciones de PET utilizadas.

CUARTA ETAPA: Desarrollo del documento.

Se elabora el documento correspondiente para la entrega del trabajo, incluyendo las investigaciones, laboratorios y las recomendaciones necesarias de la investigación.

2.6 Tipo de Investigación

El tipo de investigación a llevar a cabo será una investigación experimental, ya que se adicionó una proporción de PET a una mezcla de suelo-cemento y se realizaron ensayos de laboratorio para determinar sus características de resistencia. Los resultados se compararon con lo obtenidos en los ensayos de una mezcla suelo-cemento sin adición de PET.

2.7 Diseño de Investigación

La siguiente investigación será experimental, ya que se pretende analizar las alternativas de construcción y modificación del suelo-cemento con diferentes porcentajes de PET, con el fin de obtener la alternativa que se ajuste a las especificaciones técnicas para estructuras de pavimentos.

Capítulo 3: Caracterización

El Artículo 341 – 07 de la Norma Invías, "Base estabilizada con cemento" fue el documento de referencia para los ensayos realizados para el desarrollo de la presente investigación.

La Norma INV E – 104 procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo, permitió el examen visual del material (100 Kg. aproximadamente).

El Artículo 341 – 07 el cual señala que: "El material por estabilizar con cemento portland podrá provenir de la escarificación de la capa superficial existente, o ser un suelo natural proveniente de excavaciones o zonas de préstamo, o agregados locales de baja calidad, o escorias, o mezclas de ellos." Es la base de la selección del material.

Para los ensayos de laboratorio, se tuvo en cuenta las condiciones que se querían obtener para el servicio óptimo en obra y el menor costo de la misma, sin alterar las condiciones y características requeridas para su uso.

3.1 Caracterización Física del Material

3.1.1 Proceso de trituración del PET.

Como se mencionó, el material adicionado a la mezcla de suelo-cemento fue partículas de PET, el cual al comienzo de la investigación se quería implementar un método de triturado pero con el desarrollo de la investigación se decide utilizar el material ya triturado el cual fue suministrado por la empresa ubicada en la Av. Cali, encargada de recolectar y triturar las botellas que son rechazadas por imperfectos. El material trabajado es una partícula de un tamaño entre 0.42 y 9.5 mm. Actualmente existen varias clases de PET para esta investigación se utilizó el tipo de PET 1

este es utilizado como materia prima para volver a crear botellas para envases como gaseosas, detergentes, entre otros.

3.1.2 Caracterización Física del Material.

El material natural trabajado corresponde a un material que proviene de excavaciones en zonas de préstamo, el cual fue suministrado por la Universidad de la Salle. Se realizaron ensayos exigidos por el ART.341-07, mediante aplicaciones porcentuales de PET, que permitieron consolidar una mezcla de suelo-cemento PET, estos ensayos determinaron los valores de algunas características del material, para de esta manera evaluar la posibilidad de ser utilizado en la estabilización de suelos.

Se realizaron los ensayos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para el suelo natural y para los tres suelos con porcentajes de PET de 5%, 10% y 15% respectivamente, como lo indica la Tabla 1.

A continuación se realizó el ensayo de granulometría con el fin de garantizar que el material se encontrara dentro de los límites señalados en la Tabla 2.

Adicional a esto, se realizaron los ensayos de índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras, porcentaje de caras fracturadas en los agregados, equivalente de arena de suelos y agregados finos, resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5mm por medio de la máquina de los ángeles

Realizando una comparación bibliográfica, ya que los laboratorios se realizaron bajo el Artículo 341-07: Norma que se encontraba vigente en la realización de estos ensayos, con el Artículo 350-13: Norma vigente, se puede concluir que las características del material están enmarcadas a una gradación tipo B.

Tabla 1. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland

ENSAYO	**NORMA**	**REQUISITO**
	ENSAYO INV	**(%)**
Limpieza		
Límite Líquido. % máximo	E – 125	35
Índice de plasticidad. % máximo.	E - 125, 126	15

Fuente: Artículo 341-07. INVIAS

Tabla 2. Requisitos granulométricos del material para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland.

TAMIZ		PORCENTAJE QUE PASA (%)
NORMAL	ALTERNO	
4.75 mm	Nº 4	Mínimo 60
75 µm	Nº 200	Máximo 50

Fuente: Artículo 341-07. INVIAS

3.1.3 Límite Líquido de los Suelos - I.N.V. E – 125 – 07

El límite líquido es la cantidad de humedad que se encuentra en el suelo, y que se expresa en porcentaje del peso del suelo seco existente, en el límite entre el estado plástico y el estado líquido del mismo. Este límite se define mediante el proceso de la realización de una mezcla de suelo-agua depositada en la cápsula de casa grande con una profundidad de 1cm, se divide la pasta con un ranurador y se procede a observar la unión de las dos mitades, cuando la cápsula que la contiene golpea 25 veces desde una altura de 1cm., a la velocidad de 2 golpes por segundo. Para la preparación de la muestra, nos basamos en la norma I.N.V. E 104-07.

Posteriormente el material fue tamizado utilizando el tamiz Nº 40, se tomó una muestra de 100 gramos de material y arrojó los siguientes resultados:

Material Natural

En la *Figura 1* se muestra la curva de fluidez, donde se relacionó, en el eje vertical con escala aritmética, el contenido de humedad del material en porcentaje luego de 24 horas de secado en el horno con una temperatura de 110°C y en el eje horizontal con escala logarítmica, el número de golpes necesarios para cerrar la ranura aproximadamente 13 mm en la cazuela.

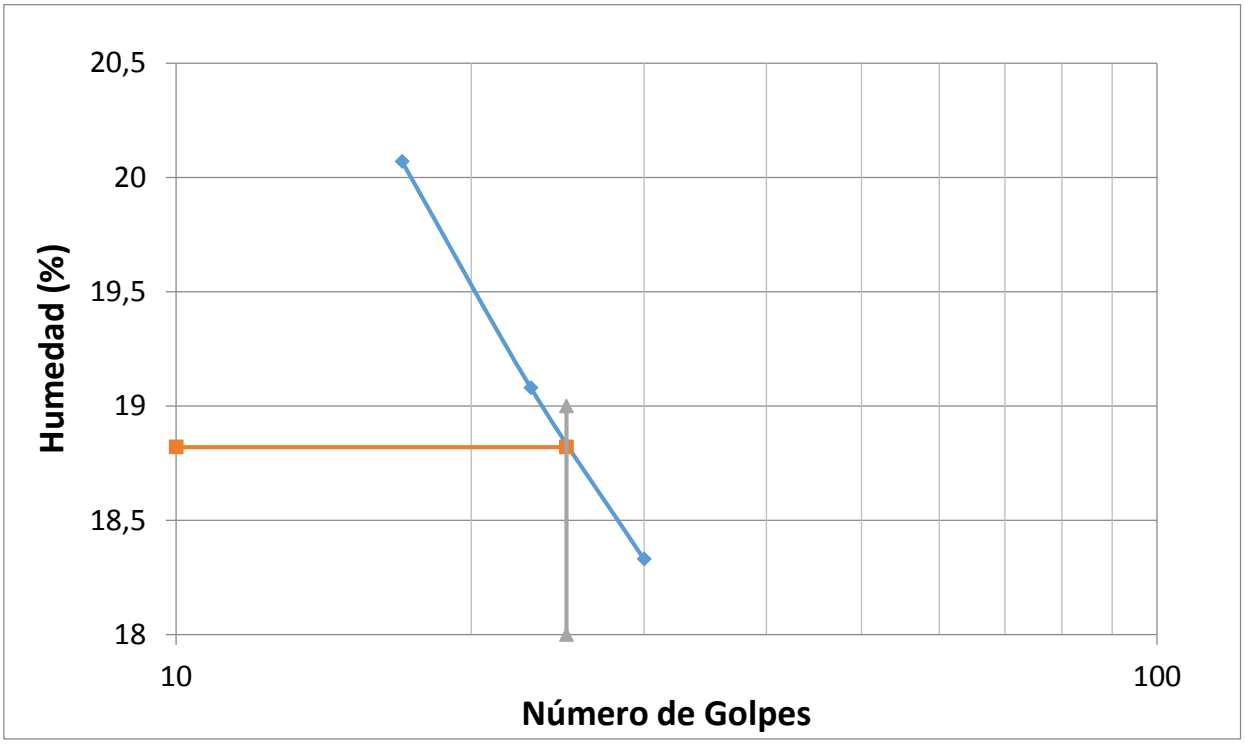


Figura 1. Curva de Fluidez - Material Granular

La curva de fluidez muestra que el límite líquido del material granular es del 18.82%, cumpliendo con lo estipulado en la Tabla 1 donde se manifiesta que el límite líquido debe ser inferior a 35% para que el material pueda ser estabilizado con cemento.

Material con 5%, 10% y 15% de PET

Para este material no era necesario realizar este ensayo debido a que no cumplía con los requisitos mínimos los cuales eran que la muestra a caracterizar debía ser la que pasara el tamiz No 40. Y el material PET con el que se trabajó se retenía totalmente en el tamiz No 40.

Sin embargo se realizó el ensayo para revisar el comportamiento del PET con la mezcla de suelo sin obtener ningún resultado ya que no se pudo hacer homogénea la masa para realizar dicho ensayo.

3.1.4 Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - I.N.V. E – 126 – 07

El limite plástico en los suelos es el contenido más bajo de agua que tiene dicho material para que pase de un estado semisólido a sólido; a continuación se describe el procedimiento que permitió determinar el límite plástico del material utilizado para el desarrollo del trabajo de investigación.

Los ensayos de límite líquido y límite plástico se realizaron el mismo día, por consiguiente el material que se usó fue tomado de la muestra que se tenía en el laboratorio dispuesto para realizar los laboratorios de caracterización.

Para la clasificación del suelo se debe tener en cuenta los valores del índice de plasticidad y el límite líquido, con el fin de identificar el grupo al que pertenece el material (Figura 2) y (Figura 3) correspondientes a la carta de plasticidad AASSHTO y SUCS. Una vez identificado el grupo, se

toma la tabla PCA que nos indica el porcentaje de cemento que se debe adicionar a los próximos ensayos.

