Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Civil | Facultad de Ingeniería

2016

Análisis de la resistencia y durabilidad de un suelo-cemento adicionando material no biodegradable polietileno malla raschel polisomba reciclada en diferentes porcentajes en relación con el peso del suelo

Angie Daniela Tirano Martínez
Universidad de La Salle, Bogotá

César Dario Moyano Cobos
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

Tirano Martínez, A. D., & Moyano Cobos, C. D. (2016). Análisis de la resistencia y durabilidad de un suelo-cemento adicionando material no biodegradable polietileno malla raschel polisomba reciclada en diferentes porcentajes en relación con el peso del suelo. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/113

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.

ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA Y DURABILIDAD DE UN SUELO-CEMENTO ADICIONANDO MATERIAL NO BIODEGRADABLE POLIETILENO MALLA RASCHEL (POLISOMBA) RECICLADA EN DIFERENTES PORCENTAJES EN RELACIÓN CON EL PESO DEL SUELO

ANGIE DANIELA TIRANO MARTÍNEZ

CÉSAR DARIO MOYANO COBOS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2016

Análisis de la resistencia y durabilidad de un suelo cemento adicionando material no biodegradable polietileno malla Raschel (polisombra) reciclada en diferentes porcentajes en relación con el peso del suelo

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

Director Temático

Msc. I.C. MARTÌN ERNESTO RIASCOS CAIPE

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÌA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2016

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

La Universidad de La Salle por permitir ser parte de la historia del lasallismo y aprender a formarnos como profesionales íntegros. A todos los docentes e ingenieros de la facultad de Ingeniería civil que nos acompañaron durante este aprendizaje. En especial mención al ingeniero Martìn E. Riascos C. director de este trabajo de grado, quien asesoró y acompañó en todo el proceso de elaboración de la investigación, gracias a su conocimiento y motivación se logró sacar adelante este proyecto.

A los laboratoristas de ingeniería civil, Oscar Antonio Malagón, Luis Eduardo Borja y Camilo Gómez Martínez quienes estuvieron presentes con su asesoría para la correcta ejecución de los ensayos y manejo de los equipos que se requirieron en este proyecto.

Finalmente, a todos nuestros compañeros lasallistas que nos acompañaron desde el inicio hasta el final de esta carrera, el apoyo y ayuda de cada uno de ellos fue de vital importancia para alcanzar este objetivo.

DEDICATORIA

Primero a Dios Todopoderoso por guiar mis pasos y darme la sabiduría para alcanzar este logro, a mi madre Marcela Cobos Rodríguez quien siempre estará conmigo para ser el ejemplo a seguir y brindarme apoyo incondicional en mi vida, a mis dos padres Edgar Darío Moyano Acevedo y Herman Fabián Sandoval Manrique por sus consejos y guía en momentos de dificultad, a mi abuela Amalia María Rodríguez Méndez quien gracias a su valioso conocimiento me ha aconsejado de las cosas buenas y malas de la vida.

A mis hermanos, Daniela Marcela Sandoval Cobos, Karen Lorena Sandoval Cobos, Sergio Iván Moyano Chacón y Mateo Alejandro Moyano Chacón por ser parte fundamental en mi vida y ser el ejemplo a seguir de ellos. A toda mi familia que de seguro sin el apoyo de cada uno de ellos no hubiera sido posible cumplir esta meta. A mi compañera de tesis Angie Daniela Tirano Martinez por esa ayuda inigualable y quien seguro lograra cosas grandes. Finalmente, a los profesores e ingenieros que con sus enseñanzas de tan hermosa profesión me encaminaron a ser un Ingeniero Civil.

Cesar Darío Moyano Cobos

DEDICATORIA

En primera instancia dedico este trabajo a Dios padre todopoderoso por darme salud y permitirme recorrer cada obstáculo que la vida me pone.

A mis padres por brindarme todo su apoyo económico, mi madre Luz Nelly Martínez Monrroy por brindarme todo su apoyo incondicional, por escuchar mis problemas, por trasnochar conmigo cuando lo necesitaba; mi padre Norberto Antonio Tirano Cuitiva por brindarme su apoyo incondicional, por ayudarme con los trabajos difíciles, por escuchar y entender los problemas que me surgen a diario; a ellos dos que los amo infinitamente y voy a estar agradecida toda mi vida.

A mis hermanos, Sara Alejandra Tirano Martínez por estar siempre a mi lado, por enseñarme hacer mejor persona y a Julián Mateo Tirano Martínez por que siendo un angelito en el cielo está guiando mis pasos.

A mis abuelitos por alegrarme los días y acompañarme en los momentos duros de mi vida

A mis amigas Mayerly Garcia y Alejandra Veloza, por estar siempre en esta etapa de mi vida, me escucharon, me ayudaron con este proceso e hicieron parte de este gran triunfo.

A mi compañero de tesis Cesar Darío Moyano Cobos por ser una gran persona, acompañándome en este proceso, y ser el refuerzo para este logro.

Finalmente, a todos mis amigos que hicieron parte de este proceso, por estar presentes, a los que hicieron parte directamente e indirectamente en la realización de esta tesis.

Angie Daniela Tirano Martínez

TABLA DE CONTENIDO

1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO 15

1.1. Planteamiento del Problema 15
1.2. Formulación del Problema 17
1.3. Justificación 17
1.4. Delimitación 18

2. OBJETIVOS 20

2.1. Objetivo general 20
2.2. Objetivos específicos 20

3. ANTECEDENTES 21

4. MARCO REFERENCIAL 31

4.1. Marco teórico 31
4.1.1. Suelos para estabilizar. 31
4.1.2. Cemento. 32
4.1.3. Suelo – cemento. 33
4.1.4. Factores que afectan la mezcla de suelo-cemento. 33
4.1.5. Polietileno de alta densidad (HDPE) 35
4.1.6. Suelo fibroreforzado. 36
4.1.7. Suelos reforzados con cemento y fibras. 37
4.1.8. Tipos de fibras 38
4.2. Marco conceptual 39
4.3. Marco Normativo 41
4.3.1. Plan de ensayos 43
4.3.2. Requisitos generales del suelo a estabilizar 44
4.3.3. Requisitos de diseño para el suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra. 46

5. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES 50

5.1. Caracterización del material de adición malla Raschel (Polisombra) 50
5.2. Cemento 53
5.3. Agua. 54
5.4. Suelo Natural 55
5.5. Informe final de los resultados de caracterización del material con respecto a las normas de I.N.V.E-13 65
6. DISEÑO DE LA MEZCLA 67
6.1. Diseño de mezcla suelo – cemento – polisombra 67
6.2. Relaciones humedad – densidad mezcla de suelo – cemento – polisombra 68
6.3. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento y suelo – cemento - polisombra 69
6.4. Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra 76
6.4.1 Valor de desgaste experiementalmente para los porcentajes optimos de cemento 83
6.5. Informe final de los resultados de los criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento. 85
7. ANALISIS DE RESULTADOS 87
8. CONCLUSIONES 95
9. RECOMENDACIONES 98
10. REFERENCIAS 99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Combinaciones de fibra vs longitud realizadas..... 22

Tabla 2. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo – cemento..... 45

Tabla 3. Rango normal de requerimientos de cemento para suelos. 47

Tabla 4. Informe final de las relaciones humedad – densidad de mezclas suelo cemento..... 65

Tabla 5. Informe final de la caracterzacion del material para la construccion de suelo – cemento – polisombra 66

Tabla 6. Informe final del cambio de volumen de mezclas de suelo cemento..... 81

Tabla 7. Porcentaje de pérdidas para los especímenes sometidos a desgaste 82

Tabla 8. Valores promedio de agua retenida..... 83

Tabla 9. Criterios de diseño para la mezcla de suelo – cemento..... 86

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Etapas previas y durante la estabilización con cemento.....35

Cuadro 2. Ensayos a realizar para caracterizar el material de suelo 41

Cuadro 3. Norma para determinar la resistencia a la tensión de la polisombra.....42

Cuadro 4. Normas para los diseños de suelo-cemento y suelo-cemento adicionando polisombra.....42

Cuadro 5. Número de ensayos en función de los porcentajes de adición de malla Raschel (polisombra) reciclada en los especímenes de suelo-cemento 43

Cuadro 6. Requisitos de los materiales para la construcción de suelo – cemento 44

Cuadro 7. Tabla de clasificación de suelos de la AASHTO 46

Cuadro 8. Criterios de diseño para la mezcla de suelo – cemento.....49

Cuadro 9. Requisitos del agua no potable para la construcción de suelo-cemento.....54

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resistencia a la tensión de diferentes longitudes de fibras de polisombra ...51

Gráfica 2. Porcentaje de deformación de diferentes longitudes de fibras de polisombra 51

Gráfica 3. Modulo de Young de diferentes longitudes de fibras de polisombra.....52

Gráfica 4. Curva granulométrica.....61

Gráfica 5. Peso unitaria seco vs humedad para un suelo – cemento, con 1.5% de polisombra.....64

Gráfica 6. Registro de los datos de resistencia de un suelo cemento sin adicion de polisombra.....71

Gráfica 7. Registro de los datos de resistencia de un suelo cemento con 0.5% adicion de polisombra.....72

Gráfica 8. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 1% adición de polisombra.....72

Gráfica 9. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 1.5% adición de polisombra.....73

Gráfica 10. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento (2.1 Mpa) con 5% de cemento 74

Gráfica 11. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 7% de cemento 75

Gráfica 12. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 9% de cemento. 75

Gráfica 13. Cambios de volumen durante los 12 ciclos para espécimen con cemento 9% 80

Gráfica 14. Desgaste para el porcentaje optimo de cemento (8.2%) sin adicion de polisombra.....83

Gráfica 15. Desgaste para el porcentaje optimo de cemento (7.8%) con 0.5% de adicion de polisombra 84

Gráfica 16. Desgaste para el porcentaje optimo de cemento (6%) con 1% de adicion de polisombra.....84

Gráfica 17. Desgate para el porcentaje optimo de cemento (8.3%) con 1.5% de adicion de polisombra 9%.....85

Gráfica 18. Porcentajes de humedad vs porcentajes de fibras de polisombra con respecto a la dosificación de cemento.....89

Gráfica 19. Comparación de los porcentajes de polisombra con respecto al esfuerzo y a las dosificaciones de cemento 90

Gráfica 20. Comparación de las dosificaciones de cemento con respecto al esfuerzo y al porcentaje de polisombra 91

Gráfica 21. Porcentajes de perdidas vs al porcentaje de cemento para cada uno de los porcentajes de fibras.....92

Gráfica 22. Comportamiento de las perdidas en cuanto al porcentaje de fibras de polisombra.....93

Gráfica 23. Comportamiento de las perdidas en cuanto al porcentaje de cemento.....94

LISTA DE IMÁGENES

Imágen 1. Tela verde “polisombra" 36

Imágen 2. Corte de polisombrea longitud 4cm 53

Imágen 3. Ensayo de tensión a la polisombra 55

Imágen 4. Ubicación de la cantera donde se extrajo el suelo 57

Imágen 5. Registro fotográfico del ensayo de contenido orgánico 58

Imágen 6. Registro fotográfico ensayo limite líquido, cazuela de Casagrande 59

Imágen 7. Registro fotográfico ensayo del límite plástico, obtención de los rollos 60

Imágen 8. Registro fotográfico del ensayo de granulometría 63

Imágen 9. Registro fotográfico ensayo humedad – peso unitario seco mezclas suelo - cemento 68

Imágen 10. Registro fotográfico ensayo relación humedad – densidad mezcla suelo – cemento – polisombra 69

Imágen 11. Registro fotográfico ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento – polisombra 70

Imágen 12. Registro fotográfico ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento – polisombra 71

Imágen 13. . Registro fotográfico ensayo durabilidad para el primer espécimen, cambio volumétrico 78

Imágen 14. Registro fotográfico ensayo durabilidad para el segundo espécimen, proceso de desgaste 78

1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

1.1. Planteamiento del Problema

Con base al proyecto de acuerdo 113 del (Consejo de Bogotá, 2011) por medio del cual se establecen los centros de disposición de residuos para Bogotá, la ciudad produce aproximadamente 6500 toneladas de residuos sólidos diariamente, de los cuales alrededor de un 70% son de carácter aprovechable o reciclables. (Sección II. Razones del proyecto, para. 1).

La malla Raschel la cual en el mercado es conocida como polisombra, es un material no biodegradable fabricado mediante cintas de polietileno de alta densidad; la producción anual del polietileno es más de 80 millones de toneladas métricas. (Mariano, 2012) (Sección Polietileno, introducción, para. 1)

Esta malla, es de uso común en construcciones, ganadería, avicultura, invernaderos, entre otros. En el sector de la construcción específicamente, se emplea comúnmente para cerramientos, barreras contra caída de objetos y dispersión de partículas, cubrimientos de materiales el cual evita desperdicios y deterioros de los mismos y en algunos casos se utilizan como medida de prevención en estabilidad de taludes, entre otros. La polisombra por lo general después de cumplir su uso respectivo, va a parar a botaderos o escombreras generando un impacto ambiental negativo ya que por su composición química puede llegar a tardar más de 150 años en degradarse.

A partir de lo mencionado anteriormente, con esta investigación se busca dar una posible alternativa de reciclaje y reutilización de esta malla debido a que sus características y propiedades físico – químicas, permiten dar pie para emplearla en una

mezcla de un suelo mejorado con cemento. Paralelamente se puede generar un aporte significativo hacia la conservación de los recursos naturales y la salud humana ya que según la decreto 548 de la Alcaldia de Bogotá (2015) por el cual se adopta el plan de gestión integral de residuos sólidos para la ciudad de Bogotá, se busca reglamentar la recolección, tratamiento y procesamiento de los residuos en producir nuevos bienes, en restaurar o mejorar los suelos.

Si bien, es sabido que toda construcción civil requiere de materiales que se obtienen producto de procesos tanto químicos como físicos, con el pasar de los años se ha incrementado la demanda de canteras, cementeras, ladrilleras y demás industrias que generan millones de toneladas de material y contaminación al ambiente. Aunque es de resaltar que las escombreras y los lugares de disposición final clasifican de la mejor manera posible los desechos de obra, la polisombra por ser un material poco estudiado y visto de manera insignificante en cuanto ha cumplido su función, termina finalmente en los rellenos sanitarios.

Hoy en día el auge de construir estructuras civiles sostenibles ha cogido más fuerza y aceptación por parte de los organismos legislativos y los ingenieros que están en la búsqueda constante de mejorar los procesos constructivos con el fin de hacer obras más resistentes y durables. En el campo de las vías en los últimos 5 años en Bogotá y a lo largo del territorio nacional la construcción sostenible de vías se ha empleado con el uso y reciclaje de llantas usadas, alrededor de un 5% debe ser usado este material en el proceso del asfalto, adicionalmente reciclar el pavimento ya deteriorado que se conoce como (RAP) como mínimo un 10% con relación al total de metros que se construyan de vía. Si bien la polisombra puede llegar a mejorar el suelo, se encontraría un aporte

significativo en la resistencia y durabilidad de una subrasante estabilizada con cemento. De esta manera se eliminaría de manera práctica y útil el desecho y contaminación que se produce diariamente.

1.2. Formulación del Problema

¿Cómo es el comportamiento en cuanto a la resistencia y durabilidad de un suelo – cemento adicionándole material reciclable (malla Raschel) no biodegradable de polietileno de alta densidad?

1.3. Justificación

El presente trabajo de investigación, busca dar una alternativa de diseño de un suelo - cemento, proponiendo la reutilización de la malla Raschel (polisombra), como material adicionado en el proceso de elaboración de la mezcla. Este material por ser no biodegradable puede llegar a mejorar su comportamiento mecánico ya que sus características químicas de polímero presentan considerables resistencias a la deformación y durabilidad.

Por otra parte, se pretende dar una disminución del impacto ambiental en las obras de ingeniería civil que generan desechos de construcción diariamente. Como consecuencia, el sector de la construcción es uno de los más importantes para la economía de cualquier país, en este caso de Colombia, donde este sector es el causal de los mayores ingresos. Sin embargo, este sector también provoca un grave impacto en el entorno, desde la extracción de áridos, la fabricación de cementos hasta la proliferación de escombreras. Es por esto que la industria de la construcción es un gran consumidor de recursos no

renovables y una importante fuente de residuos y contaminación para el aire, suelo y el agua.

Según el Sistema Nacional Ambiental [SINA] se necesita más de dos toneladas de materias primas por cada metro cuadrado de vivienda que se construye. La cantidad de energía asociada a la fabricación de los materiales que componen una vivienda puede ascender aproximadamente a un tercio del consumo energético de una familia durante un periodo de 50 años. La producción de residuos de construcción y demolición supera la tonelada anual por habitante. (sección ordenamiento ambiental territorial [SINA],2016)

Es por esto que esta investigación pretende obtener resultados favorables que represente un aporte a la disminución del impacto ambiental producido por el desecho de la malla Raschel aprovechando sus propiedades en la mejora de un suelo – cemento, el cual ayudaría a reducir las capas restantes de una estructura de un pavimento y así mismo una reducción en su costo de construcción.

1.4. Delimitación

Se trabajó con los ensayos descritos en el artículo 350-13 de la normativa Invías para la realización de un suelo-cemento. El plan de ensayos correspondiente, es nombrado en el marco legal del presente documento.

No se realizará repetibilidad en ninguno de los ensayos descritos en el artículo 350-13 del Invías.

La metodología empleada para el diseño de la mezcla del suelo – cemento, fue bajo las especificaciones de la Portland Cement Association [PCA], para la determinación del porcentaje óptimo de cemento.

Para el desarrollo de esta investigación sólo comprende el análisis de resistencia y durabilidad de un suelo – cemento, utilizando cemento Portland tipo I.

El suelo a utilizar será un suelo, cuyas características cumplan con las especificaciones del artículo 350-13 de Invías (ver **cuadro 6**).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Determinar la resistencia y durabilidad de un suelo - cemento adicionando material no biodegradable polietileno malla Raschel (polisombra) en diferentes porcentajes, en relación con el peso del suelo.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Evaluar las propiedades del suelo, teniendo en cuenta los ensayos de clasificación de material, expuestos por el artículo 350-13 del Instituto Nacional de Vías [Invías]

2.2.2. Encontrar el porcentaje óptimo de cemento, por medio de la metodología de la Portland Cement Association [PCA].

2.2.3. Encontrar la longitud de fibra con mayor resistencia a la tensión, mediante ensayos que se realizaran a las fibras con longitudes de 4, 6, 8, 10, 12, 14cm, esto para determinar la longitud que se va a trabajar durante la investigación.

2.2.4. Evaluar la resistencia y durabilidad del suelo - cemento sin adición y con adición de fibras, variando su porcentaje de material agregado a partir del peso total de cada muestra.

2.2.5. Analizar la resistencia y durabilidad del suelo – cemento con la adición de malla Raschel, analizando los resultados arrojados por los ensayos

3. ANTECEDENTES

A medida que ha pasado el tiempo, se han realizado varios estudios para encontrar nuevos usos a los materiales no biodegradables cuando estos cumplen su vida útil. Tales materiales como el PET, llantas usadas, malla Raschel, residuos de construcción, entre otros, han venido generando un impacto ambiental negativo por lo que se ha visto en la necesidad de implementar alternativas de solución, con el objetivo de mitigar este problema buscando así mejorar procesos industriales y constructivos.