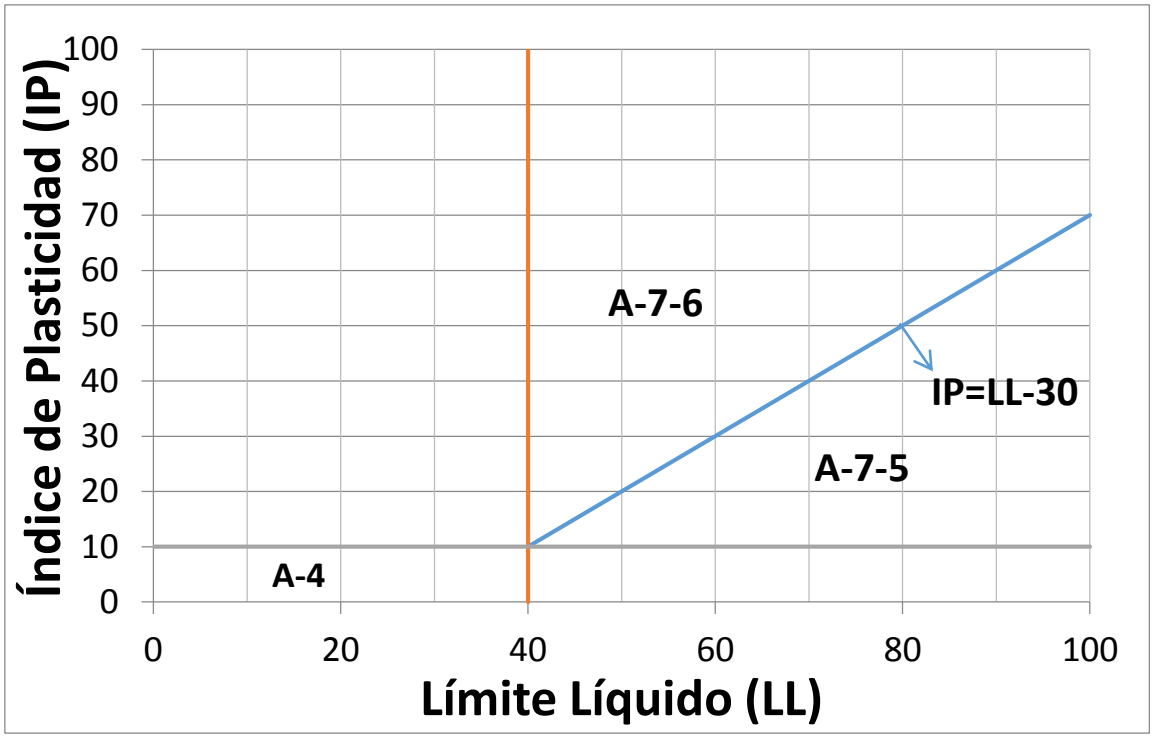


Figura 2. Clasificación del suelo con respecto al límite líquido e índice de plasticidad. Fuente. http://www.academia.edu/8646933/CARTA_DE_PLASTICIDAD

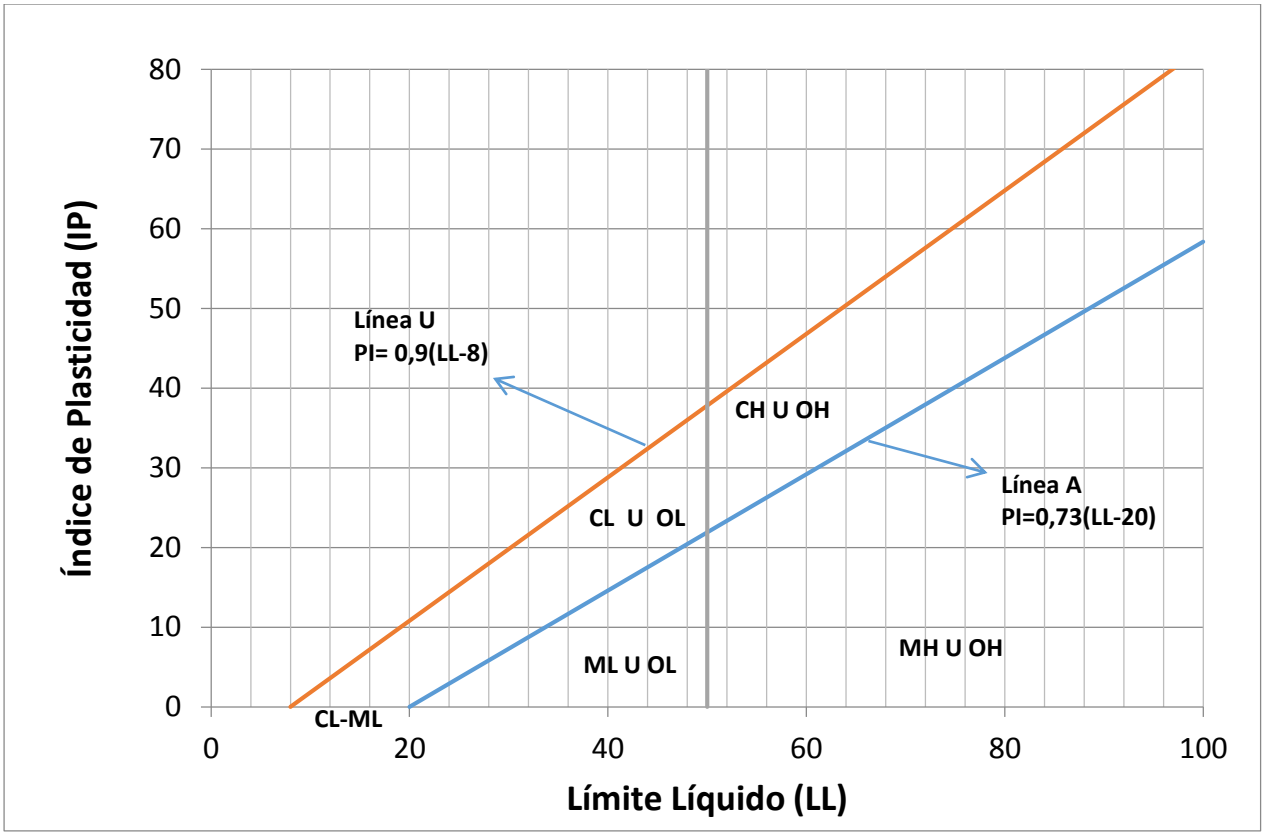


Figura 3. Carta de plasticidad AASHTO y SUCS Fuente. http://www.academia.edu/8646933/CARTA_DE_PLASTICIDAD

El método utilizado es establecido por la Norma I.N.V. E – 126 – 07, el cual es el de moldeo manual de rollos de suelo. Los resultados de este ensayo fueron los siguientes:

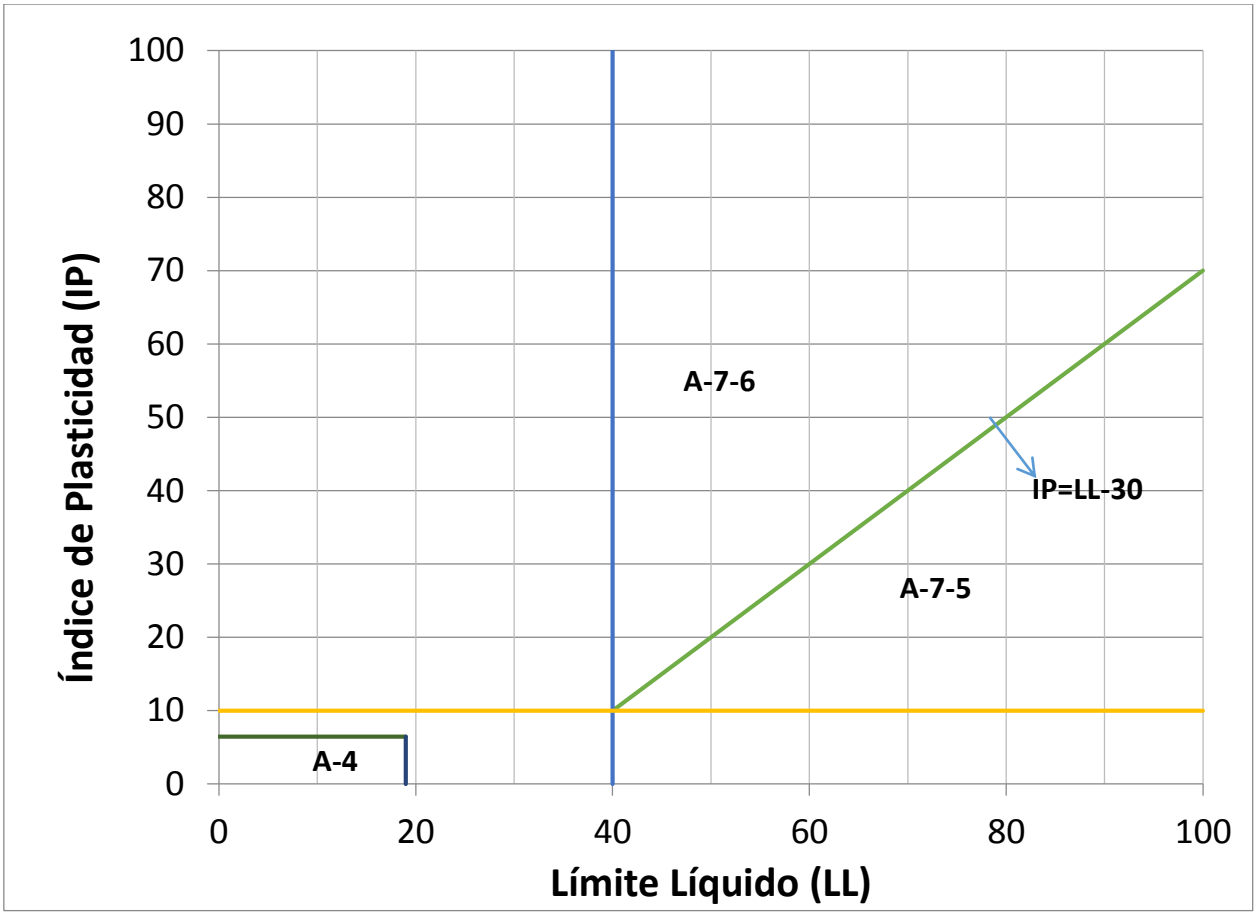
Material Natural

Se tomaron dos muestras de los rollos de suelo cuyo diámetro fue de aproximadamente 3mm y se tomó: rodando el material entre la palma de la mano y una superficie lisa; cada una de las muestras fue mayor de 20 gramos para promediar y después de 24 horas se tomaron los pesos para realizar los cálculos de límite plástico e índice de plasticidad de acuerdo a la siguiente formula:

$$Limite\ Plástico = \frac{Masa\ de\ agua}{Masa\ del\ suelo\ seco} * 100$$

$$Indice\ de\ plasticidad:\ Límite\ liquido - Límite\ plástico$$

En la Figura se indica la clasificación del suelo, basada en la Carta de Plasticidad de la AASTHO y SUCS. Para identificar la clasificación del suelo se utilizó el color morado para indicarlo en estas figuras.