A nivel internacional México tiene gran influencia en las investigaciones sobre suelos fibroreforzados, de esto se tiene:

En la Universidad Autónoma de Querétaro, México Hurtado Rosales (2015) por medio de su investigación “Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras”; tuvo por objetivo principal, conocer el comportamiento de un suelo expansivo reforzado con fibras y determinar las mejoras que este presenta en comparación al suelo en estado natural. (p. 7)

Con respecto a su metodología Hurtado Rosales (2015) utilizo un suelo de arcilla expansiva, de ella se extrajeron muestras alteradas, también uso micro fibras de polipropileno; la investigación consto de 9 puntos principales, los cuales brindaron datos para analizar el efecto de la adhesión de las micro-fibras de polipropileno en el comportamiento del suelo. (p.37)

La propuesta de dosificación en porcentaje de peso seco del suelo cambiando la longitud, fueron hechas con base en una revisión bibliográfica, considerando las opiniones de varios autores con respecto a las combinaciones óptimas.

Tabla 1
Combinaciones de fibra vs longitud realizadas

% Dosificación	l (mm)	N° Probetas
0.5%	4.75 mm	5
	9.5 mm	5
	19 mm	5
1.0%	4.75 mm	5
	9.5 mm	5
	19 mm	5
1.5%	4.75 mm	5
	9.5 mm	5
	19 mm	5
2.0%	4.75 mm	5
	9.5 mm	5
	19 mm	5

Nota. Fuente: Hurtado Rosales (2015 p. 43)

Hurtado Rosales (2015) realizo 5 probetas por cada combinación para que tuviera una mejor validación estadística. El contenido de fibras se calculó por medio de $PF = \frac{WF}{W}$, donde WF representa el peso de las fibras y W es el peso de suelo seco del material. (p. 43)

Los valores que se adoptaron en la investigación PF fueron 0, 0.005, 0.01, 0.015 y 0.02. Las fibras que se utilizaron, fueron mezcladas con el suelo, este con su contenido de humedad óptimo. En la determinación de la curva de compactación proctor, Hurtado

utilizó la metodología de proctor modificado, estos resultados le arrojaron la humedad óptima y el peso específico seco máximo.

Se realizó pruebas de resistencia al esfuerzo cortante, para cada combinación de porcentaje de dosificación de fibra vs longitud de la misma, Hurtado realizó probetas de suelo fibro-reforzado para ser sometidas a este ensayo, las anteriores se realizaron por medio de la compactación de proctor estándar, igualmente se realizó el mismo procedimiento para las probetas de suelo no reforzado, lo anterior para tener un cuadro comparativo.

A demás de los ensayos ya mencionados, realizó la prueba de expansión – compresión unidimensional, valor de soporte de California [CBR], tensión indirecta (Prueba Brasileña).

Con respecto al análisis de resultados, obtuvo que el suelo estaba conformado en su gran mayoría por finos, siendo este el 98.1% del total de la muestra; con respecto a los límites de consistencia, el suelo se clasifico como una arcilla de alta compresibilidad, obtuvo como límite liquido 76%, un límite plástico de 32.4% y un límite de contracción de 13.4%; en la determinación del potencial expansivo y por medio de los criterios de los autores Seed (1963), Raman (1967) y Chen (1975), consideró que el suelo es altamente expansivo.

Para los parámetros que se necesitaron para poder realizar la mezcla suelo-fibra, Hurtado Rosales (2015) realizo la adición en cuanto al porcentaje de peso seco del suelo (0 .5%, 1%, 1.5% y 2%), para cada una de las longitudes de fibra (9.5 y 19 mm), se ensayó cinco probetas por cada combinación y para asegurar los resultados, se repitieron

5 ensayos por combinación para la compresión no confinada. Con base a los datos arrojados, observó que la combinación que presenta el mayor porcentaje de mejora es la de la fibra con longitud de 9.5 mm con una dosificación de 2%, esta se consideró como óptima.

En el análisis de expansión- consolidación unidimensional, se concluyó que para el suelo re moldeado la disminución fue de 12.8% menor que la del suelo fibroreforzado y en cuanto a presión de expansión fue 4.2%, menor que la del fibroreforzado. en el análisis del CBR, se confirmó que las fibras si presentaron una mejora ante pruebas de penetración como el CBR.

Finalmente, obtuvo como conclusiones, que el suelo fibro reforzado presenta una buena opción de mejoramiento de suelos; la dosificación de la fibra es muy importante en la resistencia a la compresión no confinada, se obtuvo un mejor desempeño en general con mayores dosificaciones de fibra. La inclusión de las fibras genero un comportamiento más dúctil ante pruebas de tensión en comparación al suelo sin refuerzo

En una investigación realizada por Clariá & Vettorelo (2012) en el laboratorio de geotecnia de la Universidad Nacional de Córdoba, observaron el efecto de la inclusión de fibras de polipropileno que ejercía en el comportamiento mecánico de la arena tanto en estado suelto como en estado denso. (p. 1)

Ellos utilizaron una arena silícea de origen aluvial a la cual le adicionaron en relación con el peso de suelo seco fibras de polipropileno de 10 mm de longitud en 0, 0.5, 1,2,3 y 4%. Los ensayos realizados fueron triaxiales los cuales se ejecutaron sobre muestras de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Ensayos de corte directo sobre muestras de 63.5

mm de diámetro y 37.5 mm de altura. Finalmente, el ensayo de velocidad de ondas en endómetro modificado con el fin de medir la propagación de ondas de corte en las mezclas de suelo con fibra.

Los análisis que los autores determinaron a partir de los resultados fueron que la resistencia al corte del suelo aumentaba con el contenido de fibras y asimismo la eficiencia de estas incrementaba a medida que el confinamiento crecía, además la deformación axial necesaria para alcanzar la máxima tensión desviadora cuando la arena se encuentra en estado denso, aumento con el contenido de fibras.

De manera más clara se puede decir que si la adición de las fibras de polipropileno produjo un aumento en la resistencia al corte, es necesario que el suelo experimente mayores deformaciones para desarrollar dicha resistencia (aclaran los autores).

En cuanto al ensayo de onda de corte, fue utilizado para determinar el módulo de corte máximo y así determinar la rigidez del suelo la cual disminuía con la inclusión de fibras. Finamente concluyeron que la adición de fibra producía un empaquetamiento del suelo presentando una relación de vacíos mayor el suelo reforzado que sin refuerzo y aclaran que el uso de esta fibra se hace más notorio cuando el suelo se somete a niveles de deformación altos y no a medios o bajos mejorando así su comportamiento mecánico.

Murillo, (2010), obtuvo como conclusión que los valores del CBR se incrementan al adicionar cemento al mismo, que la humedad óptima se va logrando a medida que la dosis de cemento va aumentando; para que las propiedades del suelo mejoren en todo el

tramo estabilizado, es necesario realizar una mezcla homogénea, evitando así las concentraciones máximas de cemento en lugares específicos.

Con el tiempo se evidenció, que los pavimentos sufren fallas por causa de los esfuerzos ejercidos por el suelo, ya que se encuentran suelos poco competentes para soportar cargas debido al tráfico; a medida que surgen los problemas, avanzan las soluciones, este caso, se han realizado estudios acordes a esta problemática.

De acuerdo a la investigación de López Ortiz (2013) “suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)”, realizada en la Escuela de Ingeniería de Antioquia; que tuvo por objeto general, analizar el cambio a la resistencia al corte de un suelo arcilloso cuando se adicionan fibras de materiales de plástico reciclado.

Para la ejecución de la investigación López Ortiz (2013), utilizo un suelo arcilloso con inestabilidades geológicas y baja cohesión, por tal razón se buscó la mejora de sus propiedades mecánicas a partir del reforzamiento con fibras de plástico reciclado. Esta muestra fue la suficiente para llevar acabo el moldeo de 52 probetas de aproximadamente 510 cm3 y 500 gr para los ensayos de clasificación del suelo, los ensayos realizados fueron los de granulometría por hidrómetro, límites de Atterberg, gravedad específica y compactación. De la muestra obtenida, se dejó 4 probetas sin adición de material PET, estas se fallaron a compresión simple, para así saber las diferencias de sus resistencias con las que si tenían el material PET.

Con respecto a los porcentajes del material PET, estos López Ortiz (2013), los escogió aleatoriamente y fueron 0.2%, 0.5%, 1%, 1.5% del peso total de la muestra, con

unas longitudes de 3 y 5 cm, con diámetro de 0.5 mm; realizó para cada porcentaje 6 probetas para cada longitud, con un total de 48 probetas alteradas.

Finalizando las pruebas se procedió a comprar los resultados y a dar las respectivas conclusiones, López Ortiz (2013) concluyó que a medida que la cantidad de materia PET aumenta, va aumentando la resistencia al igual que la deformación; la cohesión como parámetro de medida a la resistencia al corte también aumenta, las mejoras de las propiedades del suelo, se pueden ver mejor a medida que es mayor la longitud del material PET.

De acuerdo a Ortiz & Salazar (2016) donde realizaron la investigación "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", realizada en la Universidad de La Salle; la cual tuvo por objeto, el análisis de una base estabilizada con cemento, adicionándole material PET. Esto con el propósito de evaluar los beneficios que pudiera generar, la sustitución de una franja de material fino de la base, por una franja de material PET (pasa tamiz #4, retiene #16).

Para llevar a cabo esta investigación Ortiz & Salazar (2016) realizaron 25 ensayos para caracterizar el material; para ello utilizaron 5 porcentajes de sustitución de PET, de 0%, 25%, 50%, 75%, 100%, estos con sus respectivos ensayos de caracterización, fabricaron 73 probetas en función de los porcentajes de sustitución de tereftalato de polietileno en la base estabilizada con cemento. Para el material de sustitución PET se

realizó el ensayo de granulometría, pasa No. 4 -Retiene No. 16 del material granular, en los diferentes porcentajes mencionados anteriormente. Por otro lado, una vez que ellos caracterizaron el material, diseñaron la base, teniendo en cuenta todos los lineamientos de la normatividad AASTHO. Finalmente, concluyeron que la resistencia a la compresión simple, con la mezcla de base estabilizada con cemento y PET, cumple con los rangos establecidos por el articulo 351 Invías; también se evidencio un incremento en la resistencia última, en cuanto se iba aumentando el porcentaje de PET adicionado.

Por otra parte, se encontró que en la Universidad de La Salle los estudiantes Izquierdo & Valderrama (2012) realizaron una investigación donde analizaron una base estabilizada con cemento modificada con grano de caucho de llanta. Ellos buscaron reciclar los desechos de llanta que se producen diariamente en el país; para esto, ellos diseñaron una base estabilizada con cemento realizando una caracterización fisicomécanica, posteriormente realizaron muestras suelo – caucho determinando el porcentaje de caucho que ofreció mejores resultados. Principalmente ellos encontraron que con la adición de caucho de llanta las muestras de suelo – cemento presentaron una menor variación volumétrica, de esta manera mejoraba la expansión y contracción. Por otra parte, el porcentaje óptimo de caucho fue el 5% ya que encontraron que con esta cantidad las propiedades físico – mecánicas permanecían constantes con base al suelo natural.

Geosistemas Pavco (2012) publicó los beneficios que tienen los geosintéticos para la estabilización de los suelos, allí expone que el uso de estos es: separación, refuerzo de capas granulares, estabilización de subrasantes, filtración y drenaje. Siendo como

objetivo primordial (capítulo 5) “proporcionar las herramientas que permitan determinar correctamente un espesor de material granular apropiado, que, en conjunto con un geosintético de refuerzo, permitan brindar una plataforma de trabajo adecuada mediante la estabilización mecánica de la subrasante.” Mediante estudios elaborados por Pavco, se tiene que, los efectos de la utilización de un geo sintético de refuerzo sobre la capa de subrasante de una estructura de pavimento son: Incremento de la capacidad portante del sistema, mejoramiento de las propiedades mecánicas de los materiales que conforman la estructura de pavimento, incremento de la vida útil de la vía, aumento de los ejes equivalentes del diseño de la vía. (Geosistemas Pavco, 2012 cap 5: p.1)

Según Rincon, Quintana, Pinzon, & Aguirre (2006) realizaron una investigación en la cual utilizaron desecho de PVC como material de adición, para modificar el comportamiento de una subbase granular. Ellos utilizaron un material granular de subbase de la cantera Panamá Tesoro ubicada en el municipio de Soacha y el desecho de PVC fue en polvo que pasaba el tamiz No 200 adicionando en 1, 3 y 5% en relación al peso del suelo. Ellos se rigieron bajo la normativa del Invías. Los resultados que obtuvieron de la investigación fue que en el caso de la adición de 1%, se obtuvo un CBR inferior al obtenido con el material granular tipo subbase natural y observaron que a partir del 1.8% el CBR equivalente al del material natural se incrementó. Posteriormente en el caso del peso unitario, para la mayoría de las muestras disminuía, en los porcentajes de 3 y 5% y más significativo en el de 3%. Finalmente, de las mezclas realizadas, encontraron que con el porcentaje de adición de desecho de PVC del 3% se presentó el mayor aumento de resistencia y el menor valor de peso unitario, lo que podría indicar que este es un porcentaje óptimo o el más cercano a este.

En la Pontificia Universidad Católica de Chile los señores Rivera & Garcia (2014) realizaron una investigación donde analizaron el comportamiento mecánico de la malla Raschel la cual es también utilizada para la captura de niebla para aliviar la escasez de agua en algunas regiones áridas del mundo. Ellos decidieron analizar el comportamiento de la polisombra debido a que los fuertes vientos provocaban que la malla cediera y por ende se rasgara completamente. Por medio de ensayos de tracción ellos encontraron que la malla Raschel es un material aniso trópico, ya que presento un comportamiento rígido y elástico en la dirección longitudinal, mientras que en la dirección transversal presento una extremada flexibilidad (prácticamente sin rigidez).

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. Marco teórico

En Colombia se está requiriendo inversión en obras civiles, en materia de infraestructura vial, la inversión pasaría del 1.3% del PIB observado en 2010-2013 a niveles del 1.6% del PIB en 2014-2016 y al 1.5% del PIB durante 2017-2019 [...] (ANIF, 2014)

A partir de las estadísticas anteriores, es clara la necesidad de tener suelos con alta capacidad portante que cumplan con las especificaciones técnicas exigidas acorde a la demanda de inversión planeada. Por otro lado, se requiere que las estructuras de los pavimentos diseñados cumplan con una durabilidad estimada; para ello se tienen diferentes formas de mejorar la resistencia y durabilidad de un suelo con este propósito.

Según IECA (2013), la estabilización de suelos es una técnica cuyo fin es modificar sus características mediante la incorporación de un conglomerante (normalmente cal y/o cemento) para permitir su aprovechamiento. Con esta práctica se puede:

"Permitir el aprovechamiento de suelos de la traza de deficiente calidad, […] reducir la sensibilidad al agua de los suelos y con ello aumentar su resistencia a la erosión, […] obtener una plataforma estable de apoyo del firme que colabore estructuralmente con el mismo. […]" (p.2).

4.1.1. Suelos para estabilizar.

Sabiendo que no todos los suelos se pueden estabilizar, se debe hacer una caracterización en la cual se basa en la identificación de un suelo como, arena, limo,

arcilla, suelo orgánico y en la determinación de los porcentajes de finos y su plasticidad, y por ello se deben tener en cuenta sus características de deformalidad, expansividad, sensitividad, las cuales ocasionan problemas en la estructura de pavimento. (Loaiza, 2009)

Loaiza expone que los ensayos para realizar la caracterización de los suelos, se pueden dividir en tres grupos:

Ensayos básicos de identificación

Ensayos complementarios de identificación

Ensayos de caracterización del comportamiento

"Los ensayos básicos de identificación dependen únicamente de la naturaleza del suelo y por tanto, de sus propiedades intrínsecas, siendo estas la granulometría y los límites de consistencia (límites de Atterberg)."

"Los ensayos complementarios, por su parte, se refieren a características relativas al estado natural del suelo tales como: humedad, densidad natural, contenido de materia orgánica y de ciertas sales.".

"los ensayos de caracterización del comportamiento, tiene por objeto indicar las propiedades que el suelo puede alcanzar tras su tratamiento en carreteras".

4.1.2. Cemento.

De acuerdo con el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), "el cemento para la estabilización podrá ser del tipo portland (I, II o III), el cual deberá cumplir lo

especificado en las normas NTC 121 y NTC 321; los documentos técnicos de cada proyecto indicarán el tipo de cemento por emplear.

Cuando existan cantidades peligrosas de sulfatos en los agregados, se deberá emplear un cemento resistente a ellos" (IDU, 2006, capitulo 420 – 05, p.5)

4.1.3. Suelo – cemento.

El suelo – cemento se define como "Una mezcla de suelo con cantidades medidas de cemento Portland y agua, compactada a una alta densidad" (HOLCIM, agosto de 2003).

De acuerdo con American Concret Institute [ACI], puede definirse también al suelo – cemento como "Un material que se produce mezclando, compactando y curando una combinación de suelo/agregado, cemento Portland, agua y posiblemente adiciones incluyendo puzolanas, para formar un material endurecido con propiedades específicas de ingeniería (ACI 230.1R)" (Concreto, 2006)

4.1.4. Factores que afectan la mezcla de suelo-cemento.

a. **El tipo de suelo:** tiene influencia principalmente por su composición química y su granulometría. Los suelos que pueden ser tratados con cemento, no contienen partículas mayores de 7.5 cm o de un tercio del espesor de la capa tratada, menos del 50% de él pasa el tamiz de 0.0074 mm, el límite líquido es inferior a 40 % y el índice plástico menor a 18%.

   Algunas arcillas muy plásticas, que se salen de los límites anteriores, han sido exitosamente tratadas con cemento después de un tratamiento previo con 2 o 3% del mismo cemento o de cal hidratada, con el que se logra dar al suelo mayor

trabajabilidad y abatir su plasticidad. El tiempo de curado para este tratamiento previo no suele exceder de 2 o 3 días. (Fonseca, 2006, p. 113)

b. **La cantidad de cemento.:** la dosificación de las mezclas suelo-cemento viene a ser a fin de cuentas la cuestión fundamental, pues el cemento, es el elemento más costoso y fijar su proporción determina la factibilidad técnica de la estabilización, aparte de que las propiedades que se logren para la mezcla dependen también esencialmente de la cantidad de cemento que se emplee (Fonseca, 2006, p. 114)

En el proceso de estabilización de suelos con cemento se siguen etapas previas y durante la ejecución de ésta; como se muestra en el **cuadro 1**, etapas previas y durante la estabilización con cemento.

Cuadro 1
Etapas previas y durante la estabilización con cemento

ETAPAS	OBJETIVO	EQUIPOS USUALES
Etapas previas a la ejecución		
1. Clasificación del suelo	Identificación de la naturaleza y características del suelo.	- Ensayos de laboratorio (granulometría, plasticidad, humedad, materia orgánica, etc).
2. Elección y estudio de dosificación del conglomerante	Definición del conglomerante y ensayos para definir la dosificación.	- Estudio de laboratorio (Proctor, CBR, resistencia).
Etapas durante la ejecución		
1. Preparación del suelo		
- Escarificado y disgregación	Disgregar el suelo	- Pala, bulldozer o motoniveladora con ripper
- Eliminación de gruesos	Suprimir elementos de tamaño superior a 80 mm	- Equipos mecánicos o agrícolas - Machacadora in situ
- Nivelación	Obtención de la rasante	- Motoniveladora
- Aireación o humectación	Conseguir la humedad óptima Proctor (incluyendo la de aportación en el caso de vía húmeda)	- Aireación: ripper o estabilizadora - Humectación: camión cisterna con barra regadora, distribuidor de lechada
2. Distribución del conglomerante – por vía seca – por vía húmeda	Aporte del conglomerante con la dotación requerida de acuerdo con la fórmula de trabajo y el espesor a tratar	- Manual (cuadrícula de sacos) (solamente en obras de reducido tamaño o importancia) - Distribuidor de conglomerante (en polvo o lechada)
3. Mezclado	Mezcla del suelo con el conglomerante y el agua, logrando una mezcla homogénea	- Pulvimixer o rotavator (solamente en obras de reducido tamaño o importancia) - Recicladora-estabilizadora
4. Compactación inicial	Obtención de la densidad en el fondo de la capa, precompactando el suelo	- Rodillo liso vibrante
5. Refino	Obtención de la rasante definitiva. Mejora de la regularidad superficial	- Motoniveladora
6. Compactación final	Obtención de la densidad requerida (≥ 97-98 % de la máxima Proctor modificado)	- Rodillo liso vibrante + rodillo de neumáticos en ocasiones - Rodillo mixto
7. Riego de curado - Con agua - Con emulsión	Mantener la superficie húmeda Crear una película impermeable	- Cuba de agua con barra pulverizadora - Cuba de emulsión y lanza - Cuba de emulsión con barra regadora
8. Protección superficial en caso necesario	Proteger el riego de curado con emulsión si va a circular tráfico sobre el mismo	- Extendedora de gravilla y rodillo de neumáticos

Nota. Fuente: Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2013, p. 9)

4.1.5. Polietileno de alta densidad (HDPE).

El HDPE está definido por una densidad mayor o igual a 0,941 g/cm^3. El HDPE tiene un bajo grado de ramificación y por lo tanto fuertes fuerzas intermoleculares y resistencia a la tracción. El HDPE puede ser producido por catalizadores cromo/sílice, catalizadores de Ziegler-Natta o catalizadores de metalícenlo. La falta de ramificación se asegura por una elección apropiada de catalizador (por ejemplo, catalizadores de cromo o catalizadores de Ziegler-Natta) y condiciones de reacción. El polietileno de alta densidad se utiliza en productos y envases, tales como jarras de leche, botellas de

detergente, envases de margarina, contenedores de basura y tuberías de agua. Un tercio de todos los juguetes están fabricados en polietileno de alta densidad. En 2007, el consumo de polietileno de alta densidad global alcanzó un volumen de más de 30 millones de toneladas. (Tecnología de los plásticos, 2014, para. 1)

a. **Polisombra:** es un material de uso necesario en obras de construcciones viales y la construcción general, son telas fabricadas a base de plástico polipropileno el cual garantiza un fácil manejo y una excelente calidad y durabilidad, ya que esta posee un aditivo UV para conservar la durabilidad (Plastempack de Colombia LTDA, 2015)

Imágen 1. Tela Verde "polisombra". Fuente (Plastempack de Colombia LTDA, 2015)

4.1.6. Suelo fibroreforzado.

El suelo fibroreforzado se define al suelo el cual se le incorporan fibras, siendo estas las que le aumentan la resistencia al corte principalmente a grandes deformaciones y le brinda mayor ductilidad tanto a suelos granulares como a suelos cohesivos. (Claria, 2014, p 21)

Según el estudio de Claria (2014) en su recolección de datos bibliográficos, considera que: en primera instancia, se puede considerar al suelo reforzado como la suma de dos materiales diferenciados (suelo y fibras). Las fibras son inclusiones que ocupan los espacios vacíos del suelo, sin modificar su estructura original; de acuerdo a esto, el volumen de las fibras a adicionar se encuentra limitado por el volumen de vacíos del suelo (p. 30).

En segunda instancia el suelo fibroreforzado se considera a la conformación de una fase solida de un material nuevo al suelo y fibras, mientras que los vacíos son ocupados por agua y aire.

4.1.7. Suelos reforzados con cemento y fibras.

Por otra parte, Claria (2014), experimentó con suelos reforzados tanto con fibras como mediante la adición de cemento Portland, concluyeron que la adición de fibras cambia el comportamiento frágil del suelo-cemento. (p. 32).

Los autores, mediante ensayos, obtuvieron resultados favorables en cuanto a la resistencia, esto se da a medida que se le adicionaba cemento al suelo con fibras.

Finalmente, concluyo que a medida que se le adicionaba cemento al suelo con fibras, los productos de hidratación del mismo se adhieren a la superficie de la fibra, aumentando su rugosidad e incrementando en el módulo de deformación.

4.1.8. Tipos de fibras

a. Fibras sintéticas: las fibras más frecuentemente utilizadas son las de polipropileno. Estas fibras son provenientes de la reutilización de desechos, tales como fibras de polietileno tereftalato PET, polietileno de alta densidad y fibras de gomas de neumático; Con respecto a los contenidos de fibras usuales en el suelo, utilizan un porcentaje que varía entre el 0.25% y el 3% respecto al peso de suelo seco. (Claria, 2014, p. 35).

b. Fibras Naturales: son fibras de origen orgánico, el refuerzo de suelos mediante fibras naturales constituye una técnica de mejoramiento de suelos ecológicamente amigable y de muy bajo costo. El uso de estas fibras parece ser prometedor en países subdesarrollados donde las fibras naturales son obtenidas a partir de los restos de frutas y plantas usadas en la industria alimenticia. Sin embargo, este tipo de fibras se caracterizan por una baja resistencia química y a la corrosión, lo que, sumado a la biodegradación, limitan su uso a estructuras provisorias y de bajo riesgo frente a una eventual falla por degradación. Para atenuar esta limitación, algunos investigadores proponen el uso de fibras naturales recubiertas con materiales sintéticos. (Claria, 2014, p. 36).

4.2. Marco conceptual

Las definiciones que se enuncian a continuación establecen los conceptos y mecanismo de estabilización de suelos con cemento, por otra parte se definen las características de las propiedades generales a tener en cuenta en el análisis de cualquier tipo de suelo mejorado.

a. **Estabilización de suelos:** alteración de las propiedades físicas del suelo, incrementando su resistencia y su durabilidad con el fin de obtener un material de fundación satisfactorio. Los materiales más utilizados actualmente son el cemento, la cal, el asfalto y la arena. Para el empleo de estos estabilizantes se pueden utilizar procedimientos mecánicos, de drenaje, por medios eléctricos, por empleo de calor y calcinación y finalmente por medios químicos.

   (Fonseca, 2006, p. 75)

b. **Estabilización de suelos con cemento:** la solución formada por la mezcla cemento y agua reacciona con las partículas del suelo, reacción en la que los iones de calcio tienden a agrumar las partículas de suelo cargadas negativamente produciéndose su floculación por la acción de la gravedad. Al compactar la mezcla, se produce una reacción del calcio con la sílice y alúmina produciéndose complejos compuestos de silicatos y aluminatos que aumentan lentamente la resistencia de la mezcla con el tiempo. (Fonseca, 2006, p. 112)

c. **Estabilidad volumétrica:** propiedad que establece la expansión y contracción del suelo debido a cambios de humedad. Las expansiones que se desarrollan crean presiones que si no son contraladas pueden ocasionar graves

deformaciones y rupturas al pavimento. Las soluciones comúnmente empleadas para evitar cambios volumétricos son como introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibre la presión de expansión, utilizar membranas impermeables y no dejar que la estructura registre variación estacional en la humedad. (Fonseca, 2006, p. 76)

d. **Resistencia:** es el esfuerzo máximo que puede soportar la mezcla actuando sobre estas fuerzas normales al plano sobre el que actúan en este caso la sección trasversal de las probetas. (Singer & Pytel, 1980, p. 47)

e. **Permeabilidad:** propiedad que determina la disipación de las presiones de poro y el flujo de agua a través del suelo. El incremento de estas, puede originar deslizamientos en explanaciones, tubificaciones y arrastres.

   (Fonseca, 2006, p. 79)

f. **Compresibilidad:** propiedad que establece los cambios de volumen cuando se aplica una carga la cual permite modificar la permeabilidad de los suelos, altera las fuerzas existentes entre las partículas tanto en magnitud como en dirección, lo que incide en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos. (Fonseca, 2006, p. 79)

g. **Durabilidad:** es aquel factor que se refiere a la resistencia al intemperismo, a la erosión o abrasión del tráfico, la prueba de humedecimiento y secado permite de manera cualitativa determinar esta propiedad. (Fonseca, 2006, p. 80)

4.3. Marco Normativo

Dentro de los lineamientos y normatividad colombiana para la elaboración de un suelo – cemento, las especificaciones generales de construcción y ensayos se deben seguir bajo la norma Invías del año 2013. De acuerdo a los parámetros que se estipulan allí, se guía esta investigación y consecuentemente el plan de ensayos a elaborar. Por otra parte, se enuncia la metodología a emplear para determinar la cantidad de cemento en la estabilización del suelo y el tipo de ensayo para determinar la forma en que se va a realizar la adición de polisombra.

Los ensayos de caracterización para cumplir con los requisitos de los materiales para la construcción de suelo – cemento establecidos por el Instituto Nacional de Vías [Invias] en el artículo 350 del 2013 (suelo-cemento), se muestran en el **Cuadro 2**:

Cuadro 2
Ensayos a realizar para caracterizar el material de suelo

Normatividad INV – E	***Título***
121-13	Determinación del contenido orgánico de un suelo, mediante el ensayo de perdida por ignición
122-13	Determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado
123-13	Determinación de los tamaños de las partículas de suelos
125-13	Determinación del límite líquido de los suelos
126-13	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

Para determinar la resistencia a la tensión del material de adición (polisombra) se siguió la Norma Técnica Colombiana [NTC] que se enuncia en el **cuadro 3**:

Cuadro 3
Norma para determinar la resistencia a la tensión de la polisombra

Normatividad NTC	***Título***
5492 – 07	Propiedades de Tensión de Geo mallas – Métodos de tensión de costilla sencilla o multicostillas –resistencia última

Para determinar la humedad óptima de compactación de cada uno de los porcentajes óptimos de cemento, la resistencia a la compresión incofinada, variación volumétrica y durabilidad de los especímenes de suelo – cemento, se trabajó acorde al capítulo 3, artículo 350 del 2013 de las especificaciones Invías, bajo las normas descritas en el **cuadro 4**:

Cuadro 4
Normas para los diseños de suelo-cemento y suelo-cemento adicionando polisombra

Normatividad INV – E	***Título***
611-13	Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento
612-13	Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento
613-13	Preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio
614-13	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento+

4.3.1. Plan de ensayos.

Para la realización de los ensayos de caracterización del material de suelo, especímenes de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra, se efectúan bajo el artículo del Invías anteriormente mencionado. En cuanto a la repetibilidad de los ensayos, no se realizó de acuerdo a lo establecido en el anteproyecto de la presente investigación. A continuación, en el **cuadro 5** se muestra el número de ensayos de acuerdo a cada parámetro a analizar bajo la especificación del artículo ya mencionado.

Cuadro 5
Número de ensayos en función de los porcentajes de adición de malla Raschel (polisombra) reciclada en los especímenes de suelo-cemento

Norma del Invías 2013	***Título***	***Cantidad de ensayos a realizar a los especímenes de suelo-cemento, y suelo-cemento -polisombra reciclada.***			
		0%	**0.5%**	**1%**	**1.5%**
121-13	Determinación del contenido orgánico de un suelo, mediante el ensayo de perdida por ignición	1	-	-	-
122-13	Determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado	1	-	-	-
123-13	Determinación de los tamaños de las partículas de suelos	1	-	-	-
125-13	Determinación del límite liquido de los suelos	1	-	-	-
126-13	Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos	1	-	-	-
611-13	Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo cemento	3	3	3	3

612-13	Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento	3	3	3	3
614-13	Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento	9	9	9	9

4.3.2. Requisitos generales del suelo a estabilizar

Para el uso del material a estabilizar con cemento hidráulico se deben seguir las especificaciones del Invías, propuestas en el artículo 350 del 2013 (suelo – cemento) el cual su procedencia puede ser producto de la escarificación de una capa superficial existente, suelo natural, escorias o mezclas de ellos. Por otra parte, el material debe estar libre de materia orgánica o alguna otra sustancia que impida el correcto fraguado del cemento. En el **cuadro 6** se muestra los paramentos y requisitos enunciados.

Cuadro 6
Requisitos de los materiales para la construcción de suelo – cemento

Característica	***Norma de ensayo Invías***	***Gradación tipo A***	***Gradación tipo B***
Composición (F)			
- Granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar - Tamaño máximo, fracción máxima del espesor de la capa compactada	E – 123	Tabla 350 – 3 ½	
Limpieza (F)			
Limite líquido, % máximo	E – 125	30	35
Índice de plasticidad, % máximo	E – 125 y E – 126	12	15
Contenido de materia orgánica, % máximo	E – 121	1.0	
Características químicas (O)			
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como $SO_4^=$, %	E – 233	0.5	

máximo		
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 $R < 70$

Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.350, p. 2)

Por otra parte, el material de suelo a mejorar con cemento debe cumplir unos parámetros de gradación mediante la realización del ensayo de granulometría. La especificación se muestra en la **tabla 2**:

Tabla 2.
Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo – cemento

Tipo de gradación		**Tamiz (mm/ U.S. Standard)**								
		50	37,5	25	19	9,5	4,75	2	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	2-45	2-25
Tolerancia 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
Tolerancia en producción sobre la fórmula de trabajo (+-)		0%	_				8%			5%

Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.350, p. 2)

4.3.3. Requisitos de diseño para el suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra.

Teniendo en cuenta las especificaciones anteriormente mencionadas y que el material cumpla debidamente los parámetros, se procede a realizar el diseño de la mezcla de suelo – cemento donde a partir de los ensayos de clasificación; granulometría y límites de Atterberg, se clasifico el tipo de suelo bajo la especificación de la American Association of State Highway and Transportation Officials [AASHTO]. Ellos presentan una tabla en la cual clasifican los suelos en siete grupos según su granulometría y plasticidad, a su vez estos grupos pertenecen a dos clasificaciones generales: suelos granulares y suelos limo arcillosos. En el **cuadro 7** se muestra la tabla de clasificación.

Cuadro 7.
Tabla de clasificación de suelos de la AASHTO

Clasificación general	*Materiales granulares (igual o menor de 35% pasa el tamiz Nº 200)*							*Materiales limo – arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz Nº 200)*			
Grupos	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub grupos	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
% Que pasa el tamiz											
No 10	50máx.										
No 40	30máx.	50máx.	51máx.								
No 200	15máx.	25máx.	10máx.	35máx.	35máx.	35máx.	35máx.	36min	36min	36min	36min
Características del material que pasa el tamiz Nº 40											
Limite liquido				40máx.	41min	40máx.	41min	40máx.	41min	40máx.	41máx.
Índice de plasticidad	6máx.	6máx.	No plástico	10máx.	10máx.	11min	11min	10máx.	10máx.	11min	11min
Índice de grupo	0	0	0	0	0	4máx.	4máx.	8máx.	12máx.	16máx.	20máx.
Tipos de material	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Terreno de fundación	Excelente a Bueno							Regular a Deficiente			

Nota. Fuente: American Society of Testing Materials [ASTM]. (D 421 – 58, p. 23)

Para la PCA la metodología que emplean para para el mejoramiento de un suelo que cumpla con las especificaciones dadas para mejorarlo con cemento, realizan el ensayo de durabilidad el cual consiste en el humedecimiento y secado de probetas compactadas. Esta prueba permite determinar las pérdidas de del material de suelo estabilizado debido a la expansión y contracción al que se ven sometidos los especímenes.

El criterio está basado en información obtenida de diferentes fuentes, incluyendo investigaciones, desarrollos teóricos y ensayos de pavimentos a escala real. De esta forma la PCA correlacionó la información de diseño de estas fuentes obteniendo como resultado una metodología para pavimentos suelo – cemento.

De acuerdo a lo anterior, se determinó la cantidad o porcentaje de cemento óptimo en base al peso del suelo para la prueba de humedecimiento y secado con las probetas compactadas. En la **tabla 3** se muestra de acuerdo a la clasificación del suelo a usar por la AASHTO los porcentajes de adición de cemento que se sugieren.

Tabla 3
Rango normal de requerimientos de cemento para suelos.

Clasificación del suelo por la AASHTO	***Porcentaje de cemento por peso del suelo***	***Cantidad de cemento en kilogramos por metro cubico compactado de suelo – cemento***	***Cantidad de cemento para la prueba de humedecimiento y secado en peso***
A – 1 – a	3 – 5	5 – 7	3 – 4 – 5 – 7
A – 1 – b	5 – 8	7 – 8	4 – 6 – 8

A – 2 – 4	5 – 9	7 – 9	5 – 7 – 9
A – 2 – 5	5 – 9	7 – 9	5 – 7 – 9
A – 2 – 6	5 – 9	7 – 9	5 – 7 – 9
A – 2 – 7	5 – 9	7 – 9	5 – 7 – 9
A – 3	7 – 11	8 – 11	7 – 9 – 11
A – 4	7 – 12	8 – 11	8 – 10 – 12
A – 5	8 – 13	8 – 11	8 – 10 – 12
A – 6	9 – 15	9 – 13	10 – 12 – 14
A – 7	10 – 16	9 – 13	

Nota. Fuente: Portland Cement Association [PCA]. (2001, p. 16)

En adición, los porcentajes que se empleen a partir de la tabla anterior se utilizan respectivamente para la prueba de resistencia. Paso a seguir, para cada uno de los porcentajes de cemento a emplear, se procede a determinar el valor de la humedad óptima de compactación, esto por medio del ensayo I.N.V. E 611 – 13. El ensayo se aplica para los especímenes de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra, este último se realiza debido a que el material de adición influye en el contenido de humedad en cada porcentaje a evaluar.

Posteriormente, se procede a realizar los especímenes compactados y a determinar por medio del ensayo I.N.V. E 614 – 13 la resistencia a la compresión de los cilindros moldeados de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra. Paralelamente se realiza el ensayo de durabilidad I.N.V.E 612 – 13. En el **cuadro 8** se establecen las especificaciones de los criterios de diseño expuestos en el artículo 350 – 13 del Invías.