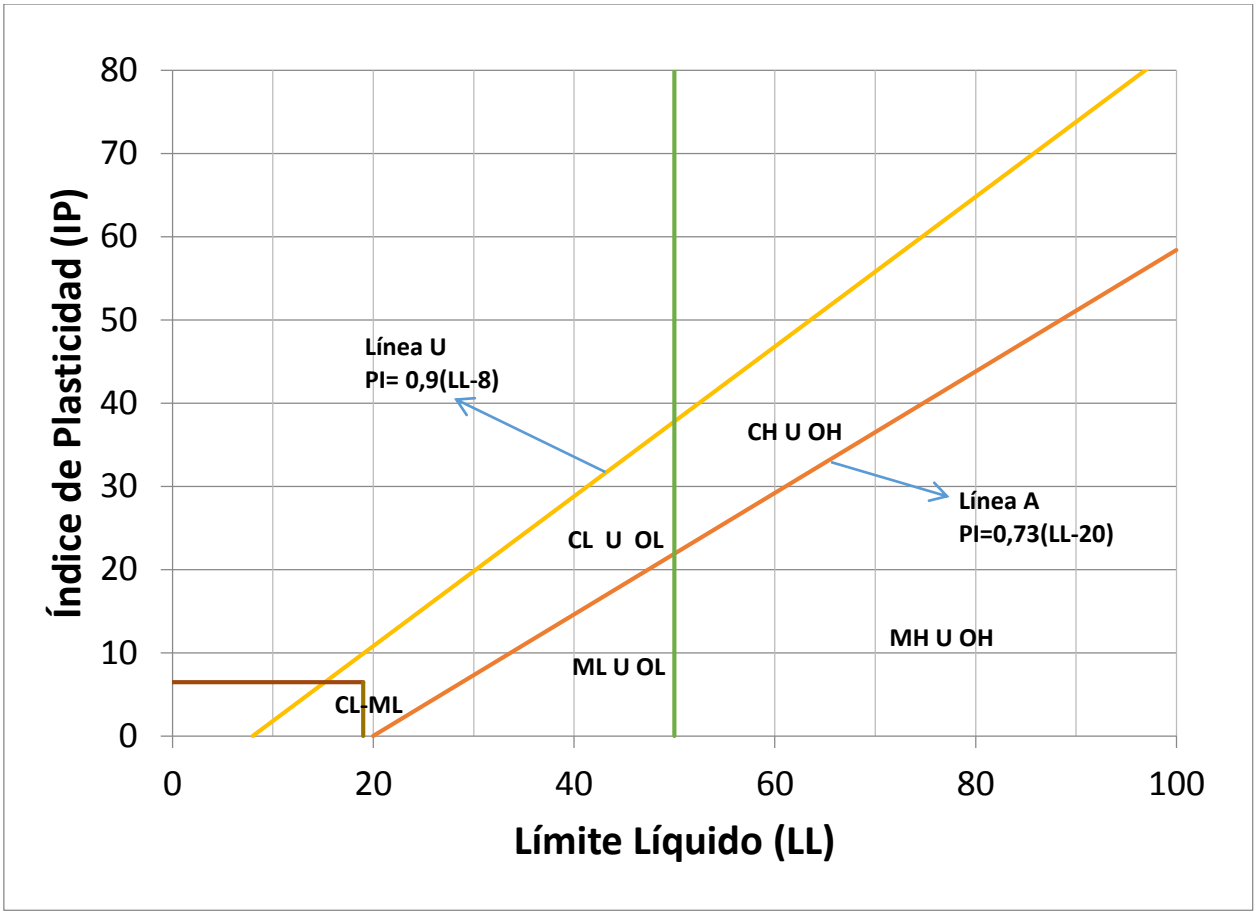


Figura 4. Clasificación del Suelo – Material Natural. Fuente. http://www.academia.edu/8646933/CARTA_DE_PLASTICIDAD

El límite plástico del material natural es de 12.57%, este valor se encuentra dentro de los permitidos para la mezcla suelo-cemento, según el índice de plasticidad del material es de 6.27%. Relacionando el índice de plasticidad con el límite líquido, clasificamos el material según la carta de plasticidad AASHTO, donde el tipo de suelo pertenece al grupo A2-4 (Grava y arena limosa o arcillosa) y al analizar en la carta de plasticidad del Sistema Unificado de la clasificación del suelo se encuentra en el grupo CL-ML (Limos arcillas de baja plasticidad).

3.1.4.1 Material con 5%,10% y 15% de PET

Para este material no era necesario realizar este ensayo debido a que no cumplía con los requisitos mínimos los cuales eran que la muestra a caracterizar debía ser la que pasara el tamiz No 40. Y el material PET con el que se trabajó se retenía totalmente en el tamiz No 40.

Sin embargo se realizó el ensayo para revisar el comportamiento del PET con la mezcla de suelo sin obtener ningún resultado ya que no se pudo hacer homogénea la masa para realizar dicho ensayo.

3.1.5 Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos I.N.V. E – 213 – 07

El análisis granulométrico en los materiales tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material por medio de tamices. En las siguientes imágenes se muestra el material tamizado.

Imagen 1.



Imagen 2.



Muestras de material después de la granulometría. Fuente. Autoras

Se seleccionó por medio de cuarteo 2500 gramos del material para realizar la gradación con los respectivos tamices.

A continuación se presentan los resultados del ensayo de granulometría para el material natural en la Figura 5.

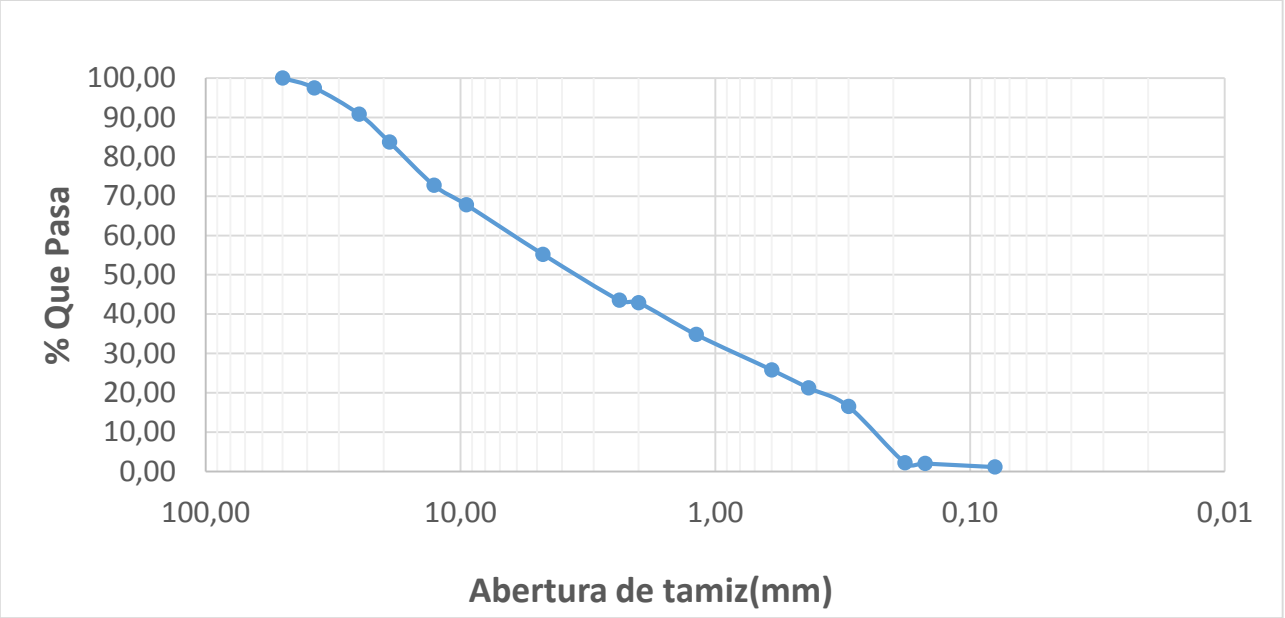


Figura 5. Gráfica curva granulometrica- Material Natural. Fuente. Autoras

En los resultados se pudo determinar que el material era apto para estabilizar con cemento, puesto que los porcentajes para los tamices No4 y No200 fueron de 55.2% y 1.08% respectivamente. Al comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los requisitos que exige el artículo y que están descritos en la *Tabla 2*, el cual dice que el porcentaje mínimo que pasa el tamiz Nº 4 debe ser del 60% y el máximo que pasa el tamiz Nº 200 debe ser máximo 50%, cumpliendo con la norma.

El análisis granulométrico de las mezclas suelo-PET no se realizó, ya que las láminas de PET pasan por el tamiz Nº 30 y son retenidos en el tamiz Nº 40, pues la lámina de PET que se usó para la mezcla tiene tamaño entre 0,42 y 9.5 mm de diámetro.

En la Figura 6 se puede ver el resultado de la granulometría realizada a las láminas de PET.

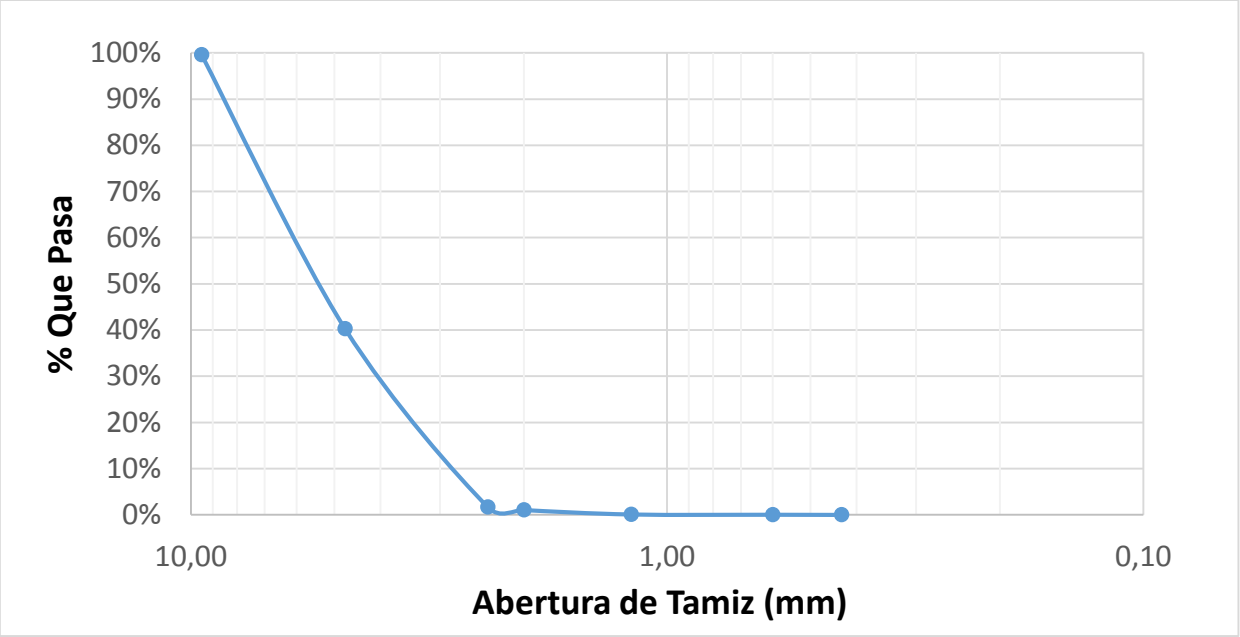


Figura 6. Gráfica curva granulométrica PET

3.1.6 Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la Máquina de los Ángeles – I.N.VE – 218 – 07

Este método determina la resistencia al desgaste de los agregados, ya sean naturales o triturados, con el fin de arrojar un indicador de calidad relativo de las diferentes fuentes de los agregados.

Este consiste en colocar en la máquina de los ángeles la carga abrasiva y la muestra, posteriormente se hace girar el cilindro hasta completar 500 revoluciones, se procede a descargar el material dentro del cilindro, se lava sobre el tamiz No 12 y posteriormente se toma el peso de la muestra más gruesa.

Para calcular el desgaste o porcentaje de desgaste se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

1. $\%\ Desgaste = \frac{P1-P2}{P1} * 100$

Para la muestra utilizada, la resistencia al desgaste de los agregados arrojo un resultado de 47% estando dentro de los límites permitidos.

3.1.7 Equivalente de arena – I.N.VE – 133 – 07

Este método permite determinar el contenido de polvo fino nocivo, o material arcilloso, que puede afectar negativamente su durabilidad en los suelos o agregados finos.

Se puede definir mediante la siguiente formula:

2. $Equivalente\ de\ Arena\ (EA) = \frac{Lectura\ de\ arena}{Lectura\ de\ arcilla} * 100$

El procedimiento consiste en llenar la probeta hasta 10 cm. con solución, seguidamente se vierte el contenido de muestra de arena, se desaloja burbujas y se humedece la muestra, se deja reposar 10 minutos, se tapa la probeta y se agita por 90 ciclos (ida y vuelta en una distancia de 20 cm.)

durante 30 segundos, se lava el tapón y las paredes interiores de la probeta con solución, se continua introduciendo el tubo irrigador al fondo de la muestra y se asciende poco a poco, permitiendo el ascenso del material fino atrapado, se deja reposar durante 20 minutos y finalmente se hace lecturas de arcilla y arena. Este procedimiento se realizó en tres muestras.