Cuadro 8
Criterios de diseño para la mezcla de suelo – cemento

Ensayo	***Norma de ensayo I.N. V***	***SC – D***	***SC – R***
Durabilidad			
Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado, %			
	E – 612	14	
- Suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3		10	
- Suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A-5		7	
- Suelos A-6; A-7			
Resistencia			
Comportamiento de la resistencia con:			
- Incremento en el contenido de cemento	E – 614	Crece	
- Incremento en la edad		Crece	
Resistencia a la compresión a 7 días, Mpa			
- Mínima	E – 614		2.1
- Máxima		4.5	4.5

Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.350, p. 5)

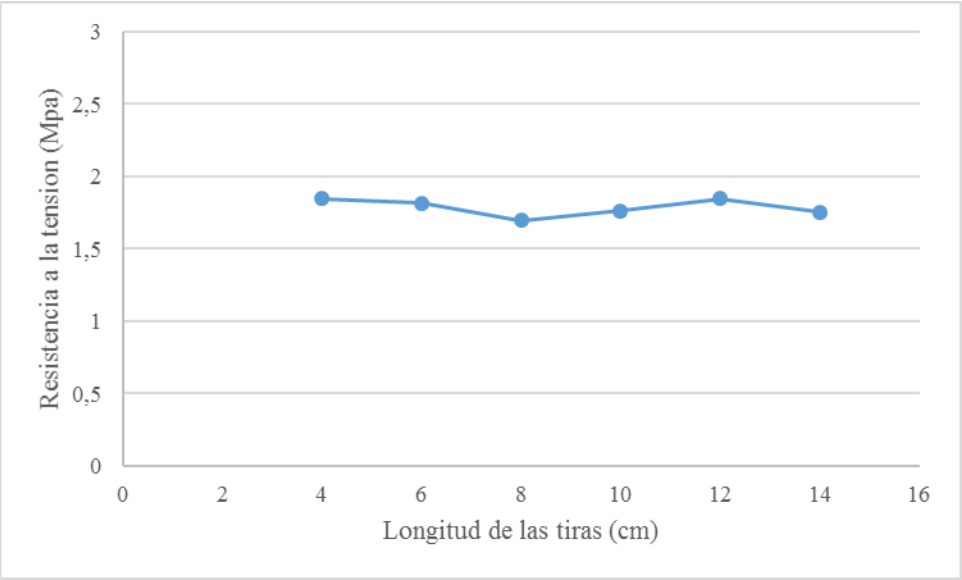
5. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

5.1. Caracterización del material de adición malla Raschel (Polisombra)

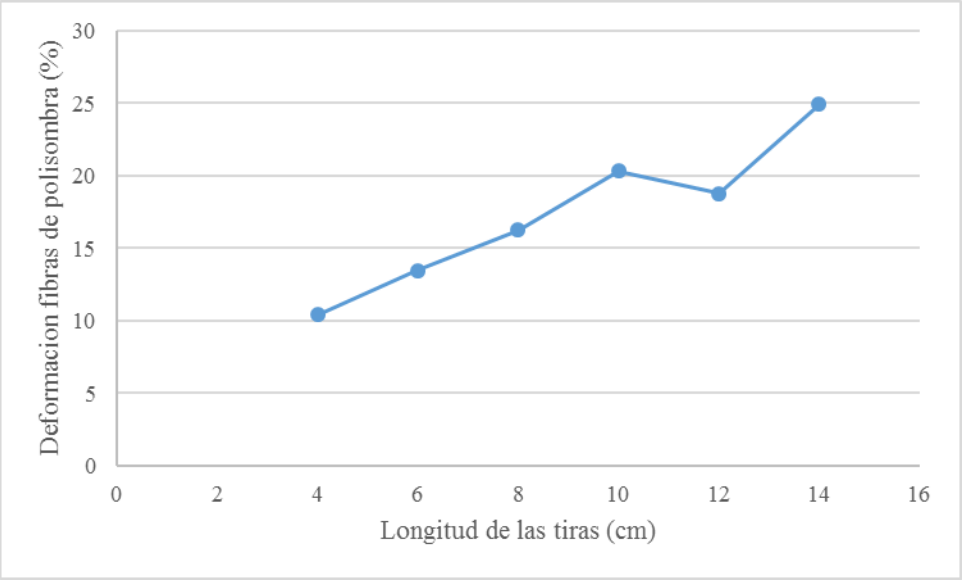
Con el fin de determinar la resistencia y durabilidad de un suelo - cemento adicionando material no biodegradable polietileno malla Raschel (polisombra) en diferentes porcentajes (0; 0.5; 1 y 1.5 %), en relación con el peso del suelo. El material de adición se obtuvo del reciclaje de obras civiles en Bogotá D.C. Esta malla es un elemento no toxico de estructura tejida, sin humedad, por ser un polietileno no se deteriora ni degrada fácilmente en el tiempo, la polisombra se caracteriza por clasificarse de varios colores dependiendo del grado de sombra que se quiera dejar a la vista, el color verde y blanco, son las que no permiten el paso de luz en un 100%, las de color azul y negro tienen una estructura tejida con agujeros que permiten el paso de luz de al menos un 50%.

Para esta investigación se encontró la longitud de fibra de polisombra con mayor resistencia a la tensión, mediante la normativa NTC 5492 – 07 (método de ensayo para determinar las propiedades de tensión de geomallas por el método de tensión de costilla sencilla o multi-costilla) donde se falló las fibras con longitudes de 4, 6, 8, 10, 12, 14cm. En el **anexo A** del presente documento se encuentra los valores de los esfuerzos obtenidos de este ensayo. Finalmente, se encontró que la resistencia a la tensión de cada una de las fibras era independiente de la longitud, esto debido a los valores similares que se obtuvieron, de esta manera se decidió por manejabilidad y trabajabilidad de la mezcla usar la fibra de 4cm en la adición para los especímenes compactados de suelo –

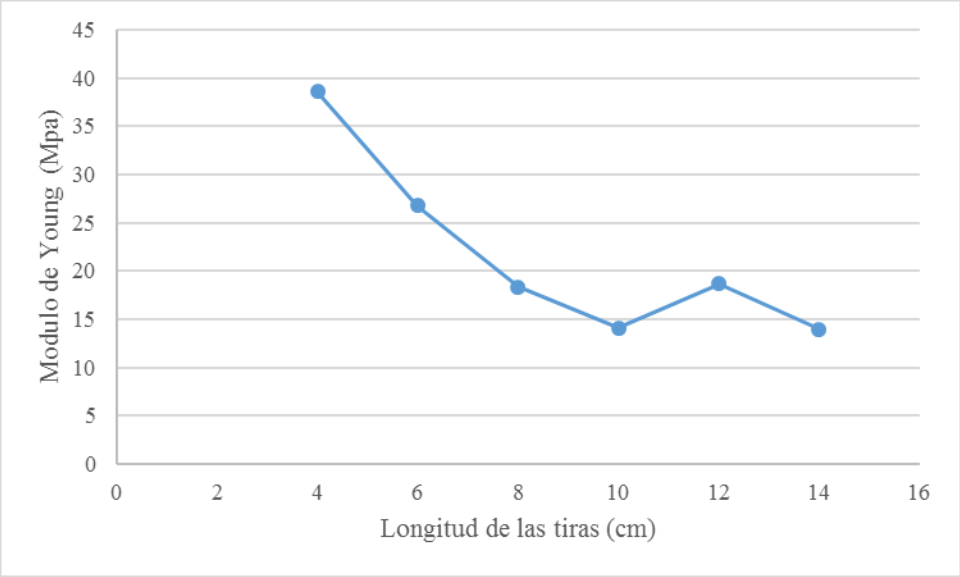
cemento. En la **gráfica 1, gráfica 2** y **gráfica3**, se observa los resultados arrojados por el texturometro, en la **imagen 2** se observa el procesamiento de la polisombra.



Gráfica 1. Resistencia a la tensión de diferentes longitudes de fibras de polisombra.



Gráfica 2. Porcentaje de deformación de diferentes longitudes de fibras de polisombra



Gráfica 3. Modulo de Young de diferentes longitudes de fibras de polisombra

Imagen 2. Corte de polisombra reciclada longitud 4 cm

Como se mencionó anteriormente, la resistencia a la tensión de la polisombra es independiente de la longitud, esta primera medida se tomó en consideración debido a

que los materiales comúnmente presentan una mayor resistencia a la deformación cuando su longitud es menor y presenta un comportamiento inverso cuando su longitud es mayor. En la **imagen 3** se observa el proceso de falla de las fibras ya mencionadas.

Imágen 2. Ensayo de tensión a la polisombra

5.2. Cemento

El cemento utilizado para la elaboración de los especímenes de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra, es un cemento de marca Argos tipo 1, el cual cumple con las especificaciones del Invias en el artículo 350 del 2013 (suelo – cemento), el cual es un cemento hidráulico sin terrones ni características que dejen en evidencia algún proceso de fraguado parcial de este.

Dentro del alcance de la investigación no se contempla la caracterización del cemento ya que solo se tendrá en cuenta las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, más no la de cada uno de sus materiales de construcción.

5.3. Agua.

El agua utilizada para la compactación de los especímenes cumple con las especificaciones del Invias en el artículo 350 del 2013 (suelo – cemento), donde esta debe ser limpia y libre de materia orgánica u otras sustancias que impidan el correcto fraguado con el cemento y humedecimiento mismo de la mezcla.

El agua a utilizar fue la suministrada por el laboratorio de suelos de la Universidad de La Salle; los ensayos de PH y contenido de sulfatos que se le realizaron al agua, se hicieron mediante la maquina Potenciómetro y la KIT HCICH método Bosi, donde se obtuvo como resultados: PH: 6.99 SO_4= 0.002 g/l cumpliendo con los requisitos del **cuadro 9**.

Cuadro 9.
Requisitos del agua no potable para la construcción de suelo-cemento

Característica	***Norma de ensayo ASTM***	***Requisito***
Ph	D 1293	5.5 – 8.0
Contenido de sulfatos, expresado como SO_4, g/l máximo	D 516	1.0

Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.350, p. 3)

5.4. Suelo Natural.

A continuación, se muestra los ensayos realizados al suelo para determinar si cumple con las especificaciones del Invias en el artículo 350 del 2013 (suelo – cemento) para ser mejorado con cemento.

El suelo empleado fue obtenido de la cantera de la planta Dromos Pavimentos S.A, ubicada en el kilómetro 3 vía Balsillas – Cundinamarca

Imágen 3. Ubicación de la cantera donde se extrajo el suelo. Fuente: Google maps (2016)

En la **imagen 4** se observa la ubicación geográfica de la cantera, donde se obtuvo un material conocido comercialmente como un recebo B – 400

a. **Medición del contenido orgánico mediante ignición**: el contenido orgánico en un suelo hace parte de su composición natural, esto debido a que por lo general los suelos se encuentran expuestos a material vegetal relativamente no descompuesto ni deteriorado, madera, raíces, pasto o materiales carboníferos. Si hablamos de mezclas de concreto, se ha visto que el material orgánico influye en el desempeño y estabilidad de los agregados provocando efectos perjudícales a las partículas de cemento ya que, al encontrarse en forma de recubrimiento superficial de los agregados, inciden en la adherencia con la pasta de cemento lo que trae como consecuencia una disminución en la resistencia del concreto. De igual manera para la mezcla de suelo – cemento es esencial para el diseño emplear un suelo con el contenido mínimo de materia orgánica sin sobrepasar los parámetros y especificaciones que exige el artículo 350 – 13 del INVÍAS.

La determinación del contenido orgánico del suelo mediante el ensayo de perdida por ignición se realizó bajo la norma I.N.V E 121 – 13 donde este método determina la oxidación cuantitativa de materia orgánica en el material de suelo proporcionando una estimación de esta.

Imágen 4. Registro fotográfico del ensayo de contenido orgánico

Se tomó una porción del material que pasara el tamiz de 2.00 mm (No. 10), tomando una muestra representativa con una masa de no menos de 100 g, posteriormente se llevó al horno a 110 ± 5° para obtener una masa constante. Paso a seguir se escogió una muestra no menor a 20 g de material y se colocó en un plato de evaporación determinando su masa. En la **imagen 5** se observa el registro fotográfico del ensayo que se llevó a cabo. Finalmente, se coloca el plato en la mufla la cual mantiene continuamente una temperatura de 445 ± 10° C la cual tiene una cámara de combustión para así obtener el peso final frio de la muestra calculando el contenido orgánico como un porcentaje de la masa del suelo. Finalmente se obtuvo como contenido de materia orgánica el 1%, cumpliendo con las especificaciones I.N.V.E en el artículo 350 del 2013 (suelo – cemento), se puede evidenciar los cálculos en el **anexo B**

b. **Humedad natural del suelo:** el ensayo se realizó bajo la norma I.N.V E – 122 la cual permite determinar el contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo – agregado. Este ensayo posibilita calcular la humedad del suelo natural la cual presenta desde su obtención en la cantera permitiendo

establecer que tan susceptible es el suelo en absorber o modificar su contenido de agua en la mezcla de suelo – cemento.

Se realizó los cálculos correspondientes y se obtuvo una humedad del 12.6% (**anexo C**), lo que quiere decir que el suelo tiene alta plasticidad, conteniendo altos terrones de arcilla, lo que por el momento se supo que el material cumplía con los requisitos de la normativa y así poder estabilizar

c. **Límite líquido y plástico del suelo:** Estos parámetros son importantes para determinar como un suelo puede presentarse en varios estados, según su contenido de humedad. Según (Lambe, Whitman, & Jiménez Salas, 1999) los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad (solido, semisólido, plástico y líquido). Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan límite plástico y límite líquido.

Imágen 5. Registro fotográfico ensayo limite líquido, cazuela de Casagrande

En la **imagen 6** se observa la determinación del límite líquido del suelo bajo la norma I.N.V E – 125 – 13 donde se obtuvo material que pasaba el tamiz de 425 µm (No 40),

este material pasante se llevó a una consistencia tal que al colocarla en la cazuela de Casagrande requiriera de 25 a 35 golpes a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por segundo, hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se colocaran en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia cercana a los 13 mm.

Para determinar el limite plástico del suelo se siguió la norma I.N.V E 126 – 13 donde a partir del mismo material empleado para determinar el límite liquido se utiliza para este.

Imágen 6. Registro fotográfico ensayo del límite plástico, obtención de los rollos

En la **imagen 7** se observa los rollos obtenidos y las muestras de suelo que se obtienen para determinar la cantidad de agua que presenta la muestra. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar los rollos de suelo con un diámetro de 3.2 mm sin que se agrieten o desmoronen.

Con base a lo anterior como resultado de los cálculos, se obtuvo un porcentaje de límite líquido de 18.72% y de límite plástico 9.32, para finalmente obtener un índice de plasticidad del 9.40% (**anexo D**)

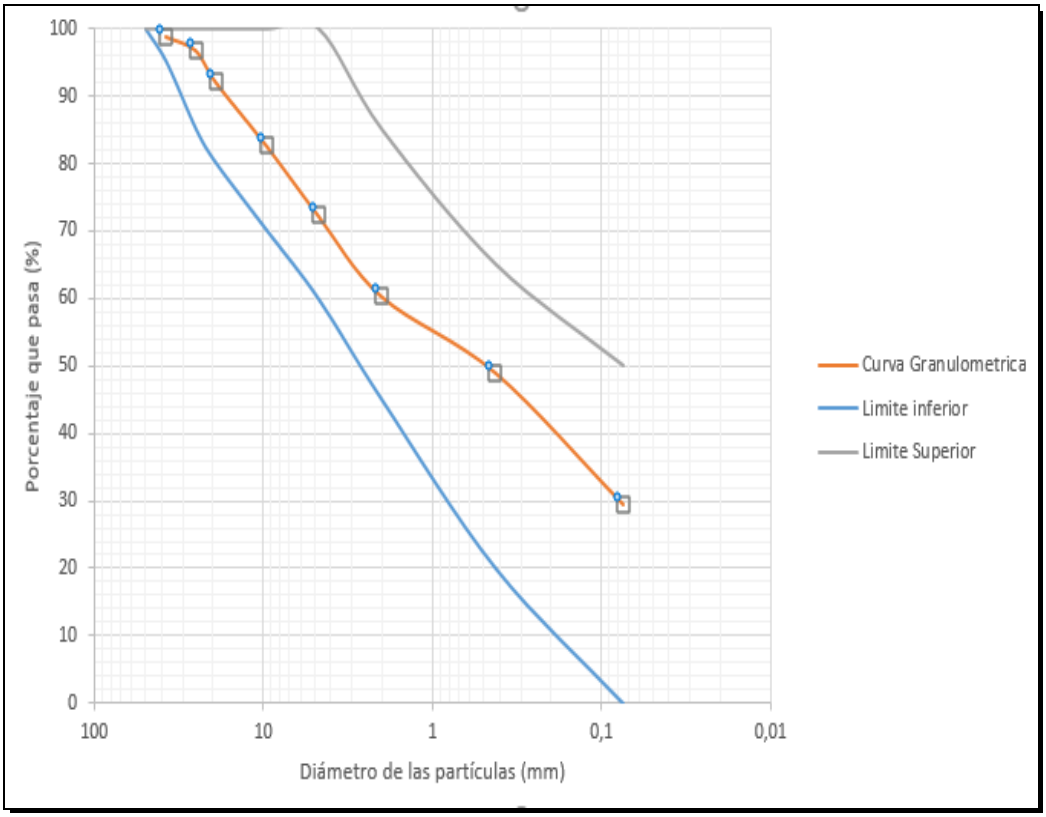
d. **Granulometría del material de suelo**: la granulometría es la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. De esta manera, cuando se obtiene esa cuantía de las partículas, se puede clasificar acorde a la gradación especificada por el artículo 350 – 13 del Invías para un suelo – cemento. Este ensayo se realizó bajo la norma I.N.V E – 123 – 13

En la **imagen 8** se observa el registro fotográfico del ensayo de granulometría que se llevó a cabo, donde se realizó un cuarteo del material para obtener una muestra representativa y así hacerla pasar por las distintas aberturas de los tamices. Finalmente se calculó el porcentaje de material retenido en cada uno de los tamices y así determinar la gradación de la mezcla.

Imágen 7. Registro fotográfico del ensayo de granulometría

En la **gráfica 4** se evidencia la gráfica de la curva granulométrica del suelo a utilizar, en esta se aclara los limites, el superior y el inferior, notando que la granulometría

cumple con una de las clasificaciones de la Tabla 8, los cálculos se pueden ver **anexo E** donde se clasifico el tipo de gradación, como un tipo B B-50-2, desde el tamiz #4 al tamiz #200



Gráfica 4. Curva granulométrica

También con base a la granulometría y a los límites de consistencia, se pudo clasificar el suelo por medio del sistema AASHTO, para poder clasificar el suelo, se observó que tocaba tener claro los porcentajes de índice de plasticidad y los porcentajes del límite líquido, como también fue necesario evidenciar el porcentaje pasa del tamiz #200; con respecto a eso, se clasifico el suelo, obteniendo un suelo A-2-4.

Ya teniendo claro el tipo de suelo clasificado por la AASHTO, se ingresó a la **tabla 3**, donde expone la cantidad de cemento que se debe utilizar, para realizar la investigación, se encontró que los porcentajes de cemento a utilizar, fueron: 5%, 7%, 9%.

e. **Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo estándar de compactación)**

La relación de humedad y peso unitario seco es de vital importancia en la elaboración de la mezcla de suelo – cemento ya que permite determinar la humedad óptima a la cual se deben compactar los especímenes. El ensayo se realizó con base a la norma I.N.V E – 611 – 13.

Una vez definido la longitud de la fibra de polisombra (4 cm) y teniendo todo el material suficiente de fibras, se procede a calcular la humedad óptima; para esta investigación se tuvo en cuenta 3 dosificaciones de cemento (5%, 7% y 9%), 4 porcentajes de inclusión de las fibras de polisombra (0%, 0.5%, 1%, 1.5%) en cuanto a el peso del suelo seco (material a compactar).

El ensayo de la relación humedad – peso unitario, se realizó para el suelo, adicionándole las 3 cantidades porcentuales estimadas, esto con las 4 cantidades porcentuales de fibras de polisombra mencionadas anteriormente; para la realización de este se tuvo en cuenta que la mezcla suelo- cemento pesara 2300 gr y para suelo-cemento-polisombra, la polisombra se incluyera sobre los 2300 gr. Lo anterior resume que, para cada porcentaje de cemento agregado al suelo, se le incluyo los 4 porcentajes de polisombra, para tener como resultado 12 ensayos. Ver **anexo F.**

Teniendo en cuenta el procedimiento anterior, tanto para la mezcla de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra, esta se realizó humedeciendo el suelo seco con la humedad optima de compactación para cada uno de los porcentajes de adición de cemento y polisombra hasta obtener una mezcla homogénea.

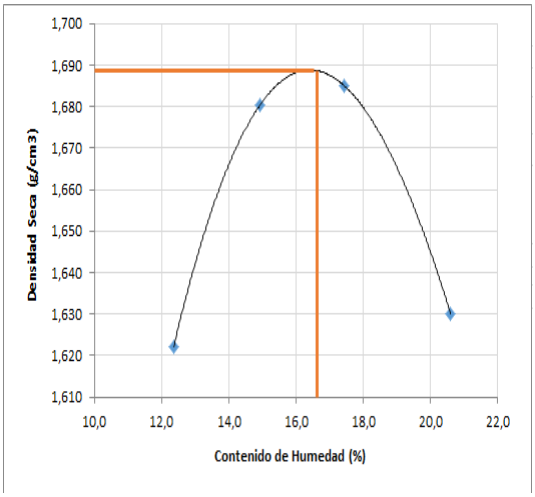
Para cada ensayo se realizaron 4 puntos, para poder así obtener una mejor curva, la cual arrojara datos precisos, sobre la humedad óptima de cada mezcla, en la **gráfica 5** se evidencia el comportamiento de la humedad para el suelo con el 5% de cemento sin adición de fibras.