La muestra usada en el laboratorio da como resultado un 23% de equivalente de arena. Conforme con las especificaciones generales de construcción de carreteras, los resultados obtenidos reflejan que sus valores no cumplen.

3.1.8 Porcentaje de Caras Fracturadas – I.N.V.E – 227 – 07

El siguiente método determina el porcentaje en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos, para así incrementar la resistencia al corte y estabilidad de los agregados, generando mayor fricción entre partículas en mezcla de agregados.

Se inicia lavando el material y se determina la masa de la muestra, posteriormente se inspecciona cada partícula para verificar que cumple el criterio de fractura, se procede a separar la muestra en partículas fracturadas en 1 cara y 2 caras, partículas no fracturadas y partículas dudosas.

Para verificar la muestra se debe hacer por medio de la siguiente formula:

$$P = [(F + Q/2) / (F + Q + N)] * 100$$

Donde;

P: Porcentaje de partículas con el numero especificado de caras fracturadas. (%)

F: Masa o número de partículas fraturadas. (gr.)

Q: Masa o número de partículas cuestionables. (gr.)

N: Masa o número de partículas no fracturadas. (gr.)

El porcentaje de caras fracturadas para 1 cara es 65% y para 2 o más caras es de 94% de la fracción retenida en el tamiz de 3/8" y para la fracción que pasa 3/8" y retenida en el No. 4 para 1 cara fracturada es 58% y para 2 o más caras fracturadas 95 %.

3.1.9 Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados para Carreteras I.N.V.E – 230 – 07

El ensayo de índice de aplanamiento e índice de alargamiento de los agregados es importante porque sirve para evaluar la calidad de un agregado. Las partículas planas y alargadas son indeseadas debido a su poca durabilidad y dificultan la labor de compactación.

El índice de aplanamiento y alargamiento se puede hacer tanto global como por cada fracción que se tomó.

Para hallar el índice de alargamiento o aplanamiento se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

$$I_a = M_2 / M_1 \times 100$$

Donde;

M_1: Es la suma de las masas de los tamices en gr.

M_2: Es la suma de las masas de las partículas planas o largas de cada fracción en gr.

El procedimiento realizado para el índice de aplanamiento inicia con el tamizado de la muestra a ensayar, posteriormente cada muestra separada por los tamices se pasa por el calibrador de espesores en la ranura correspondiente al tamaño de la fracción y finalmente se pesa la cantidad de partículas que pasaron por cada fracción.

Para el índice de alargamiento se realiza el mismo procedimiento del índice de aplanamiento, pero la muestra se pasa por el calibrador de alargamiento para finalmente pesar lo que este retiene.

Los resultados de este laboratorio serán mostrados en los anexos de este documento.

Capítulo 4: Diseño de Mezcla Suelo-Cemento

Con el fin de realizar una caracterización mecánica del material, una vez cumplidos los requisitos exigidos por el artículo 341 – 07 de Invías para la utilización del material en la mezcla suelo-cemento, se procedió a realizar los ensayos INV E-806 e INV E-809 que nos permiten definir las condiciones del suelo.

En este punto de los ensayos se comenzó a mezclar el material con cemento Portland Tipo I, según lo exige el Artículo 341 - 07.

Según lo exige el Artículo 341-07 de Invías en el numeral 341.4.2, referente al diseño de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo, se procedió a realizar el ensayo de compactación para encontrar el porcentaje óptimo de agua y diseñar los cilindros con este valor para hacer la prueba de resistencia a la compresión.

4.1 Relaciones humedad – masa unitaria de mezclas de suelo-cemento I.N.V. E – 806 – 07

La relación de humedad-masa unitaria nos permite encontrar el porcentaje máximo de humedad óptima y densidad máxima de las mezclas de suelo-cemento al ser compactadas según el método utilizado, ya sea operado manualmente o mecánicamente como lo indica la norma en referencia.

Con el fin de determinar el porcentaje de cemento necesario para realizar la prueba de compactación, se tuvo en cuenta la información de la Tabla 3 y así poder llevar a cabo el ensayo de compactación de la mezcla de suelo-cemento y suelo-cemento-PET en diferentes proporciones.

Tabla 3. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo-cemento según la PCA (Portland Cement Association). Fuente: http://www.imcyc.com/ct2008/abr08/ingenieria.htm.

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

Para este ensayo se tuvo en cuenta el método A según la norma I.N.V E 806 – 07. Inicialmente se preparó una gran cantidad de material, el cual fue pesado y pasado por los tamices de 3” ¾” y No 4. El material con el cual se trabajo fue el que pasó el tamiz No 4 y con el mismo se procede a realizar los ensayos de compactación y resistencia a la compresión como lo indica el artículo 341 – 07 de Invías.

4.1.1 Mezcla de suelo – cemento

Con el material seleccionado se inicia la preparación de la mezcla del suelo con la cantidad equivalente al 7% de cemento según el tipo de suelo A2-4 y lo requerido por la PCA. Al iniciar se depositó el material en un recipiente metálico y se mezcló con el cemento hasta obtener una mezcla homogénea, a esta mezcla se le agregó agua en cuatro proporciones diferentes, las cuales fueron: 8%, 11%, 15% y 17%.

El material se compactó en tres capas iguales, cada una de 25 golpes en el molde de 944 cm^3, finalmente se halló la densidad seca con la siguiente formula:

3. $Densidad\ seca = \frac{\frac{Peso\ del\ suelo\ compactado}{Volumen\ del\ molde}}{1+Humedad}\ [\frac{g}{cm^3}]$

A continuación, en la *Figura* se puede observar la relación entre la humedad y la densidad seca; el punto máximo de la curva es la densidad seca máxima y en la abscisa la humedad óptima de compactación.

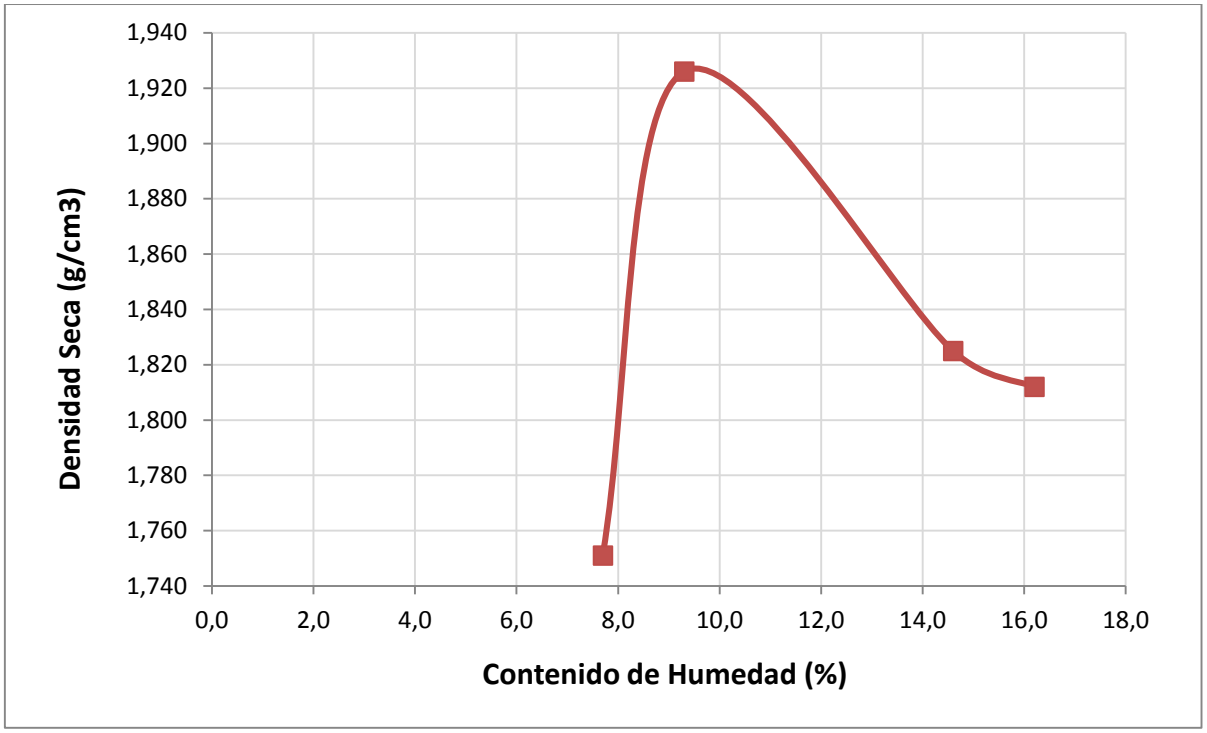


Figura 7. Curva de compactación para la mezcla suelo – cemento

Para este caso la mezcla de suelo-cemento presenta una humedad óptima de compactación de 9.32% con una densidad máxima de 1.933 g/cm^3. La humedad óptima arrojada en este ensayo es también usada para el de resistencia a la compresión.

4.1.2 Mezcla de suelo-cemento – 5% de PET

Para esta mezcla de suelo-cemento-PET es necesario tomar una cantidad de cemento equivalente al 7%. Se procede a realizar la mezcla de los tres materiales hasta que está totalmente homogénea. Una vez terminado este procedimiento se puede empezar a realizar el ensayo de compactación.

Para el ensayo de compactación fue necesario agregar agua en 4 proporciones diferentes: 8%, 11%, 15% y 17%.

A continuación se muestra en la *Figura 8* los resultados de la curva que relaciona la densidad seca con las humedades que se encuentran en la:

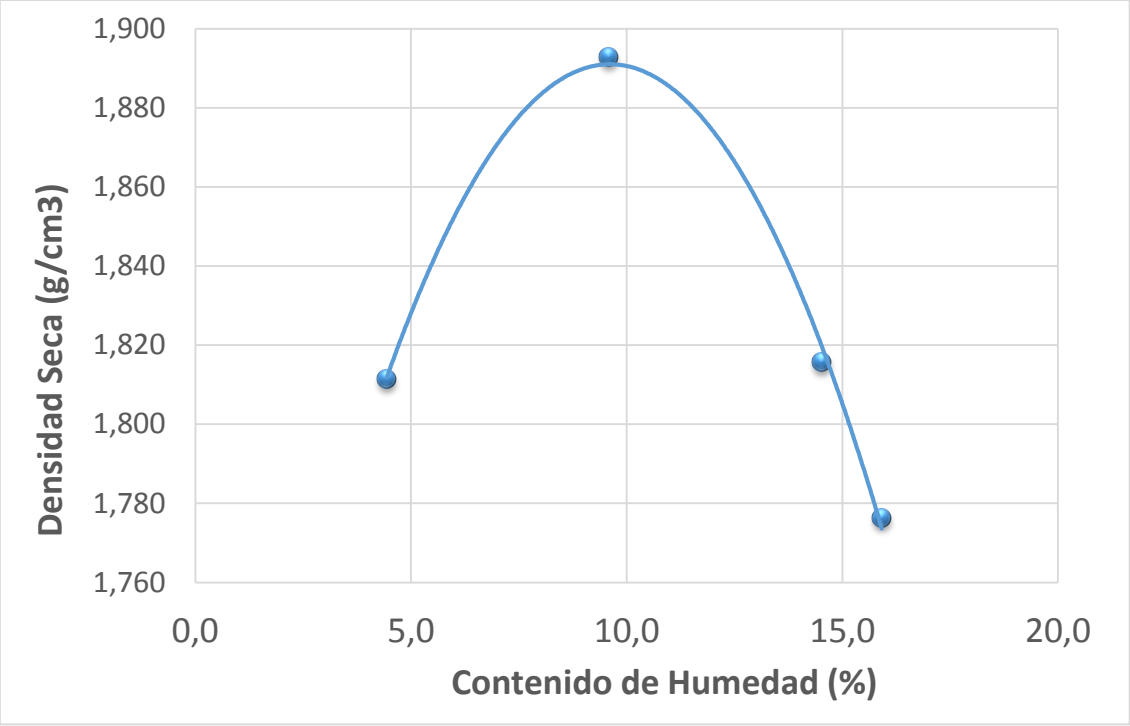


Figura 8. Curva de compactación de suelo-cemento-5% de PET

Los resultados obtenidos del ensayo de compactación para 5% de PET muestran una humedad óptima de compactación de 10% y una densidad seca máxima de 1.891 g/cm^3.

4.1.3 Mezcla suelo – cemento – 10% de PET

Para este ensayo es necesario tomar una cantidad de cemento equivalente al 7%. Igual que en los procedimientos anteriores se deben mezclar los tres materiales hasta que estén completamente homogéneos. Después de haber realizado esto se procede a hacer el ensayo de compactación.

Para el ensayo de compactación fue necesario agregar agua en 4 proporciones diferentes: 8%, 11%, 15% y 17%.

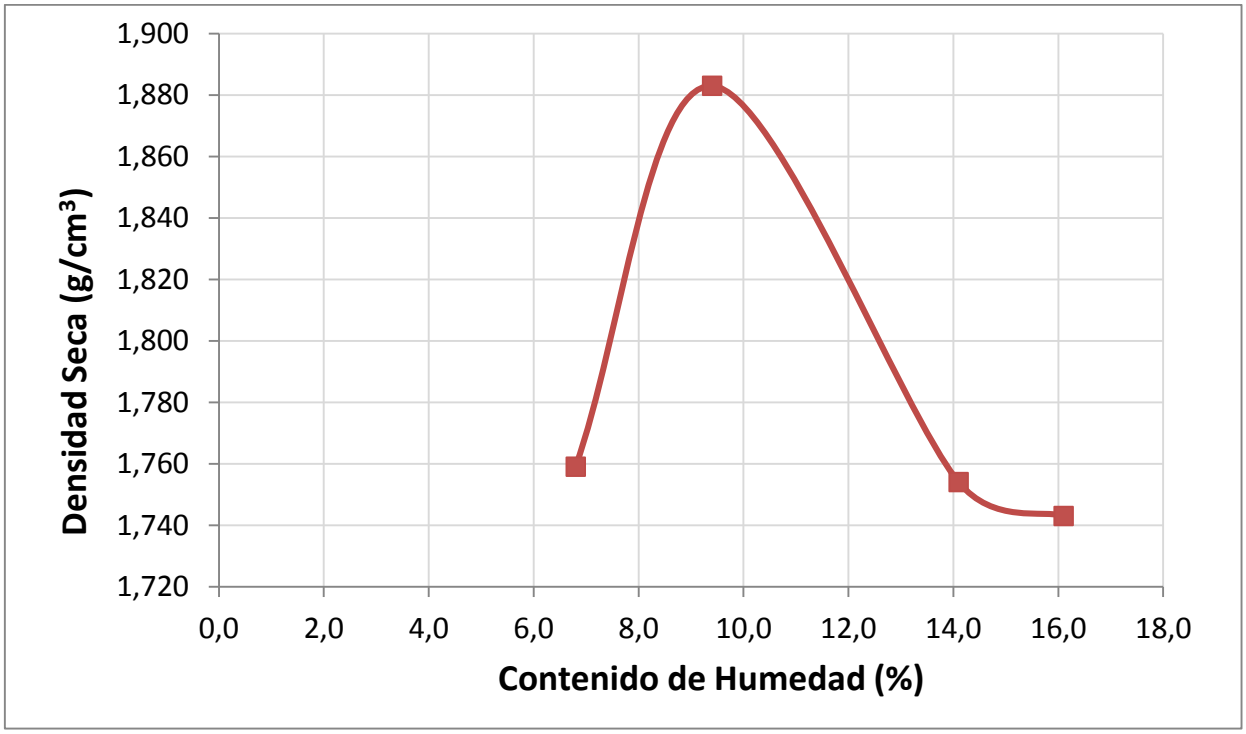


Figura 9. Curva de compactación de la mezcla suelo – cemento – 10% de PET

Después de realizar el ensayo de compactación nos arroja que para el 10% de PET la humedad óptima es de 9.4% y una densidad máxima seca de 1.883 g/cm^3

4.1.4 Mezcla suelo – cemento – 15% de PET

Para este ensayo es necesario tomar una cantidad de cemento equivalente al 7%. Igual que en los procedimientos anteriores se deben mezclar los tres materiales hasta que estén completamente homogéneos. Después de haber realizado esto se procede a hacer el ensayo de compactación.

Para el ensayo de compactación fue necesario agregar agua en 4 proporciones diferentes: 8%, 11%, 15% y 17%.

A continuación en la Figura 10 muestra los resultados de la prueba de compactación de la mezcla suelo–cemento - 15% de PET.

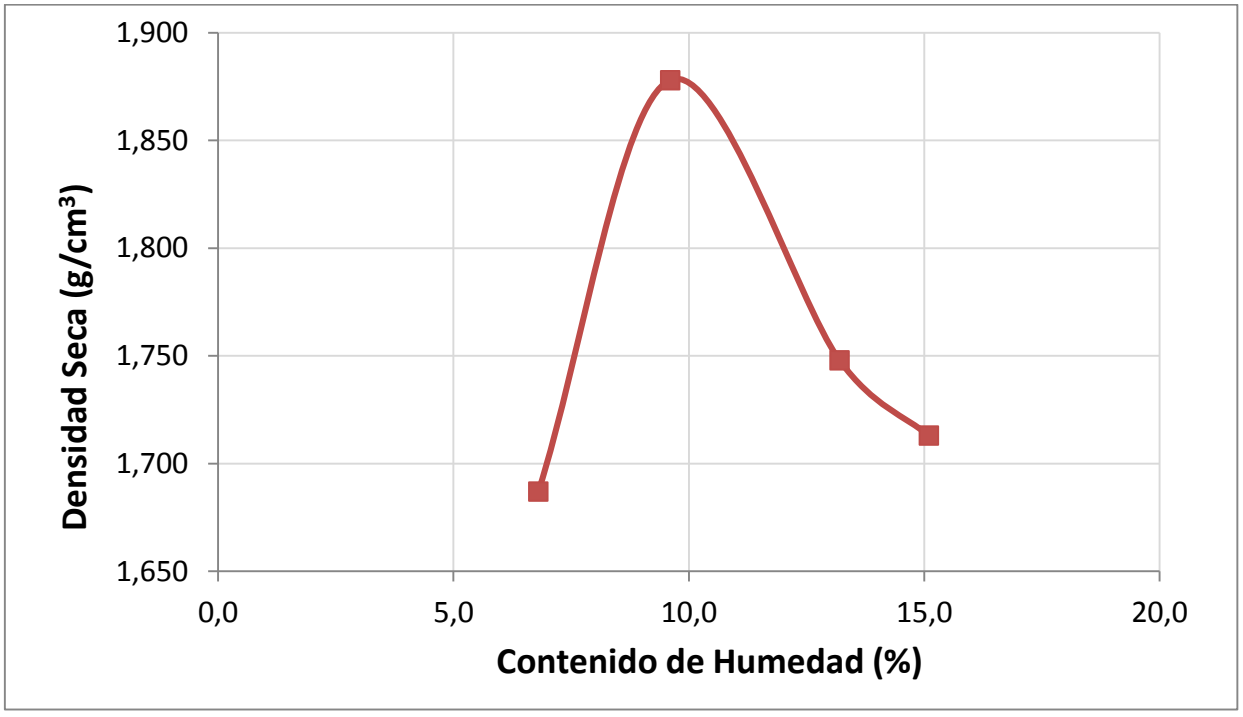


Figura 10. Curva de compactación de suelo-cemento-15% de PET

Después de realizar el ensayo de compactación nos arroja que para el 15% de PET la humedad óptima es de 9.60% y una densidad máxima seca de 1.878 g/cm^3

4.2 Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo-cemento I.N.V. E809 – 07

Esta norma hace referencia a la determinación de la resistencia a la compresión del suelo-cemento. Para esto es necesario utilizar moldes cilíndricos de 2.8" de diámetro y 5.6" de altura. Para este ensayo se utilizó el método B, el cual hace referencia la norma I.N.V. E 809-07.

Según el artículo 341-07 del Invías para el diseño de la mezcla suelo-cemento este se debe calcular bajo el ensayo de resistencia a la compresión. Dicha resistencia mínima deberá ser de 2.1 MPa, luego de realizar una proyección de la falla de cilindros variando el porcentaje de cemento en tres puntos diferentes como lo muestra la Tabla 3, luego de siete días de curado húmedo.

Para este ensayo se utilizó un material igual al utilizado en el ensayo de compactación según la Norma I.N.V E 806-07 (material que pasa el tamiz No 4) y se le agrego a cada porción de material el porcentaje de cemento en las tres proporciones diferentes como lo indica la Tabla 3, luego se compacta esta mezcla y se extrae del molde para así ser colocado en el cuarto de curado por los siete (7) días correspondientes para después dar lugar a la falla.

Imagen 3. Imagen 4.





Preparación de muestras para diseño de mezcla. Fuente: Autoras

La preparación de las muestras se llevó a cabo en los mismos recipientes del ensayo de compactación. El cuarto de curado a utilizar en donde se colocaron las muestras es una nevera con papel periódico mojado, a continuación se puede apreciar:

Imagen 5. Imagen 6.





Cuarto de curado muestras para diseño de mezcla. Fuente: Autoras

Se realizaron tres cilindros, cada uno con la misma cantidad de cemento para así poder realizar un promedio de los mismos.

Después de hacer la compactación de las muestras con el porcentaje óptimo de agua que se obtuvo del ensayo de compactación, se colocaron en el cuarto de curado durante siete (7) días como lo muestra la imagen. Pasado los siete (7) días las muestras son sacadas del cuarto de curado y se sumergen en agua por 4 horas para posteriormente ser fallados en la maquina Universal del laboratorio de la Universidad de la Salle.

Imagen 7. Imagen 8.





Curado de probetas y extracción de la probeta. Fuente: Autoras.

Los cilindros se fallaron de acuerdo a la Norma I.N.V. E – 809 – 07. Se fallaron en la maquina Universal ubicada en el laboratorio de estructuras de la Universidad de la Salle. Con los resultados de la deformación y la carga se realizaron los cálculos correspondientes de resistencia.

Imagen 9. Imagen 10.





Falla probetas máquina Universal. Fuente: Autoras

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron una vez fueron fallados los cilindros para encontrar el porcentaje óptimo de cemento.

4.2.1 Mezcla Suelo – Cemento

Después de sumergidos los cilindros por siete (7) días en el cuarto de curado son retirados de la misma y se sumergen por 4 horas en agua. Se llevan a la maquina Universal y se fallan hasta la resistencia máxima de corte.

Imagen 11. Imagen 12.





Falla probetas Suelo-Cemento en Máquina Universal. Fuente: Autoras

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente *Figura 11*.