***Imágen 8*.** Registro fotográfico ensayo humedad – peso unitario seco mezclas suelo - cemento

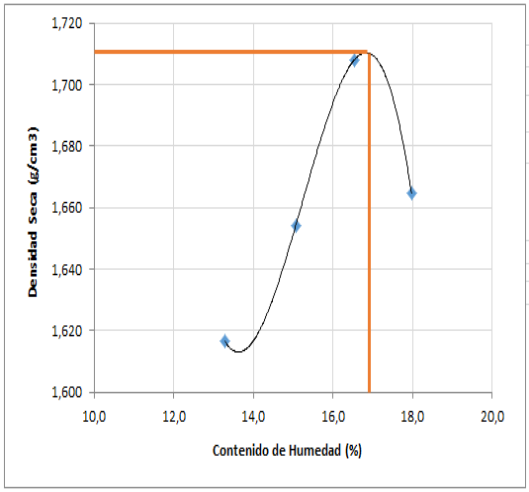
Una vez realizados los golpes en cada capa, se removió el collar de extensión y se enraso la parte superior de la probeta con la regla metálica para así determinar la masa del molde con la muestra de suelo – cemento compactada.

En la **imagen 9** se observa el registro fotográfico al momento de compactar los especímenes y la toma de muestras representativas para ser llevadas al horno a una temperatura de 110 ± 5° C por 12 horas determinando así la humedad de la probeta.

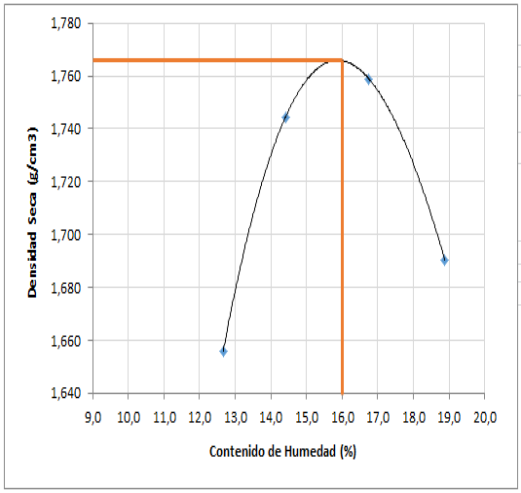
Este proceso se repitió hasta que se produjera una disminución o cambio en la masa del suelo – cemento compactado más el molde en cada uno de los porcentajes de adición de cemento (5, 7 y 9 %) ya establecidos anteriormente por la PCA.



a. Con 5% de adicion de cemento



b. Con 7% de adicion de cemento



c Con 9% de adicion de cemento

Gráfica 5. Peso unitaria seco vs humedad para un suelo – cemento, con 1.5 % de polisombra

Tabla 4.
Informe final de las relaciones humedad – densidad de mezclas de suelo cemento

Ensayo	***Norma de ensayo I.N. V***	***Material***	***Resultado % Humedad Optima***	***Resultado Densidad máxima***
Relaciones humedad – densidad de mezclas de suelo cemento	E – 611	*Poli 0 %, cem 5%*	*14.9*	*1.826*
		Poli 0%, cem 7%	*15*	*1.788*
		Poli 0 %, cem 9%	*14.40*	*1.867*
		Poli 0.5%, cem 5%	*14.20*	*1.874*
		poli 0.5 %, cem 7%	*14.30*	*1.832*
		Poli 0.5%, cem 9%	*13.70*	*1.914*
		poli 1 %, cem 5%	*15.4*	*1.792*
		Poli 1%, cem 7%	*15.5*	*1.747*
		poli 1 %, cem 9%	*14.9*	*1.830*
		Poli 1.5%, cem 5%	*16.5*	*1.689*
		poli 1.5 %, cem 7%	*16.6*	*1.688*
		Poli 1.5%, cem 9%	*16*	*1.767*

En la tabla **4**, se da informe de los porcentajes óptimos de humedad y las densidades máximas, con las cuales se trabajó para la compactación de la preparación de los ensayos de durabilidad y resistencia; estos resultados fueron obtenidos del ensayo, relaciones humedad-densidad de mezclas suelo cemento, con los diferentes porcentajes de adición de polisombra

5.5. Informe final de los resultados de caracterización del material con respecto a las normas de I.N.V.E-13

Con base a los cálculos realizados, nombrados en los anexos, se clasifica las características físicas y químicas del suelo dentro de los requerimientos de la normativa.

Tabla 5.
Informe final de la caracterización del material para la construcción de suelo-cemento- polisombra

Característica del suelo a utilizar		***Norma de ensayo I.N. V***	***Artículo 350 – 13 requisito***	***Resultado***	***Cumple***
Limite líquido, % máximo		E – 125	35	18.72	Cumple
Índice de plasticidad, % máximo		E – 125 y E – 126	15	9.40	Cumple
Contenido de materia orgánica, % máximo		E – 121	1	1	Cumple
Granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar		E – 123			
	2”	B – 50 – 1 B – 50 – 2	100	100	Cumple
	No 4		60 – 100	72.42	Cumple
	No 200		0-50	29.54	Cumple
Característica del agua a utilizar		***Norma de ensayo ASTM***	***Requisito***	***Resultado***	***Cumple***
Ph		D 1293	5.5 – 8.0	6.99	Cumple
Contenido de sulfatos, expresado como SO_4, g/l máximo		D 516	1.0	0.002	Cumple

Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.350, p. 2)

Según la **tabla 5**, se corroboro que el suelo a utilizar cumple con todas las especificaciones de la norma I.N.V.E-350-13, así se pudo continuar con la investigación.

6. DISEÑO DE LA MEZCLA

6.1. Diseño de mezcla suelo – cemento – polisombra

Este trabajo de investigación se rigió bajo la metodología de la PCA, la cual está basada en información obtenida de diferentes fuentes, incluyendo investigaciones, desarrollos teóricos y ensayos de pavimentos a escala real. De esta forma la PCA correlacionó la información de diseño de estas fuentes obteniendo como resultado una metodología para pavimentos suelo – cemento.

De acuerdo a lo anterior, se determinó la cantidad o porcentaje de cemento óptimo en base al peso del suelo a partir de pruebas de humedecimiento y secado con las probetas compactadas. En la **tabla 3** la PCA establece la cantidad de cemento que requiere a partir de la clasificación del suelo por la ASSHTO y los ensayos ya mencionados.

Una vez clasificado el suelo y bajo el parámetro de dosificaciones obtenidos de la tabla anterior, se realizó la prueba, relación humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento, con el fin de encontrar el porcentaje de humedad óptimo de compactación, expuesto por la norma I.N.V.E 611– 13. Con este dato se compacto cada muestra en el rango de dosificaciones de la PCA anteriormente mencionados.

Se realizaron los especímenes de suelo – cemento con adición y sin adición de material reciclable no biodegradable (fibras), esto para cada porcentaje de cemento seleccionado de la metodología PCA. Se determinó la resistencia a compresión simple de los mismos I.N.V.E 614 – 13. Paralelamente se realizó la prueba de durabilidad de cada muestra bajo la norma I.N.V.E 612 – 13.

Finalmente, no se realizó la prueba I.N.V.E 614 – 13 (Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento) para poder determinar la dosificación que mejor respuesta presente y por ende el contenido óptimo de cemento; ya que la investigación busco concluir sobre los efectos que tenía la inclusión de las fibras de polisombra en cada dosificación de cemento expuesta por la PCA.

6.2. Relaciones humedad – densidad mezcla de suelo – cemento – polisombra

Como se mencionó anteriormente en la determinación de la humedad óptima en los especímenes de suelo – cemento sin adición de polisombra, para este caso se siguió una vez más la metodología de la norma I.N.V E – 611 – 13 determinando la humedad – peso unitario con cada porcentaje de cemento y adición de malla Raschel como se enuncio en el plan de ensayos del presente documento.

Imágen 9. Registro fotográfico ensayo relación humedad – densidad mezcla suelo – cemento – polisombra

Realizar este ensayo para cada una de las adiciones de cemento más polisombra se justificó ya que la polisombra como se obtuvo producto del reciclaje, posee finos que se encuentran adheridas a esta, produciéndose así una absorción mayor de agua y por ende un cambio en la humedad óptima de compactación de cada uno de los especímenes a evaluar.

Se realizó el proctor estándar para cada una de las adiciones de polisombra y las dosificaciones de cemento (5%, 7%, 9%), para poder así preparar los ensayos de resistencia y durabilidad. Luego de obtener todas las humedades óptimas, se realizó el mismo ensayo descrito por la I.N.V E – 611 – 13.

En el momento de realizar todas las probetas descritas en el plan de ensayos, se notó que no había los suficientes moldes y se procedió a formar los moldes restantes con tubo de PVC de 4”, para compactar se utilizó el martillo que tenía una caída libre de 305 +- 1 mm (12.00 +- 0.05”) por encima de la elevación del suelo.

Al finalizar las preparaciones de las muestras, estas se forraron con papel vinipel para así conservar la humedad durante 7 días y de esta manera empezar con la realización de los ensayos de durabilidad y resistencia.

6.3. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento y suelo – cemento - polisombra

La resistencia a la compresión es un parámetro importante en el diseño de cualquier tipo de mezcla que se desee emplear en una estructura civil ya que permite conocer el comportamiento mecánico (esfuerzo – deformación) de los materiales cuando se ven solicitados a las cargas de servicio durante su vida útil. La investigación busco concluir

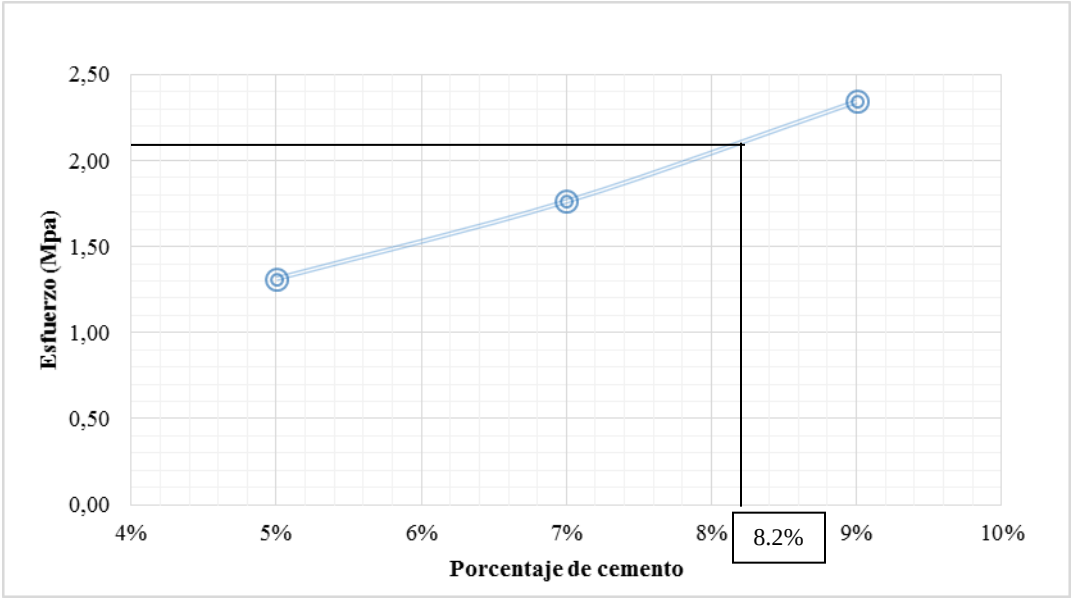
sobre los efectos que tenía la inclusión de las fibras de polisombra en cada dosificación de cemento expuesta por la PCA.

La norma I.N.V E – 614 – 13 resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento se empleó con cilindros moldeados como especímenes de ensayo, para este ensayo se utilizó el método A, donde los cilindros empleados eran de 101.6 mm (4.0”) de diámetro y de 116.4 mm (4.584”) de altura. Este método se empleó únicamente por que el material que se utilizó para la investigación, cumplió con el requisito de que un 30% o menos de material retenido en el tamiz de 19 mm (3/4”); en la **imagen 11** y **12** se evidencia los especímenes a fallar.

Imágen 10. Registro fotográfico ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento – polisombra

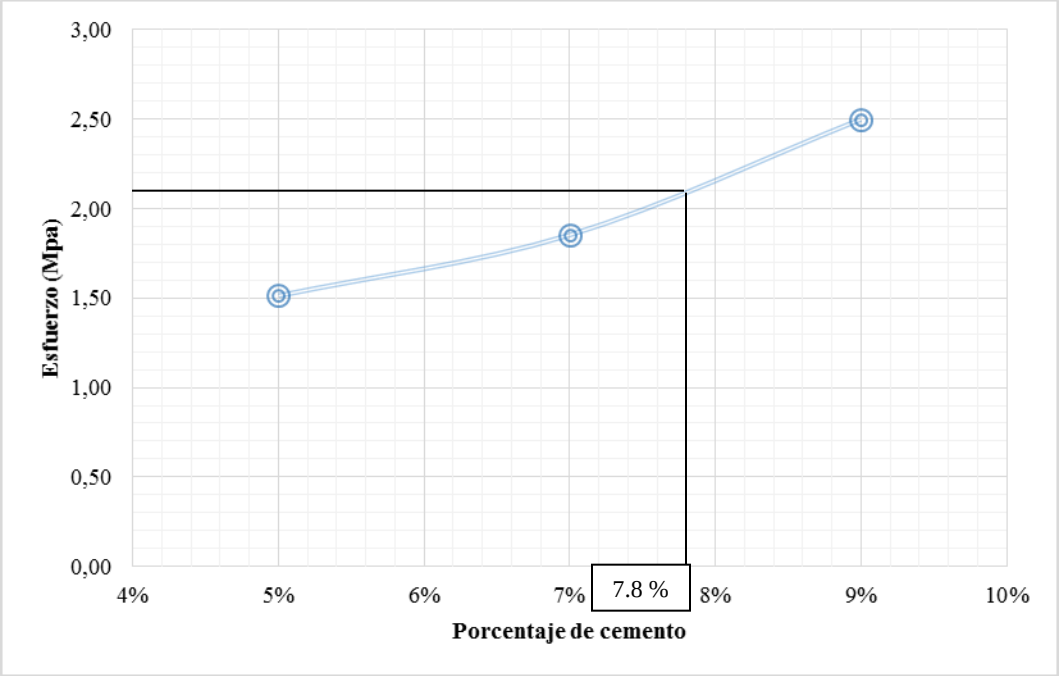
Imágen 11. Registro fotográfico ensayo resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo – cemento – polisombra

En las **gráficas 6**, **7**, **8** y **9** se evidencia los resultados de resistencia con respecto a la adición de los diferentes porcentajes de polisombra



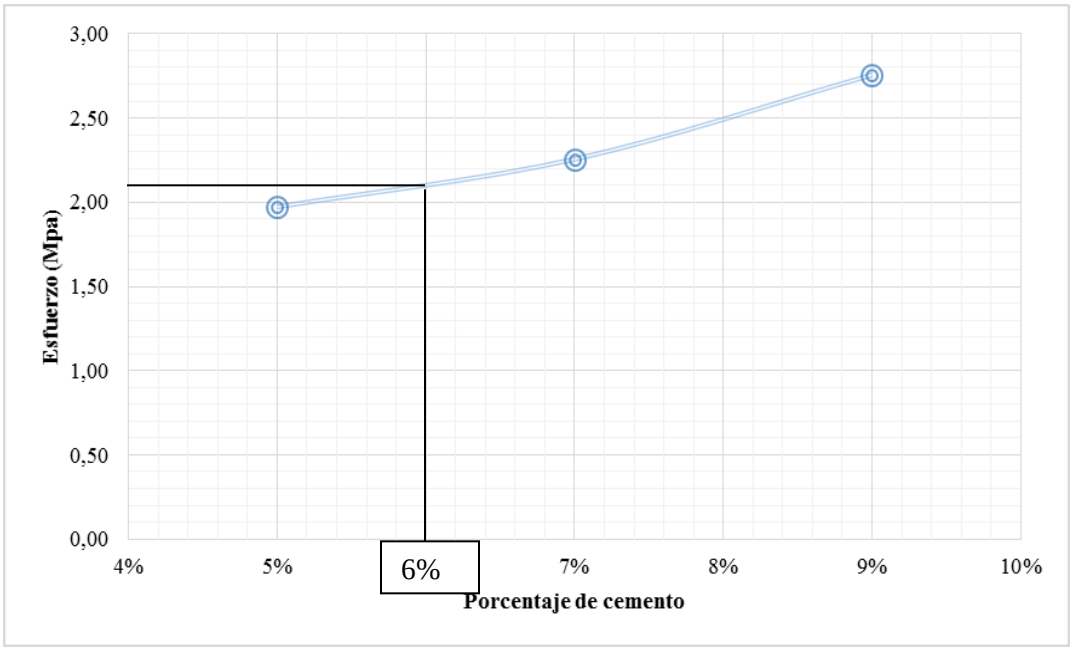
Gráfica 6. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento sin adición de polisombra

con respecto al artículo 350-13 del invias, donde especifica que la resistencia mínima para un suelo cemento es de 2.1 Mpa, se establece que de acuerdo a la **gráfica 6**, el porcentaje óptimo de cemento es de 8.2%



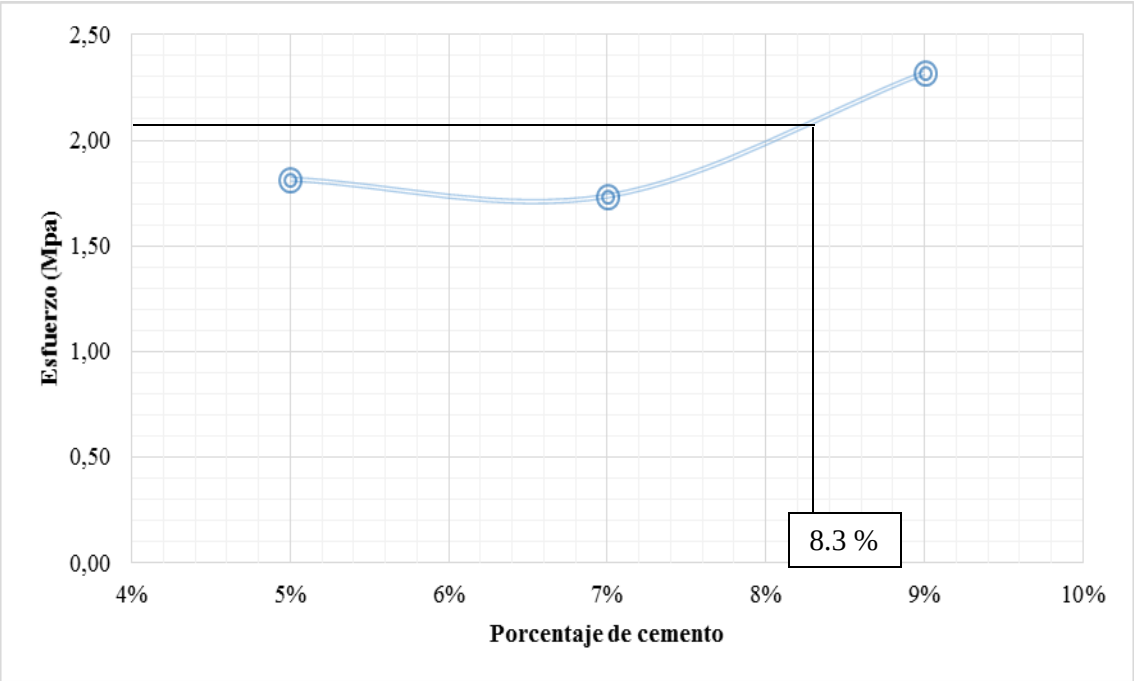
Gráfica 7. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 0.5% adición de polisombra

se establece que de acuerdo a la **gráfica 7**, el porcentaje óptimo de cemento es de 7.8%



Gráfica 8. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 1% adición de polisombra

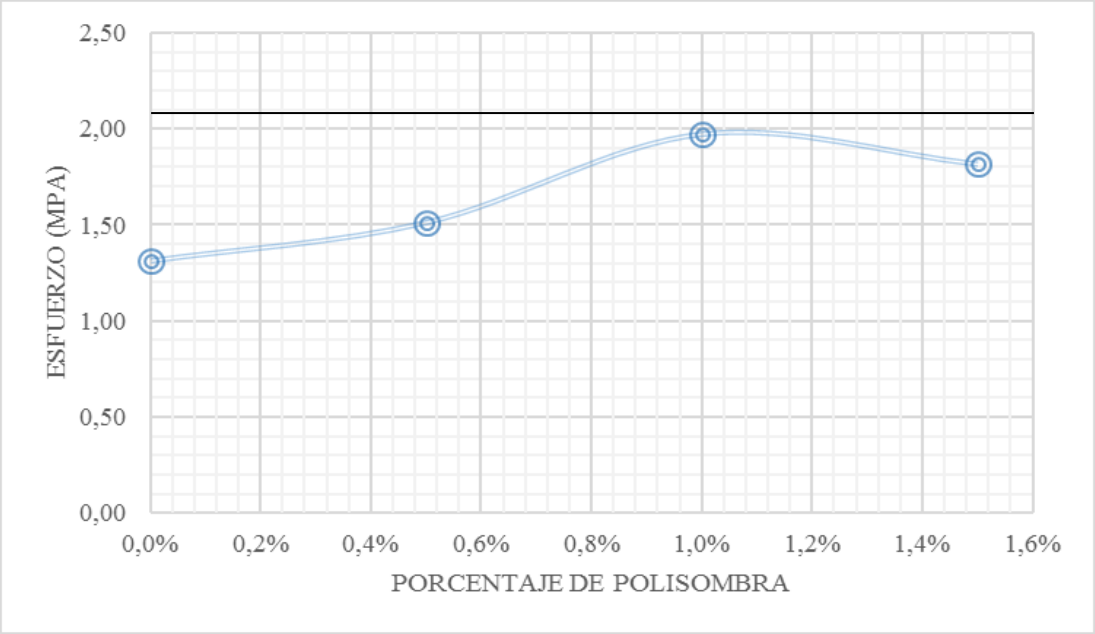
se establece que de acuerdo a la **gráfica 8**, el porcentaje óptimo de cemento es de 6%



Gráfica 9. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 1.5% adición de polisombra

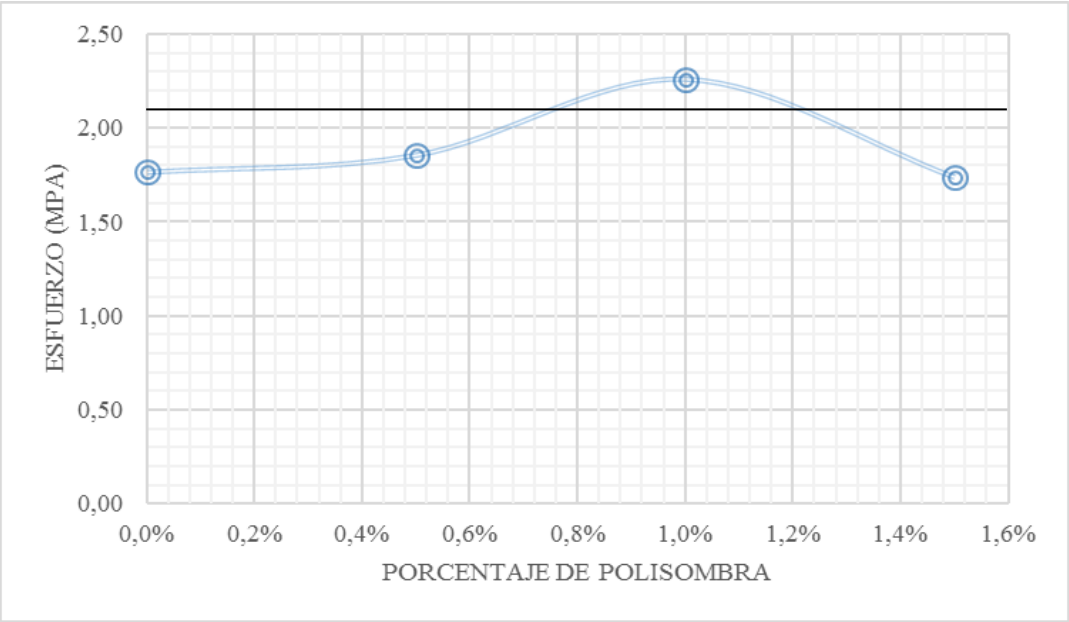
se establece que de acuerdo a la **gráfica 9**, el porcentaje óptimo de cemento es de 8.3%

En la **gráfica 10** se evidencia los resultados de resistencia del suelo cemento, con dosificación 5% con respecto a la adición de los diferentes porcentajes de polisombra; en la **gráfica 11** los resultados con el 7% de cemento y en la **gráfica 12** los resultados con el 9%de cemento.



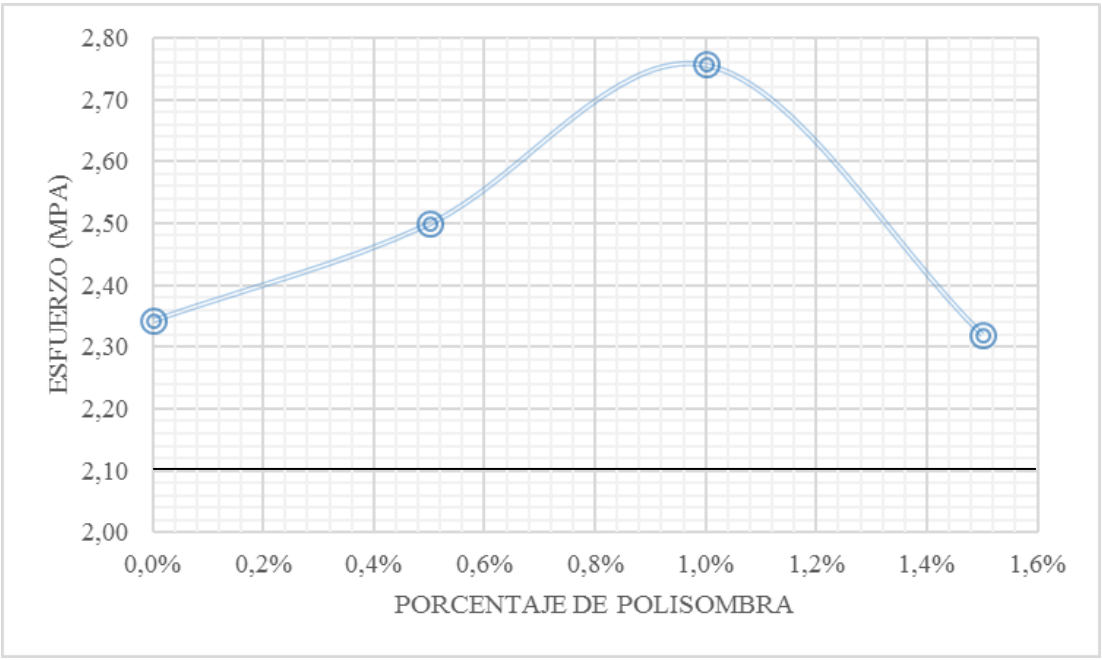
Gráfica 10. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento (2.1MPOa) con 5% de cemento

se establece que de acuerdo a la **gráfica 10**, ningún porcentaje de polisombra para el 5% de cemento, cumple con las especificaciones del artículo 350-13 del invias, donde dice que la resistencia mínima es de 2.1 Mpa.



Gráfica 11. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 7% de cemento

se establece que de acuerdo a la **gráfica 11**, el 1% de polisombra para el 7% de cemento, cumple con las especificaciones del artículo 350-13 del invias, en cuanto a la resistencia



Gráfica 12. Registro de los datos de resistencia de suelo cemento con 9% de cemento

se establece que de acuerdo a la **gráfica 12**, todos los porcentajes de polisombra para el 9% de cemento, cumplen con las especificaciones del artículo 350-13 del invias, en cuanto a la resistencia

De las gráficas anteriores, se puede observar que la resistencia va aumentando con respecto a la dosificación del cemento, el que obtuvo mayor resistencia fue el de adición del 9% de cemento, pero eso no pasa con la polisombra, esta se comporta parabólicamente, lo cual se nota que la mayor resistencia en todas las dosificaciones de cemento se obtiene en la inclusión del 1% de polisombra. (ver **anexo R**)

6.4. Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra

Este ensayo cubre procedimientos para determinar las pérdidas, los cambios de humedad y los cambios de volumen (expansión y contracción) producidos por el humedecimiento y secado repetido de especímenes endurecidos de suelo-cemento-polisombra I.N.V.E – 612 – 13.

La importancia de este ensayo, es porque se pudo determinar la resistencia que presentaron los especímenes a ciclos de humedecimiento y secado, siendo estos 12 ciclos

Para la realización de este ensayo, se preparó los especímenes por medio de los procedimientos descritos en la norma INV E – 611

Luego de los 7 días en el cuarto húmedo, se empezó con el ensayo de durabilidad, lo cual consistió en sumergir todos los especímenes en agua potable a temperatura ambiente durante 5 horas; pasando el tiempo se retiraron y por medio de un calibrador se midió la altura y el diámetro de cada espécimen. Por cada mezcla de suelo-cemento-polisombra, se realizaron 2 especímenes.

Se colocaron los especímenes en el horno a 71 +- 3º C (160 +- 5º F) durante 42 horas, luego se sacaron, los numero 1 de cada mezcla suelo-cemento-polisombra se midieron altura y diámetro, a los especímenes número 2, se rasparon con un cepillo de cerdas de alambre, utilizando 18 pasadas verticales con el cepillo, por toda el área del espécimen, finalmente se medía su altura y diámetro, (ver **imagen 13** y **14**)

Los anteriores procedimientos se llevaron a cabo durante 12 ciclos, registrando cada 2 días las medidas, el nombre del espécimen que se utilizó para hallar cambio volumétrico fue 1, y el espécimen al que se le realizó proceso de desgaste fue nombrado como 2. (Ver **anexo T**)

Imágen 12. Registro fotográfico ensayo durabilidad para el primer espécimen, cambio volumétrico

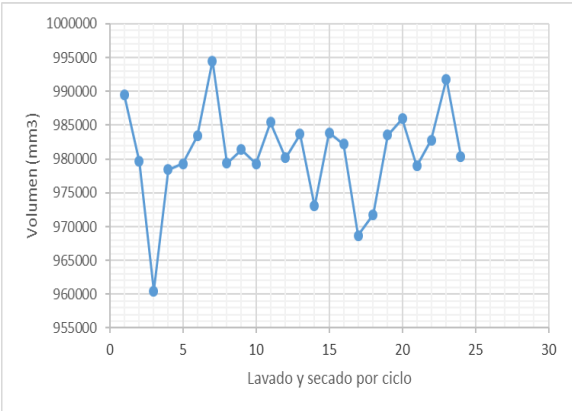
Imágen 13. Registro fotográfico ensayo durabilidad para el segundo espécimen, proceso de desgaste

Para la realización de este ensayo, se preparó un espécimen de más que funciono como testigo, este se utilizó para desgaste, en las siguientes gráficas se evidencia el comportamiento de los especímenes.

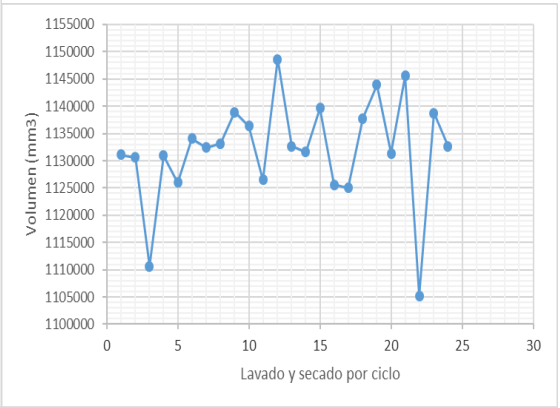
Es de aclarar que para la prueba de humedecimiento y secado para las mezclas de suelo – cemento y suelo – cemento – polisombra, esta se debe realizar de acuerdo a los datos obtenidos del ensayo INV E 614 – 13 (resistencia a la compresión de cilindros

moldeados de suelo – cemento). Como lo indica la norma, de este ensayo se obtiene los porcentajes óptimos de cemento para cada una de las probetas con adición y sin adición de polisombra, las cuales fueron compactadas con los porcentajes de cemento obtenidos por la PCA como se enuncio anteriormente. En ese sentido, es de aclarar que en la presente investigación no se realizó el ensayo INV E 612 – 13 como lo plantea la metodología del Invias, por este hecho las probetas no se compactaron con el contenido óptimo de cemento, sino con los mismos porcentajes que se trabajaron para la prueba de resistencia (5, 7 y 9%). La prueba se realizó con estos porcentajes para realizar un análisis más detallado del efecto de desgaste del material en función con el incremento de porcentaje de cemento,

Expuesto lo anterior, el presente trabajo busca dentro de sus objetivos analizar cómo influye la polisombra en el comportamiento mecánico de un suelo teniendo en cuenta diferentes adiciones de cemento, es necesario evaluar con los porcentajes de cemento en peso utilizados anteriormente, teniendo en cuenta que el contenidos de cemento determinado mediante el ensayo de resistencia se encuentran dentro del rango de las dosificaciones de cemento utilizadas, esto permitió experimentalmente determinar el desgaste de cada una de las dosificaciones óptimas. De esta forma la variación realizada a la norma obedece al enfoque que se plantea en el presente trabajo y no modifica el resultado de la misma. En las gráficas **14 – 15** se pudo determinar experimentalmente el valor de desgaste para los porcentajes óptimos de cemento.

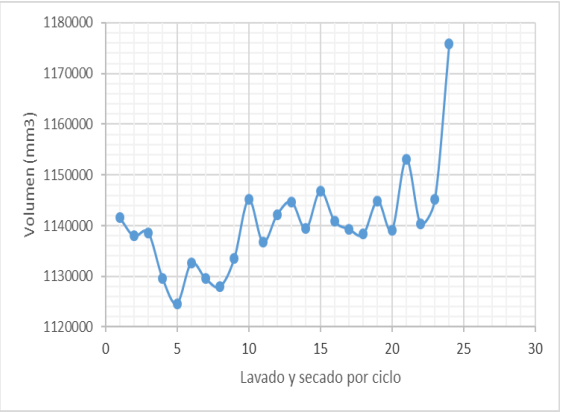


a). sin inclusión de polisombra



b) con inclusión 0.5% de polisombra

c.) *con inclusión 1% de polisombra*



d.) *con inclusión 1,5% de polisombra*

Gráfica 13. *Cambios de volumen durante los 12 ciclos para espécimen con cemento 9%*

Tabla 6.
Informe final del cambio de volumen de mezclas de suelo cemento

Ensayo	***Norma de ensayo I.N. V***	***Material***	***Volumen inicial (mm^3)***	***Volumen Final (mm^3)***
Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo – cemento	E – 612	*Poli 0 %, cem 5%*	*975640,39*	*972241,27*
		Poli 0%, cem 7%	*1026995,71*	987530,23
		Poli 0 %, cem 9%	*989559,05*	*980353,76*
		Poli 0.5%, cem 5%	***No terminó***	
		poli 0.5 %, cem 7%	*1025210,72*	1028901,13
		Poli 0.5%, cem 9%	1131145,7	1132710,37
		poli 1 %, cem 5%	***No terminó***	
		Poli 1%, cem 7%	1012444,9	1005095,27
		poli 1 %, cem 9%	1155790,7	1146611,99
		Poli 1.5%, cem 5%	***No terminó***	
		poli 1.5 %, cem 7%	996987,71	1034093,68
		Poli 1.5%, cem 9%	1141653,3	1175774,16

Nota: no terminó: *quiere* decir que los especímenes fallaron antes de terminar el ensayo de durabilidad

Con respecto a las **gráficas 13**, se observó que el suelo tiene varios cambios de volumen; el suelo se contrajo en las dosificaciones de cemento del 5%, en todas las inclusiones de polisombra, este suelo tampoco soporto los cambios de volumen hasta los 12 ciclos; se nota que en las dosificaciones del 7% y 9% de cemento el suelo se expande a partir de la inclusión del 1% de polisombra. (ver **anexo T**)

En relación a los especímenes (2), a los que se les realizó el desgaste, se les calculó el porcentaje de perdida, (ver **tabla 7**)

El porcentaje de pérdidas se calculó, por medio de dividir la diferencia entre la masa original seca al horno calculada y la masa seca al horno final corregida, sobre la masa original seca al horno calculada; para poder realizar la corrección de la masa seca al horno final, se tuvo en cuenta los valores promedios de agua retenida y con el suelo ya

clasificado anteriormente por la AASHTO, se observó que el promedio de agua retenida después de secado a 110º C, para un suelo A-2 – 4 es 2.5 % (ver **Tabla 8**)

Tabla 7.
Porcentaje de pérdidas para los especímenes sometidos a desgaste

Porcentaje de cemento (%)	***Porcentaje de polisombra (%)***	***Porcentaje de perdidas (%)***
5	*0*	*4.05*
7	*0*	*3.03*
9	*0*	*3.58*
5	*0.5*	*5.62*
7	*0.5*	*3.87*
9	*0.5*	*4.62*
5	*1*	*NO TERMINO LOS 12 CICLOS*
7	*1*	*5.85*
9	*1*	*7.72*
5	*1.5*	*NO TERMINO LOS 12 CICLOS*
7	*1.5*	*9.73*
9	*1.5*	*0.01*

Nota**:** *(NO TERMINO LOS 12 CICLOS)* quiere decir que los especímenes fallaron antes de terminar el ensayo de durabilidad

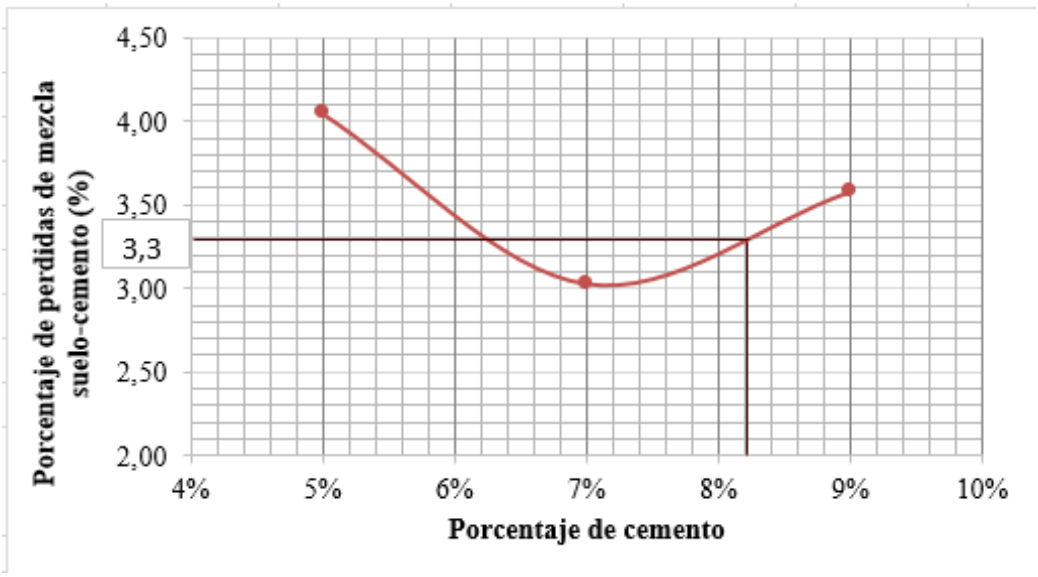
Con base a la **tabla 7**, se pudo observar que el porcentaje de perdidas tuvo menor disminución en los porcentajes del 7%, 9% de cemento, paralelamente se evidencio que los especímenes del 5% de cemento tuvieron baja durabilidad; en relación de las fibras de polisombra, se obtuvo mayor desgaste con la inclusión de los porcentajes mayores de estas fibras (1%, 1.5%).