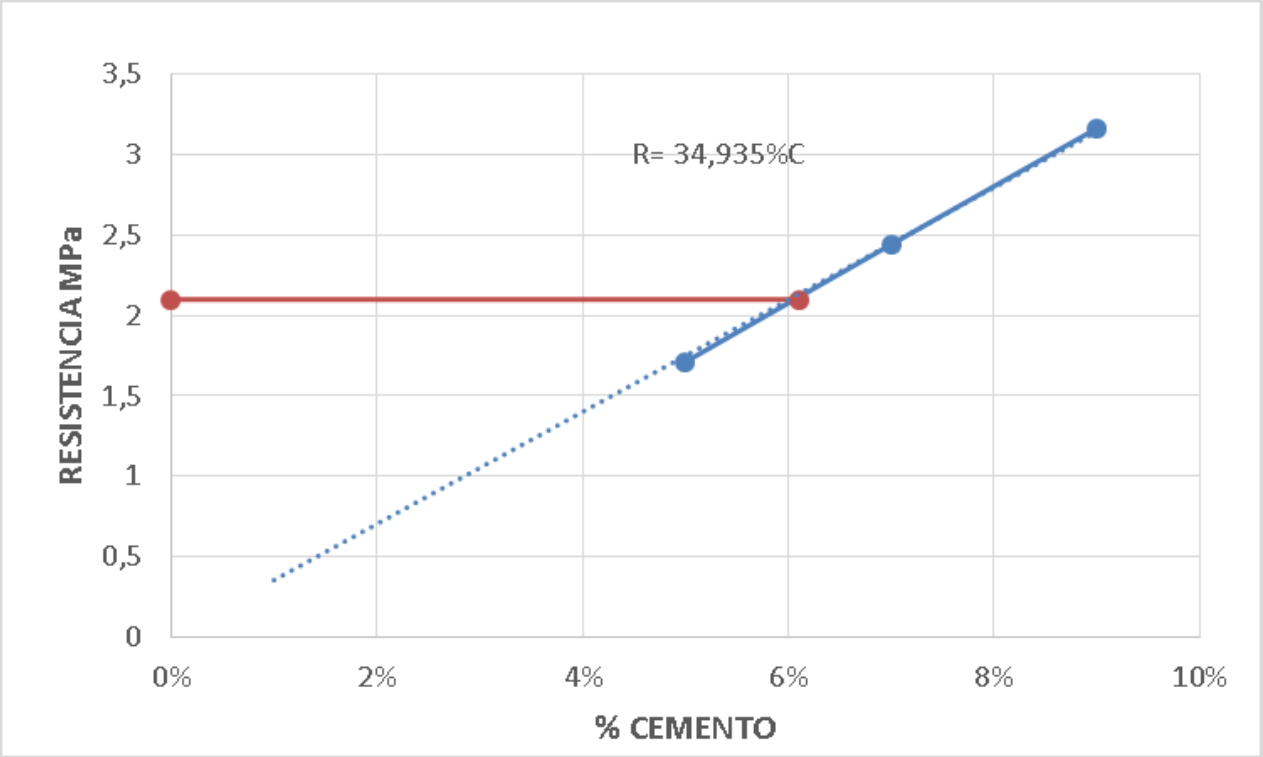


Figura 11. Gráfica Resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento.

Para realizar el ensayo de resistencia se trabajó con la humedad óptima que arrojo el ensayo de compactación, en este caso, se tomó una humedad de 9.32% y se trabajó con los diferentes porcentajes de cemento del 5%, 7%, 9%. Se graficaron los valores de la resistencia a la compresión de los cilindros fallados contra los diferentes porcentajes de cemento. Después de esto se hizo una proyección hasta encontrar la cantidad de cemento que nos garantice una resistencia de 2.1 MPa. El porcentaje óptimo del cemento para la mezcla suelo-cemento es 6.01%

4.2.2 Mezcla Suelo – Cemento – 5% PET

Para este ensayo se tomó un porcentaje de agua óptimo de 10%, el cual fue obtenido del ensayo de compactación. Se realiza la falla de los nueve (9) cilindros con la mezcla de la siguiente manera: tres cilindros con un porcentaje de cemento del 5%, tres cilindros con el 7% de cemento y tres cilindros con el 9% de cemento. A continuación se presentan los resultados.

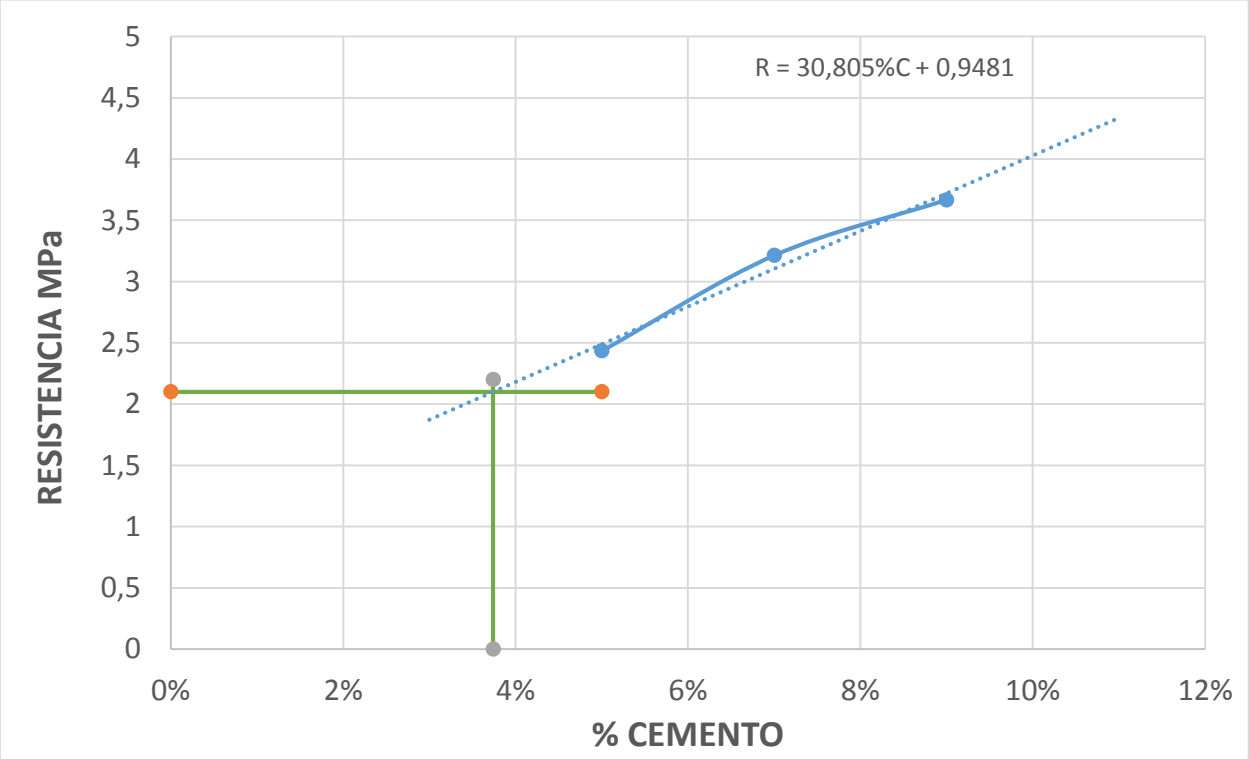


Figura 12. Gráfica resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-5% PET

Como se puede ver en la gráfica, al hacerse la proyección de cómo se comportó el material al ser fallado a compresión hasta llegar a una resistencia como lo dice el Articulo 341-07 de 2.1 MPa, un valor que corresponde al porcentaje máximo u óptimo de cemento para esta mezcla de suelo-cemento 5% PET es de 3.74%

4.2.3 Mezcla Suelo – Cemento – 10% PET

Para este ensayo se tomó un porcentaje de agua óptimo de 9.4%, el cual fue obtenido del ensayo de compactación. Se realiza la falla de los nueve (9) cilindros con la mezcla de la siguiente manera: tres cilindros con un porcentaje de cemento del 5%, tres cilindros con el 7% de cemento y tres cilindros con el 9% de cemento. A continuación se presentan los resultados.

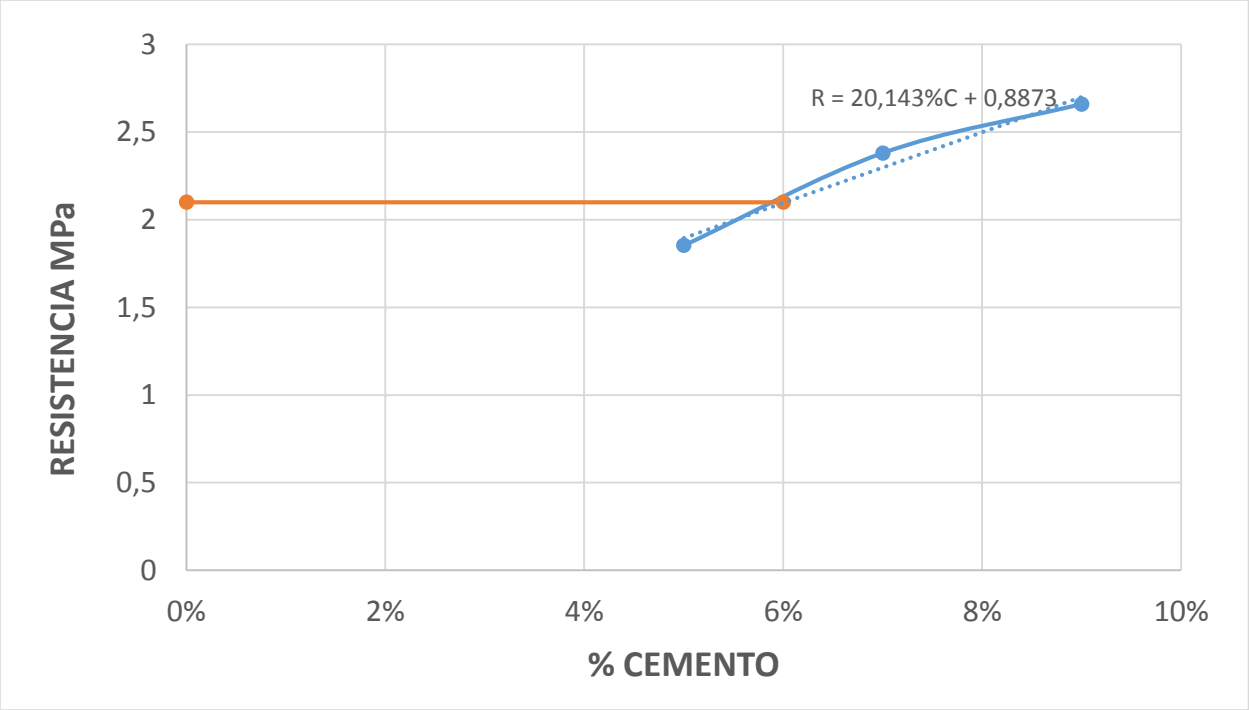


Figura 13. Gráfica resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-10% PET

Como se puede ver en la gráfica al hacerse la proyección de cómo se comportó el material al ser fallado a compresión hasta llegar a una resistencia como lo dice el Articulo 341-07 de 2.1 MPa,

el valor que corresponde al porcentaje máximo u óptimo de cemento para esta mezcla de suelo-cemento 10% PET es de 6.02%

4.2.4 Mezcla Suelo – Cemento 15% PET

Para este ensayo se tomó un porcentaje de agua óptimo de 9.60%, el cual fue obtenido del ensayo de compactación. Se realiza la falla de los nueve (9) cilindros con la mezcla de la siguiente manera: tres cilindros con un porcentaje de cemento del 5%, tres cilindros con el 7% de cemento y tres cilindros con el 9% de cemento. A continuación se presentan los resultados.