Tabla 8.
Valores promedio de agua retenida

Clasificación AASHTO del suelo que se está estabilizando	***Promedio de agua retenida después de secado a 110º c, %***
A – 1, A – 3	*1.5*
A – 2	*2.5*
A – 4, A – 5	*3.0*
A – 6, A – 7	*3.5*

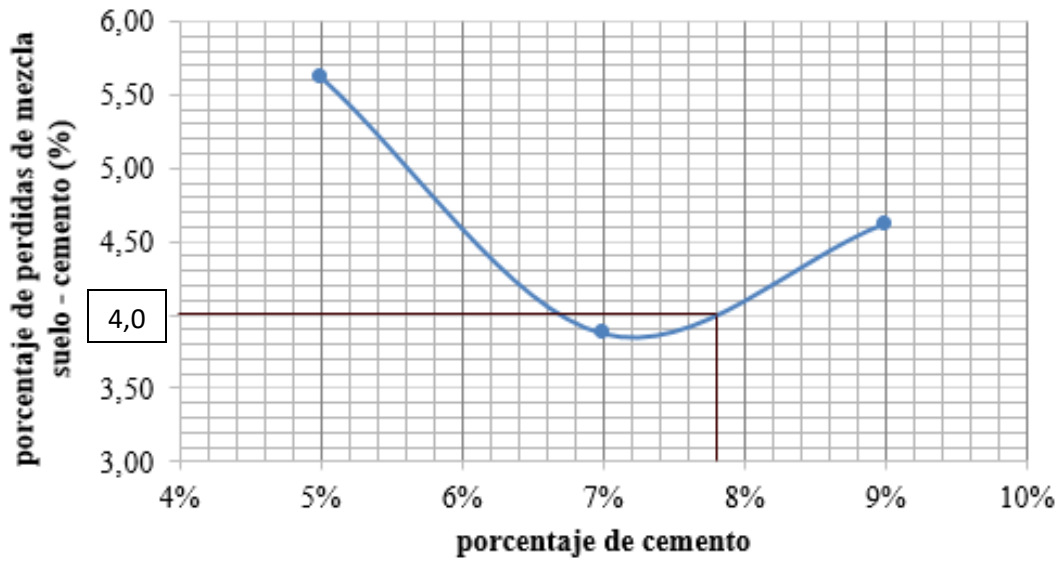
Nota. Fuente: Instituto Nacional de Vías [Invias]. (2013, art.612, p. 3)

6.4.1 Valor de desgaste experiementalmente para los porcentajes optimos de cemento



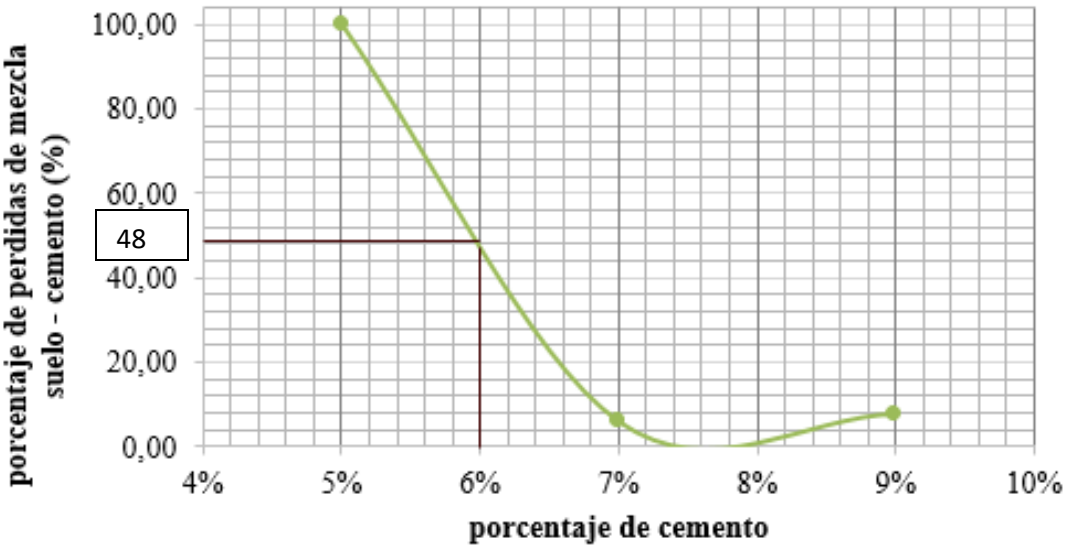
Grafica 14. Desgaste para el porcentaje óptimo de cemento (8.2%) sin adición de polisombra

Nota: El porcentaje de desgaste es de 3.3%



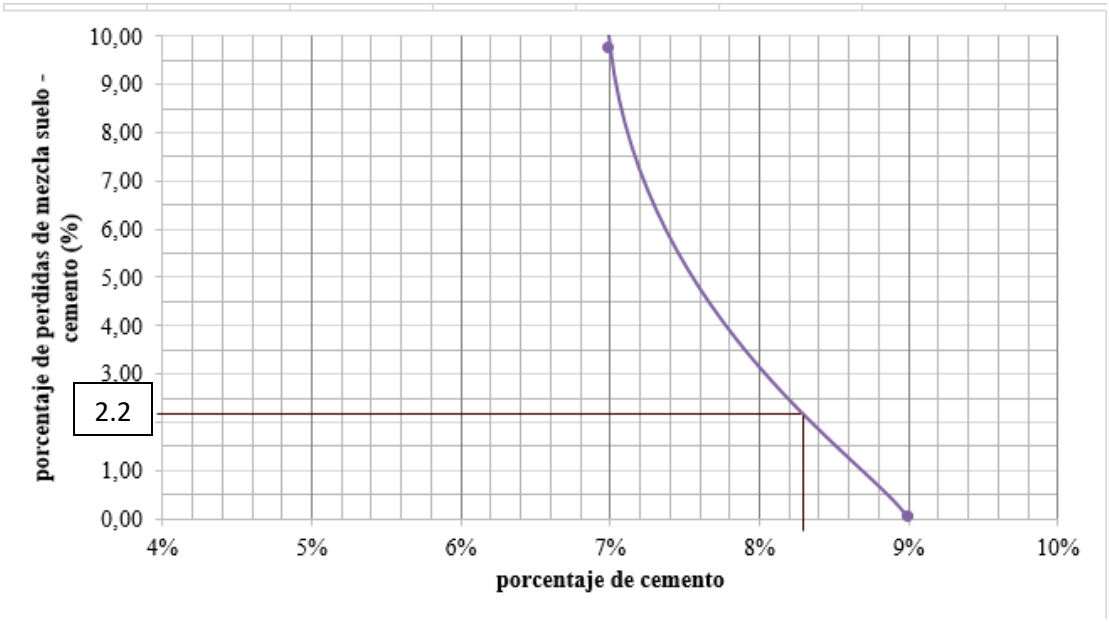
Grafica 15. Desgaste para el porcentaje óptimo de cemento (7.8%) con 0.5 % de adición de polisombra

Nota: El porcentaje de desgaste es de 4%



Grafica 16. Desgaste para el porcentaje óptimo de cemento (6%) con 1% de adición de polisombra

Nota: el porcentaje de desgaste es de 48%



Grafica 17. Desgaste para el porcentaje óptimo de cemento (8.3%) con 1.5% de adición de polisombra

Nota: El porcentaje de desgaste es de 2.19%

6.5. Informe final de los resultados de los criterios de diseño para la mezcla de suelo- cemento.

En la **tabla 9** se puede apreciar cómo se comportó las mezclas propuestas con respecto a la especificación I.N.V.E 350 – 13

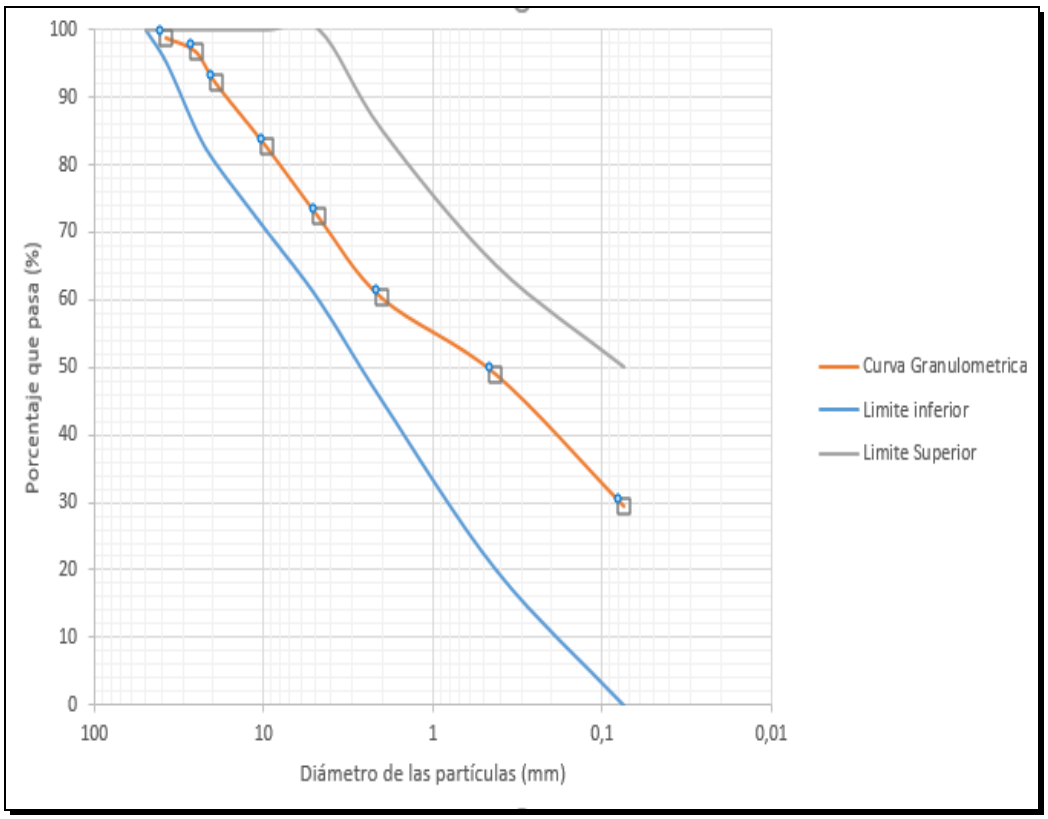
Tabla 9.
Criterios de diseño para la mezcla de suelo – cemento

Ensayo	***Norma de ensayo I.N. V***	***Requisito***	***Material***	***Resultado***
Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado, % **Suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3**	E – 612	14	*Poli 0 %, cem 5%* *Poli 0%, cem 7%* *Poli 0 %, cem 9%* *Poli 0.5%, cem 5%* *poli 0.5 %, cem 7%* *Poli 0.5%, cem 9%* *poli 1 %, cem 5%* *Poli 1%, cem 7%* *poli 1 %, cem 9%* *Poli 1.5%, cem 5%* *poli 1.5 %, cem 7%* *Poli 1.5%, cem 9%*	*4.05* *3.03* *3.58* *5.62* *3.87* *4.62* *No terminó* *5.85* *7.72* *No terminó* *9.73* *0.01*
Comportamiento de la resistencia con: - **Incremento en el contenido de cemento** - **Incremento en la edad**	E – 614	Crece crece	Mezcla de dosificaciones de cemento 5%, 7%, 9%), con inclusión de fibras de polisombra (0%, 0.5%, 1%, 1.5%)	*Crece a medida que va aumentado la dosificación del cemento*
Resistencia a la compresión a 7 días, Mpa - **Mínima** - **Máxima**	E – 614	2.1 4.5	*poli 0 %, cem 5%* *Poli 0%, cem 7%* *poli 0 %, cem 9%* *Poli 0.5%, cem 5%* *poli 0.5 %, cem 7%* *Poli 0.5%, cem 9%* *poli 1 %, cem 5%* *Poli 1%, cem 7%* *poli 1 %, cem 9%* *Poli 1.5%, cem 5%* *poli 1.5 %, cem 7%* *Poli 1.5%, cem 9%*	1.31 1.76 2.34 1.51 1.85 2.50 1.97 2.26 2.76 1.82 1.74 2.32

Nota: (*No terminó*) quiere decir que los especímenes fallaron antes de terminar el ensayo de durabilidad

7. ANALISIS DE RESULTADOS

La curva granulométrica (ver **grafica 4**), clasifico dentro de una de las gradaciones (Tipo B-50-2) expuestas por la especificación I.N.V E 350 -13, con este ensayo se pudo continuar con los demás ensayos de clasificación, de esta manera se determinó que el suelo a utilizar cumple con las características que pide dicha especificación, ya que los requisitos cambian con respecto al tipo de gradación. (ver **Tabla 2**)



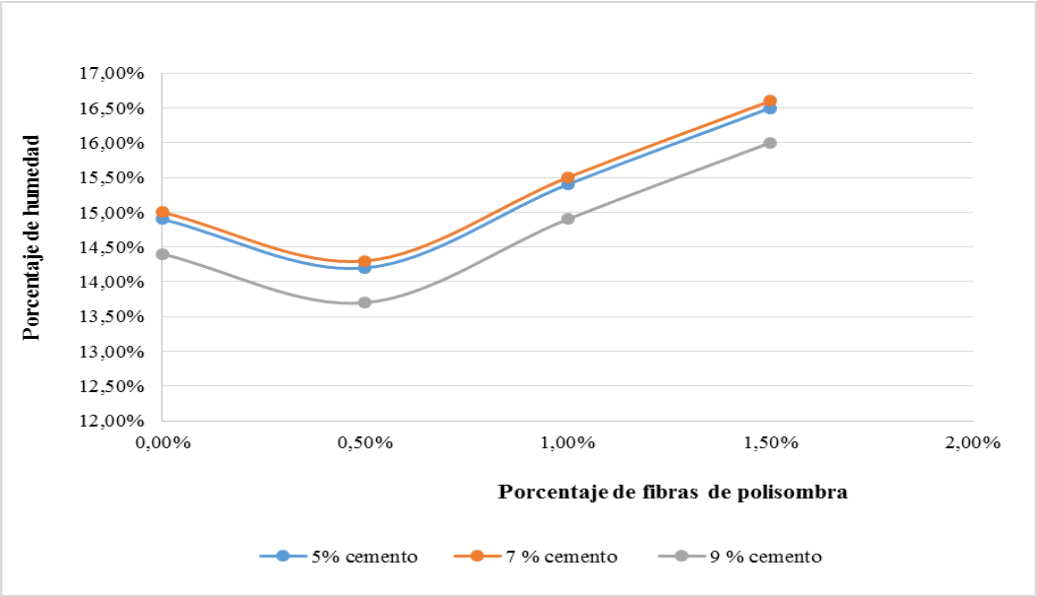
Gráfica 6. Curva granulométrica

Los valores de los límites de consistencia son acordes a lo establecido en la especificación I.N.V E 350 -13, esta normativa exige que el porcentaje máximo del límite líquido, para poder ser estabilizado el suelo con cemento es de 35 y para el índice

de plasticidad es de 15%, cumpliendo esto, el suelo arrojo unos valores del 18.72% y 9.40% respectivamente.

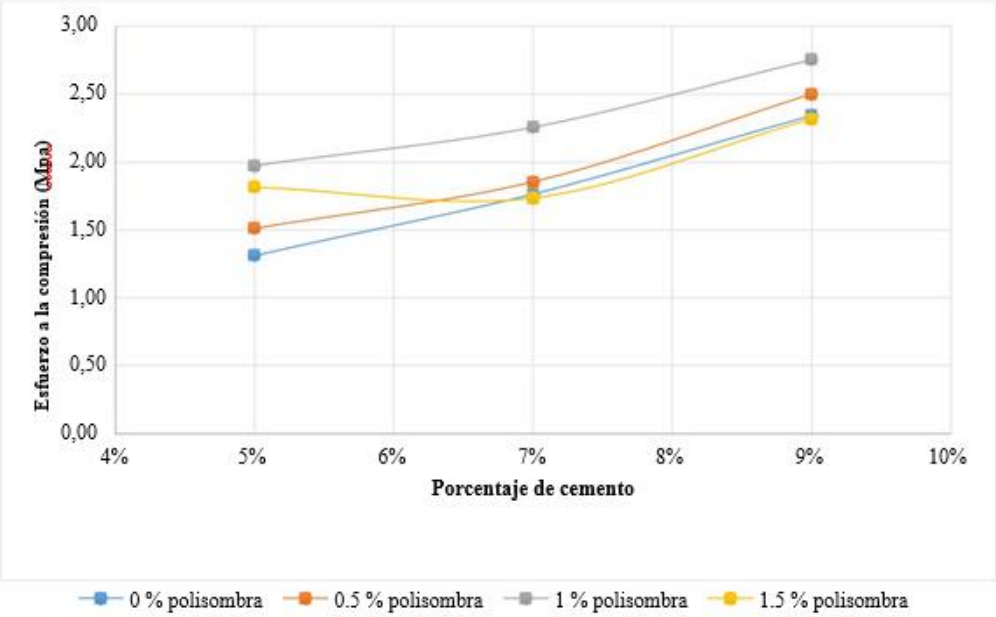
El valor de la humedad óptima, fue obtenida mediante el proctor estándar con cemento (I.N.V E-611), por motivos de que el suelo no es granular y necesita una energía de compactación menor, los porcentajes de humedad iniciales utilizados fueron del 10%, 13%, 16% y 19%, pero con respecto a que se aumentaba el porcentaje de inclusión de fibras de polisombra, también se aumentaba el porcentaje de humedad, para finalizar con el 13%, 16%, 19%, 22% de agua.

El porcentaje de humedad aumento a medida que iba creciendo el porcentaje de fibras de polisombra agregar, se concluyó que el material PET (polisombra) absorbe agua, lo que se tuvo que hacer proctor por cada combinación de porcentaje de cemento con porcentaje de polisombra. Con respecto a los cambios de humedad por la dosificación de cemento, aumento el porcentaje de agua de 5% al 7% de cemento, pero tuvo una disminución del 7% al 9% de cemento (ver **anexo F)**



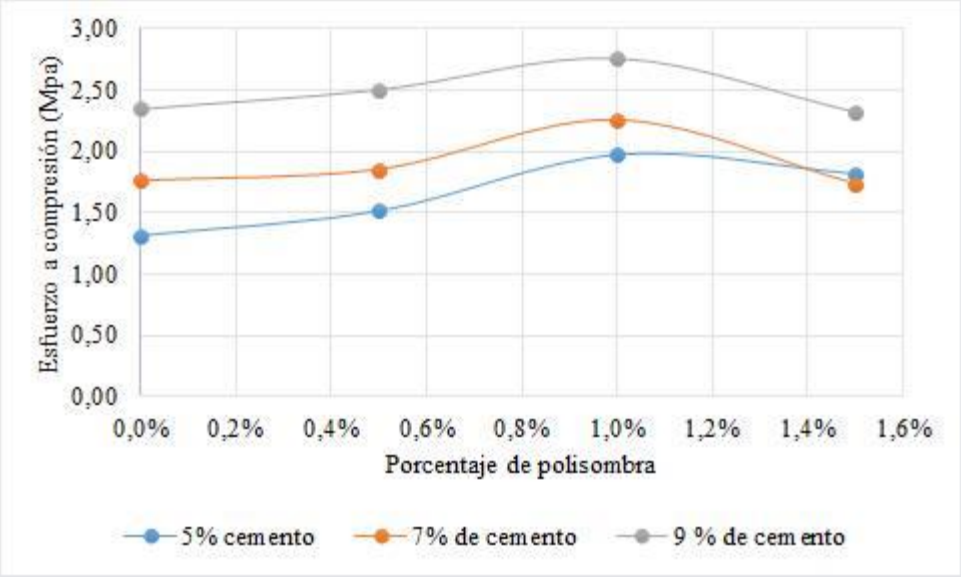
Gráfica 18. Porcentajes de humedad vs porcentajes de fibras de polisombra con respecto a la dosificación de cemento

La resistencia a compresión se realizó por medio de la norma I.N.V 614 – 13 (resistencia a la compresión de cilindro moldeados de suelo – cemento), en la **gráfica 19** se realiza una comparación de las resistencias de los diferentes porcentajes de fibras de polisombra con las dosificaciones de cemento utilizadas (5%, 7%, 9%); se notó que el porcentaje más favorable es el de 1% de fibras de polisombra, ya que se evidencia un aumento en la resistencia de la mezcla.