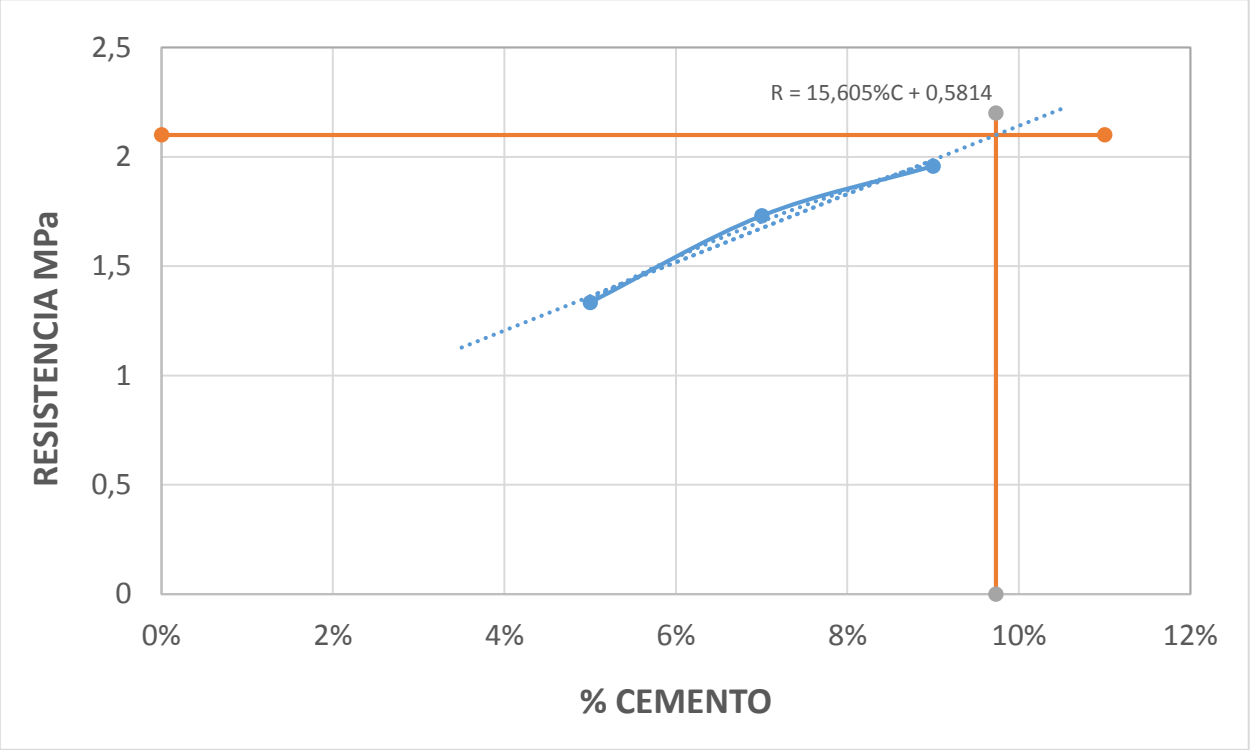


Figura 14. Gráfica Resistencia a la compresión – Mezcla de suelo-cemento-15% PET

Como se puede ver en la gráfica al hacerse la proyección de cómo se comportó el material al ser fallado a compresión hasta llegar a una resistencia como lo dice el Articulo 341-07 de 2.1 MPa, el valor que corresponde al porcentaje máximo u óptimo de cemento para esta mezcla de suelo-cemento 15% PET es de 9.73%.

A continuación en la Tabla 4 se muestran los resultados finales de las pruebas de compactación y resistencia a la compresión.

Tabla 4. Resultados - Ensayo de Compactación y Resistencia a la Compresión

ENSAYO	REQUISITO ARTÍCULO 341 - 07	RESULTADO	CUMPLE
Relaciones Humedad – Masa Unitaria de Mezclas de Suelo-cemento I.N.V. E – 806 – 07 (Humedad Óptima-Densidad seca)			
Material Natural	N.A.	9.32 % - 1.933 g/cm^3	N.A.
Mezcla suelo - 5% PET		10% - 1.891 g/cm^3	N.A.
Mezcla suelo - 10% PET		9.4% - 1.883 g/cm3	N.A.
Mezcla suelo - 15% PET		9.60% - 1.878 g/cm3	N.A.
Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo-cemento I.N.V. E 809 – 07 (Porcentaje Óptimo de cemento)			
Material Natural	Mínimo 2.1 MPa	6.06%	N.A.
Mezcla suelo - 5% PET		3.74%	N.A.
Mezcla suelo –10% PET		6.02%	N.A.
Mezcla suelo –15% PET		9.73%	N.A.

N. P. = No Presenta

N. A. = No Aplica

Capítulo 5: Análisis de resultados

Acorde a las normas exigidas vigentes para el caso, se obtuvieron los análisis y ensayos del laboratorio, esto nos permite determinar su optimización para el objeto de estudio. Los resultados son resumidos en la Tabla 5 con las normas que exige el artículo 341-07, se presenta cada dato con sus respectivos valores y los resultados obtenidos en los laboratorios.

Tabla 5. Resumen de Ensayos – Características Físicas

ENSAYO	REQUISITO ARTÍCULO 341 – 07	RESULTADO	CUMPLE
Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E - 125 – 07			
Material Natural	Máximo 35 %	18.82%	SI
Mezcla suelo - 5% PET		N.P	N.A
Mezcla suelo –10% PET		N.P	N.A
Mezcla suelo - 15% PET		N.P	N.A
Índice de Plasticidad de Suelos I.N.V. E - 126– 07			
Material Natural	Máximo 15 %	6.27%	SI
Mezcla suelo - 5% PET		N.P.	N.A
Mezcla suelo - 10% PET		N.P.	N.A
Mezcla suelo - 15% PET		N.P.	N.A.
Clasificación del Suelo (AASHTO/SUCS)			
Material Natural	N.A.	A-2-4 / CL-ML	N.A.
Mezcla suelo - 5% PET		N.P.	N.A.
Mezcla suelo - 10% PET		N.P.	N.A.
Mezcla suelo - 15% PET		N.P.	N.A.
Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos I.N.V. E - 213 - 07			
Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	55.2%	SI
Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	1.08%	SI
Análisis Granulométrico de PET			
Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	40%	N.A.
Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	N.P	N.A

En la Tabla 5 se observa que el material cumple con todos los requerimientos exigidos por el Artículo 341, por tal motivo se procedió a realizar los demás ensayos según el diseño.

Se realizaron otros análisis para estudiar el comportamiento. A continuación se mostrarán los resultados de dichos comportamientos.

En la Figura 15,16 y 17 se verá el comportamiento de la resistencia a la compresión con cada uno de los porcentajes de cemento utilizados en el diseño de la mezcla que para este caso fueron 5,7 y 9% de cemento.

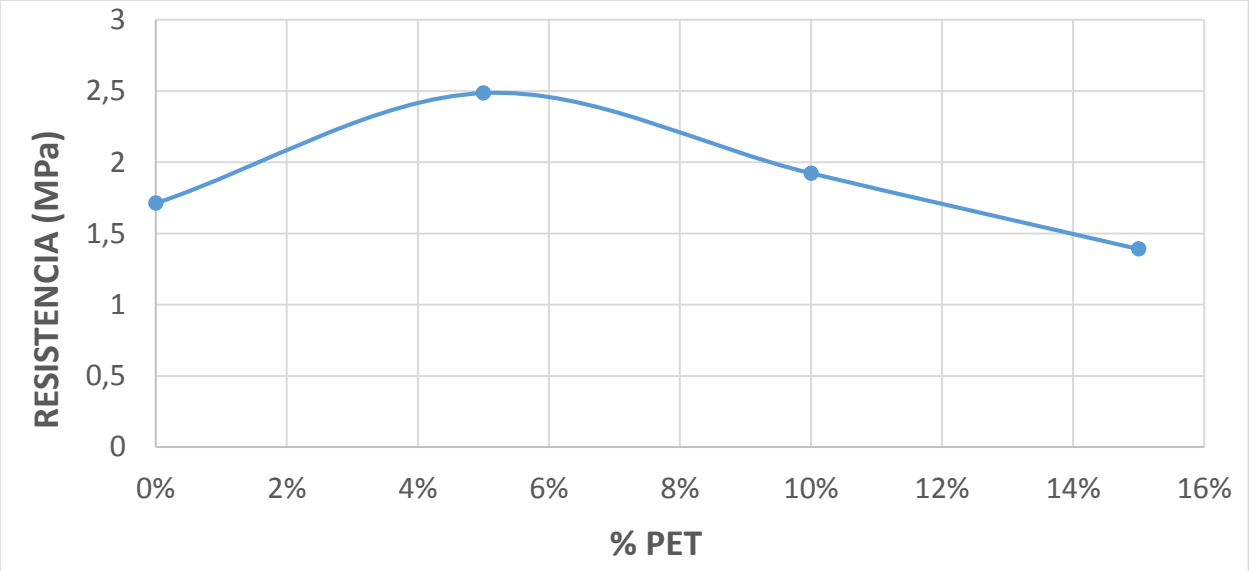


Figura 15. Resistencia vs %PET para el 5% Cemento. Fuente. Autoras

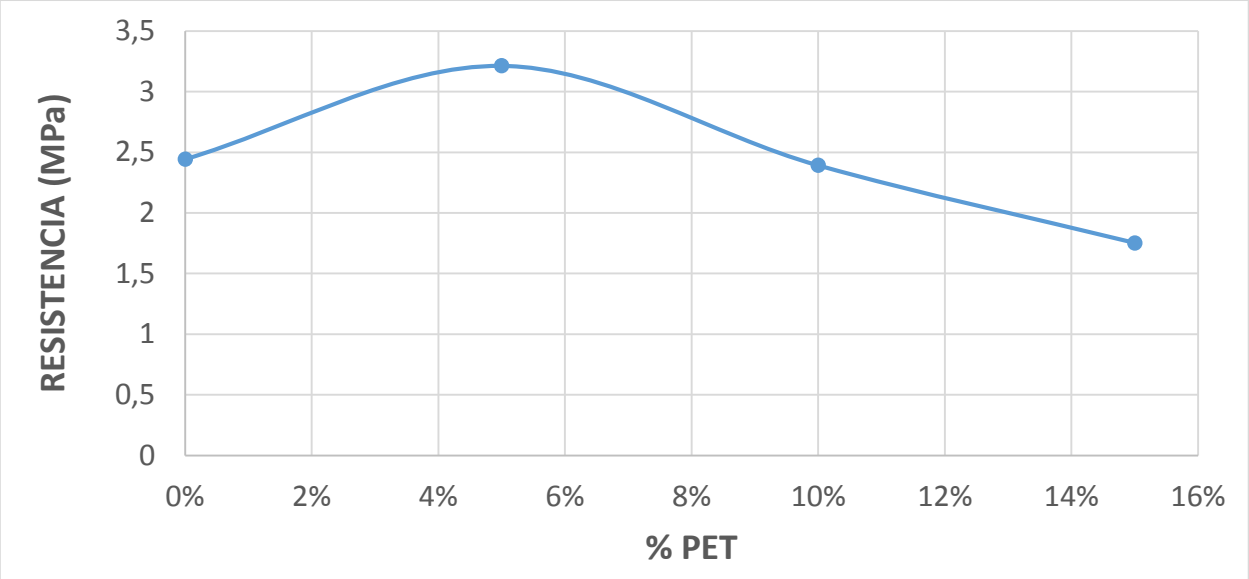


Figura 16. Resistencia vs %PET para el 7% Cemento. Fuente. Autoras

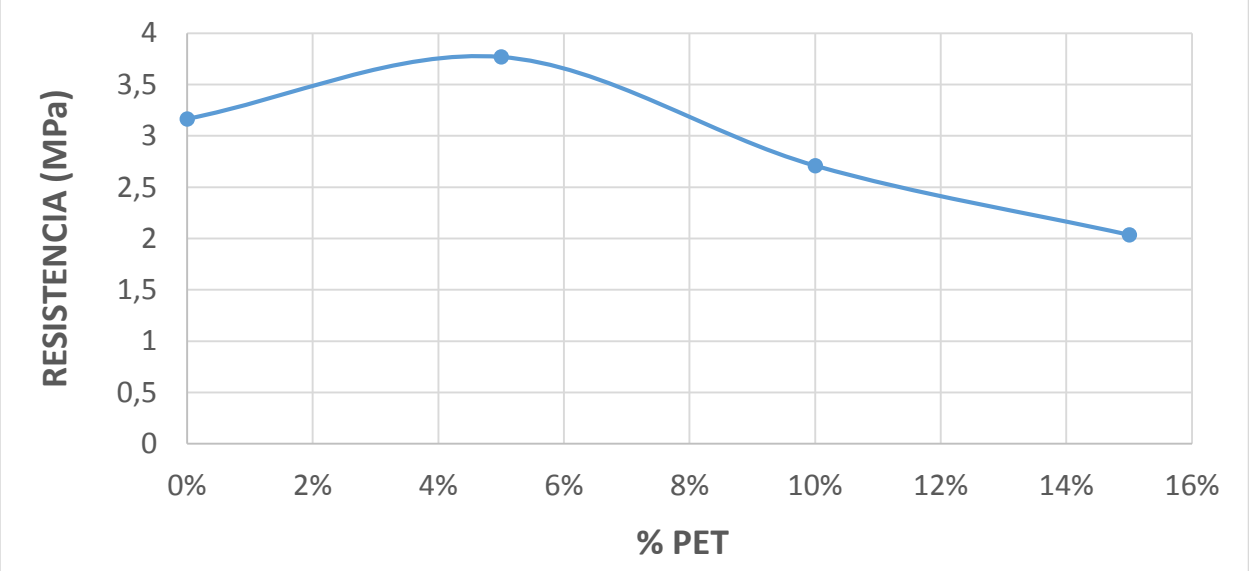


Figura 17. Resistencia Vs %PET para el 9% Cemento. Fuente. Autoras

También se realizó el estudio del comportamiento de la densidad seca con respecto al porcentaje de PET que se le suministro a cada muestra. En la Figura 18 se mostrará el resultado de dicho estudio.

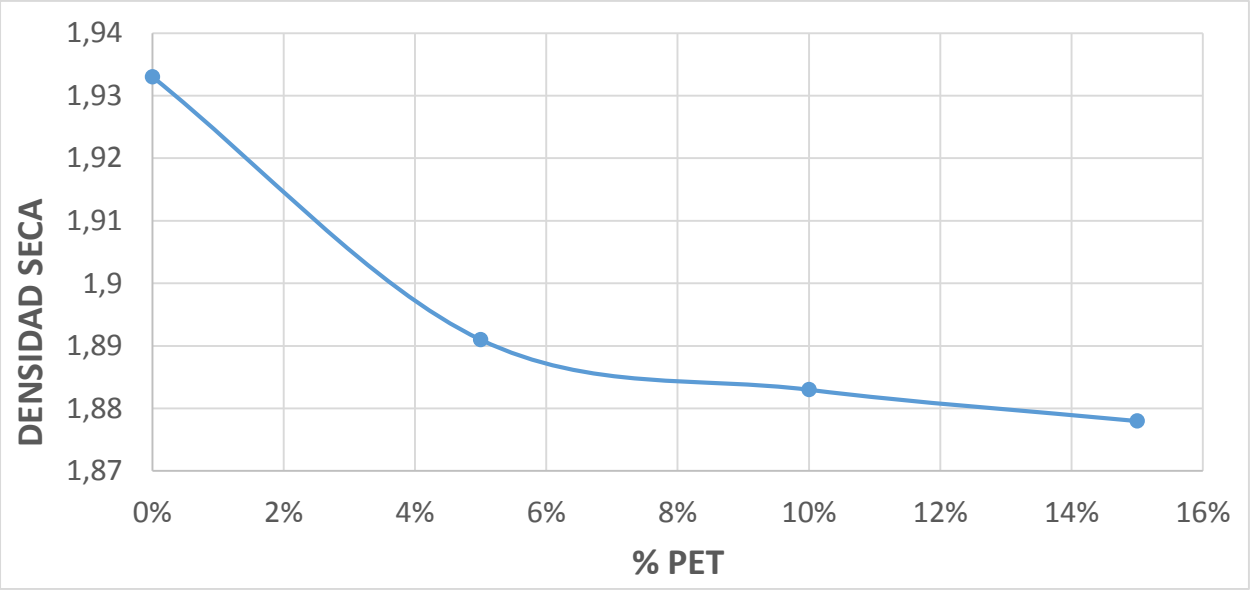


Figura 18. Gráfica densidad seca Vs %PET. Fuente. Autoras

Por último se quiso analizar el comportamiento del porcentaje óptimo de cemento que arrojaron los resultados del diseño de la mezcla con el porcentaje de PET suministrado a cada muestra.

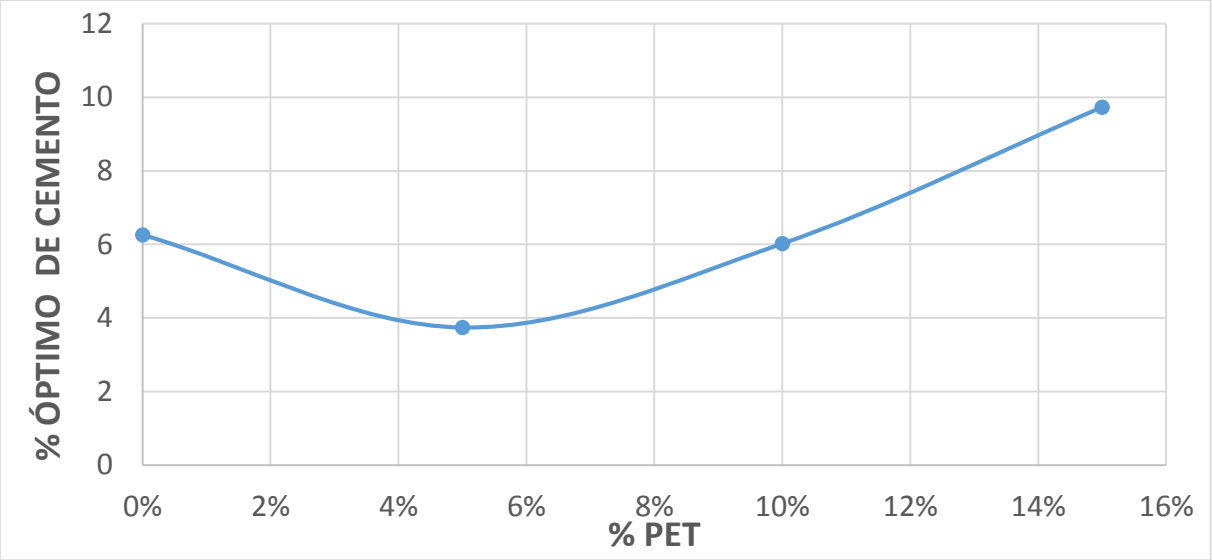


Figura 19. Gráfica % óptimo de cemento Vs %PET. Fuente. Autoras

Conclusiones

La humedad óptima de compactación del suelo natural con respecto a las mezclas de suelo-cemento-PET, tiene una variación entre el 1% y 2%, con lo cual se evidencia que el PET no modifica este parámetro.

La relación que hay entre el contenido de PET de la mezcla y la densidad seca, es inversamente proporcional. La variación se encuentra entre el 1% y 2 %, por tanto, no es una afectación alta que se deba considerar.

La muestra de suelo-cemento-PET que ofrece mejores resultados analizando los resultados obtenidos en las gráficas 15 a la 19 de este documento es aquella 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 resistencia.

Se realizaron los ensayos necesarios como límite líquido, limite plástico, índice de plasticidad, desgaste de la máquina de los ángeles, equivalente de arena, caras fracturadas, índice de aplanamiento y alargamiento y granulometría. Sin embargo se realizaron algunos ensayos para el material modificador PET a manera experimental aunque no era necesario ya que este material no cumple con los parámetros establecidos en la norma los cuales eran que la muestra a caracterizar debía ser la que pasara el tamiz No 40. Y el material PET con el que se trabajó se retenía totalmente en el tamiz No 40.

Se realizaron 3 diseños de suelo-cemento (5% 7% 9% de cemento, de acuerdo a la tabla 3 de la PCA) con tres porcentajes diferentes de PET (5% 10% y 15%) teniendo en cuenta las especificaciones de materiales y construcción Invias 2007 e IDU 2005.

De acuerdo a los resultados obtenidos después de realizar todos y cada uno de los ensayos al suelo-cemento y modificándolo con el PET se propone este material (PET) como modificador de una base.

En cuanto a costos se puede recomendar este material, ya que es económico y es de fácil acceso. El PET por ser reciclable, permite disminuir el impacto ambiental ya que se necesita una cantidad significativa de botellas para obtener el material.

Al agregar PET en una proporción mayor al 5% a una mezcla de suelo-cemento disminuye levemente la resistencia, sin embargo la muestra cumple con los parámetros mínimos de 2.1MPa.

La densidad de la mezcla PET suelo-cemento disminuye aproximadamente en un 2% respecto a la mezcla suelo-cemento, debido a que el PET tiene menor densidad que los agregados y su forma aplanada no permite una cohesión entre las partículas de los materiales.

Bibliografía

BERNAL, César A. Metodología de la investigación. Bogotá: Prentice Hall. 2000

HIDALGO, Cesar. El caucho de llantas usadas como material para bases granulares y llenos estructurales. En: Ingenierías. s.d., p. 109 – 122.

MÉNDEZ, Carlos A. Metodología. Bogotá: McGraw-Hill, 2005

MONTEJO FONSECA. Alfonso. Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios y diseño. 3ª edición. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2006. 75 – 116 p.

TAMAYO Y T.Mario. Serie aprender a investigar. Módulo 2 ICFES. Cali: Universidad ICESI, (s.d.)

INVÍAS. Artículo 341-07.Base estabilizada con cemento.

INV E – 104 - 07: Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.

INV E – 123 - 07: Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

INV E – 125 - 07: Determinación del límite líquido de los suelos.

INV E – 126 - 07: Límite plástico e índice de plasticidad.

INV E – 133 – 07: Equivalente de arena de suelos y agregados finos.

INV E – 213 - 07: Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

INV E – 218 –07: Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5mm por medio de la máquina de los ángeles.

INV E – 227 – 07: Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.

INV E – 230 – 07: Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras.

INV E – 806 - 07: Relaciones de humedad – peso unitario de mezclas suelo-cemento.

INV E – 809 - 07: Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo-cemento.

Anexos