Gráfica 19. Comparación de los porcentajes de polisombra con respecto al esfuerzo y a las dosificaciones de cemento

En la **gráfica 20**, se evidencia una comparación de las dosificaciones de cemento con respecto al esfuerzo y al porcentaje de fibras de polisombra utilizadas, se ratifica que el 9% de cemento tiene mejor comportamiento en cuanto la resistencia de la mezcla suelo – cemento – polisombra



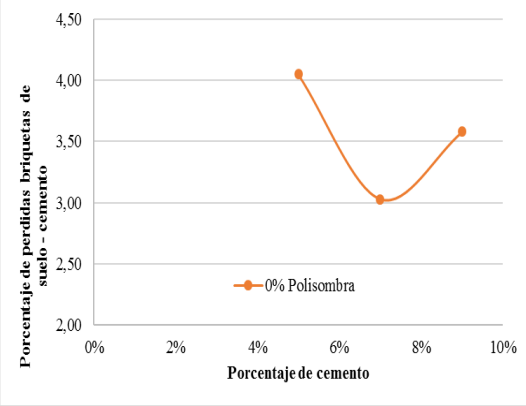
Gráfica 20. Comparación de las dosificaciones de cemento con respecto al esfuerzo y al porcentaje de polisombra

Analizando las **gráficas 19 y 20**, se tuvo que para el 0 % de fibras de polisombra, 0.5%., 1% y 1.5% se comportó mejor, con una alta resistencia, la dosificación del 9%.

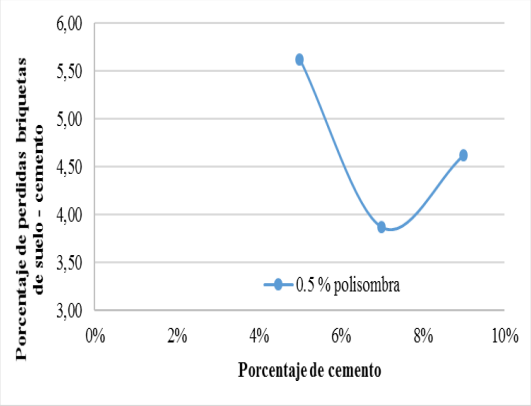
Para la dosificación del 5%, 7% y 9% de cemento, el porcentaje de fibra incluida en la mezcla, que tuvo mejoras en su comportamiento fue la del 1% de fibras de polisombra.

Con respecto a la durabilidad de la mezcla en la **tabla 9**, se confirma que esta cumple con las especificaciones I.N.V.E 350 – 13, ya que pide que el porcentaje de perdidas sea máximo del 14% y la mezcla obtuvo valores menores que el porcentaje estimado (ver t**abla 7**).

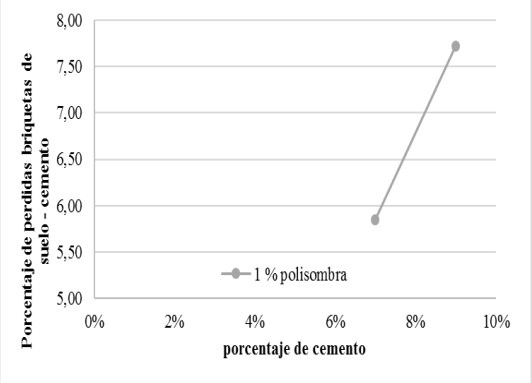
a). Curva con el 0% fibras



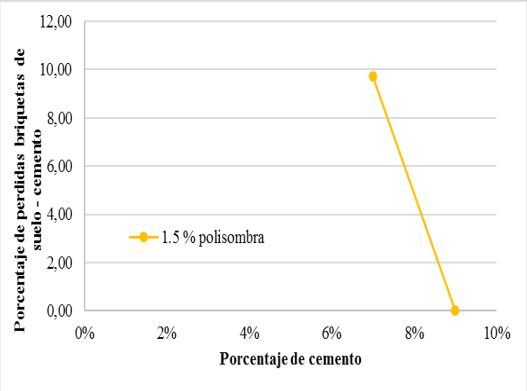
b). Curva con el 0,5% fibras



c). Curva con el 1% fibras

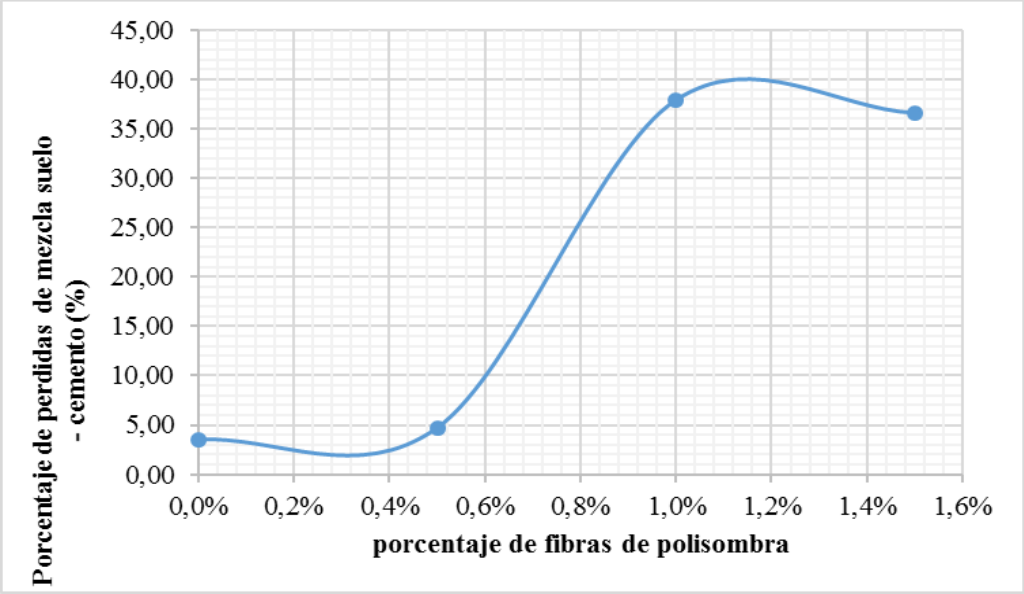


d). Curva con el 1,5% fibras



Gráfica 21. Porcentajes de perdidas vs al porcentaje de cemento para cada uno de los porcentajes de fibras

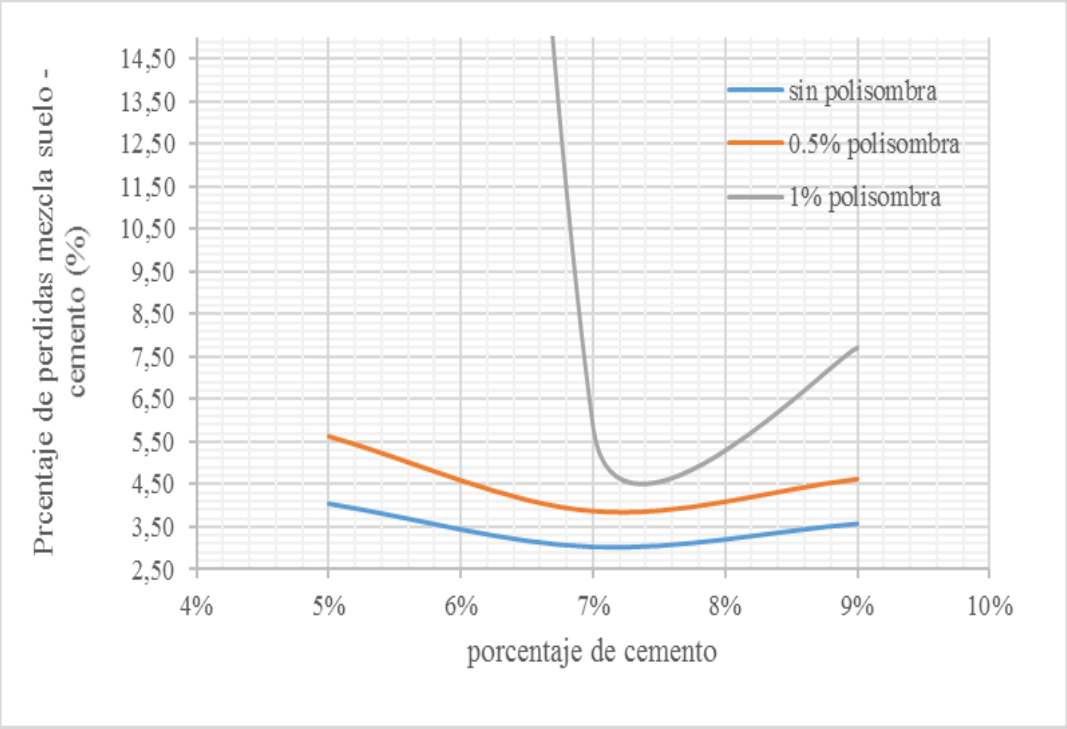
Con respecto a la **gráfica 21** se pudo decir que en el ensayo de durabilidad la dosificación que mejor se comporto fue la del 7% de cemento, tubo menores perdidas y cumplió satisfactoriamente con los 12 ciclos de pruebas; para el 5% se tuvo que fue la dosificación más mala, hay que al ir aumentando el porcentaje de inclusión de las fibras de polisombra, menor era su durabilidad; para el 9% el comportamiento fue bueno, ya que los porcentajes de perdías están muy cerca a los del 7% y como el también cumplió con los 12 ciclos requeridos por la normativa I.N.V.E 350 – 13



Gráfica 22. Comportamiento de las perdidas en cuanto al porcentaje de fibras de polisombra

Se evidencia en la **gráfica 22**, que las perdidas van aumentando según se incrementa el porcentaje de polisombra, esto se puede decir que este material no funciona muy bien en conjunto de suelo y cemento, en cuanto es sometida a ensayo de desgaste

En cuanto al cambio de volumen se puede observar en las **gráfica 23, tabla 6** que las fibras en cuanto son los porcentajes del 0.5% y 1% son favorables, ya que el suelo no tuvo cambios considerables en su volumen, estos porcentajes son menores en comparación a los especímenes que no tenían polisombra y los que tenían 1.5% de polisombra.



Gráfica 23. Comportamiento de las perdidas en cuanto al porcentaje de cemento

Por otra parte, **la gráfica 23** refleja resultados con cierto grado de sesgo puesto que para los porcentajes de adición con el 1 y 1,5% de polisombra no son claros para un análisis lógico de estos. En justificación, durante la elaboración de los especímenes la prueba de humedecimiento y secado pudo estar sujeta bajo errores de calibración de los equipos para la medición de los cambios de volumen y para la elaboración de los mismos, por este motivo, dar una opinión certera del tipo de comportamiento que presenta la polisombra en la mezcla ante la acción del interperismo no es representativa.

8. CONCLUSIONES

Se determinó que el diseño óptimo para estabilizar un suelo – cemento con adición de malla Raschel reciclada es del 1% de polisombra en relación al peso del suelo seco y el 6% de cemento; esto cumpliendo con los requisitos de resistencia mínima con un valor del 2.1 Mpa.

Se concluyó que al adicionar polisombra, tiene una mejora en los costos de la mezcla, ya que se requiere menos porcentaje de cemento para una adición del 1% de polisombra, lo cual genera beneficios de resistencia, durabilidad y económicos

Se encontró que la longitud de fibra de malla Raschel con mayor resistencia a la tensión fue de 4 cm y 12 cm, sin embargo, se decidió por manejabilidad y trabajabilidad usar la longitud de 4cm, ya que, al momento de realizar la mezcla del suelo con el cemento, no se dobla la fibra sabiendo que entre más larga, más probabilidades de que se produjese un desperdicio del material, además con esta longitud empleada y sus características mecánicas, se lograran aprovechar para el desempeño de la mezcla respectivamente.

El material utilizado para la investigación según el sistema de clasificación AASHTO fue un (A-2-4) el cual correspondió a un suelo areno limoso con alta plasticidad. El material conto con el 1% de contenido de materia orgánica, esto se debe producto de la obtención de cantera lo que permite tener una certeza de que no presentara contacto con algún residuo orgánico o con la descomposición de seres vivos. El contenido de humedad natural fue del 12.6% acorde a su plasticidad la cual se obtuvieron valores de límite líquido de 18.72% y de límite plástico 9.32, para finalmente obtener un índice de plasticidad del 9.40% lo que dio pie para ser mejorado en cuanto a su comportamiento

mecánico con la inclusión de cemento cumpliendo con la especificación del artículo 350 – 13 (suelo – cemento) del Invías

Los valores de humedad para cada diseño de las probetas suelo – cemento – polisombra variaron de forma ascendente, tuvo como consecuencia, que el contenido de agua necesaria para la compactación aumentaba, aunque el material de adición es un polímero y es de conocimiento que no tiene la capacidad de absorción, sin embargo al ser reciclada la fibra y durante el procesamiento de este material, expuesto en el capítulo 5 del presente documento (caracterización de los materiales) presento finos adheridos a ella, lo que seguramente influyó en los cambios de humedad repercutiendo en la compactación de los especímenes para cada uno de los diseños realizados.

La resistencia a la compresión de los cilindros moldeados de suelo – cemento con adición de malla Raschel reciclada mostraron un incremento únicamente para el 0.5 y 1% respecto a las muestras de suelo - cemento, para las mezclas con 0.5% de polisombra con los porcentajes de 5, 7 y 9% de cemento el aumento de resistencia estuvo en un rango del 5 a 15%. En cuanto a la adición del 1% de fibra fue la de mejor comportamiento ya que para el caso de la mezcla con el 5% de cemento aumento su resistencia en un 50%, para el 7% de cemento un 28% y para el 9% de cemento un 18% respectivamente, esto considerando que es natural que la resistencia última de las probetas compactadas de suelo – cemento aumenta con el incremento de los porcentajes de cemento.

Se determinó a partir de los datos obtenidos de la prueba de humedecimiento y secado de las muestras de suelo – cemento – polisombra, que las pérdidas en masa del material aumentaron en cada uno de los porcentajes de adición en relación a las probetas

de suelo – cemento, por lo que se concluye que el material a adicionar vista desde un análisis como un material de adición para bases y subbases para fines constructivos, incide en la perdida de material por la acción del interperismo, causando así una disminución en la durabilidad en comparación a las probetas sin adición. Sin embargo, como se mencionó en el análisis de resultados, es importante corroborar este análisis y realizar repetibilidad a este ensayo para una mayor confiabilidad y así dar una opinión correcta de este comportamiento

9. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar este análisis variando los porcentajes de fibras de malla Raschel entre 0.5% y 1% para corroborar el comportamiento de durabilidad de un suelo – cemento- polisombra, y dentro del plande ensayos tener en cuenta la repetibilidad

Dado que la investigación se realizó adicionando polisombra en una mezcla de suelo – cemento en relación al peso del suelo se recomienda en futuras investigaciones realizar este análisis, pero en relación al volumen del espécimen acorde a la normatividad Invìas. Esto debido a que, en el trascurso de esta, se evidencio que los porcentajes del material de adición en cantidad por briqueta era muy grande, ya que este material no tiene un peso considerable. De alguna manera si se reduce el porcentaje de adición de polisombra, es probable que se obtenga un mejor desempeño de la mezcla en cuanto a resistencia y durabilidad.

Es de conocimiento que hoy en día en la construcción de pavimentos flexibles el uso de tecnologías de geotextiles o geomallas como mecanismos de refuerzo, drenaje, separación, entre otros usos, permiten aumentar la resistencia en las capas de base. Por ello queda abierto el estudio para analizar la polisombra como un tipo de refuerzo. De acuerdo a los resultados obtenidos del comportamiento mecánico de este material, es posible que de utilizarse de manera tejida y no en tiras, pueda ser un diferente uso y forma de procesar este material en beneficio ambiental y en materia vial.

10. REFERENCIAS

ALCALDIA DE BOGOTÁ. (23 de 12 de 2015). Obtenido de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=64204

ANIF. (2014). *Concesiones de Infraestructura de Cuarta Generacion (4G): Requerimientos de Inversion y Financiamiento Público-Privado.* Camara Colombiana de Infraestructura . Recuperado el 20 de Septiembre de 2016, gool.gl/4lkxge

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS [ASTM]. (1958), (D 421 – 58)

ASSOCIATION, P. C.A (2001). *Soil - Cement Inspector's Manual.* Illinois.

CLARIÁ , J. J., & VETTORELO , P. V. (2012). Arenas reforzadas con fibras sintéticas. Variación del comportamiento con la compacidad. *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica CAMSIG XXI.* Rosario, Santa Fe, Argentina.

CONSEJO DE BOGOTÁ. (1 de 3 de 2011). *Alcaldía Bogotá*. Obtenido de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=41936

FERNÁNDEZ LOAIZA, C. (2009). *Estabilización de suelos en la contrucción vial.* Orientacion vias de comunicación, Mecanica de suelos.

FONSECA, A. M. (2006). *Ingeniería de pavimentos.* Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

GEOSISTEMAS PAVCO. (Junio de 2012). *Geosoftpavco.* Obtenido de http://www.geosoftpavco.com/manual_geosinteticos_files/OEBPS/ibook_split_000.xhtml

HURTADO ROSALES, D. (11/2/2015). *Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras.* Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), México.

IDU, I. d. (2005). *Instituto de desarrollo urbano IDU.*: *especificaciones tecnicas generales de materiales y construccion para proyectos de infraestructura vial. Capitulo 4: subbases y bases*. Obtenido de Instituto de desarrollo urbano IDU https://www.idu.gov.co/documents/629245/736522/ET-Cap4.pdf/7d48eec3-3715-47aa-8515-01bb1bec9e22

INSTITUO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. (1 de 2013). *IECA.* Obtenido de https://www.ieca.es/Uploads/docs/Estabilizaci%C3%B3n_de_suelos_con_cemento.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Determinacion del contenido organico de un suelo mediante el ensayo de perdida por igninicion I.N.V E – 121 – 13. Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. I.N.V E – 122 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Determinación de los tamaños de las partículas de suelos I.N.V E – 123 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Determinación del límite liquido de los suelos. I.N.V E – 125 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos. I.N.V E – 126 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Relación de humedad-peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación) I.N.V E – 142 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo cemento I.N.V E – 611 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento. I.N.V E – 612 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento I.N.V E – 612 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (2013). Suelo-cemento. Articulo 350 – 13 Obtenido de: http://www.invias.gov.co/

INTERNACIONAL, I. (16 de 12 de 2009). Norma Tecnica Colombia [NTC], 5492. *Metodo de ensayo para determinar las propiedades de tension de geomallas por el metodo de la tension de costilla sencilla o multi - costilla*.

IZQUIERDO, P. O., & VALDERRAMA, C. (2012). *Base estabilizada con cemento modificada con grano de caucho de llanta.* Universidad de La Salle, Bogotá.

MALLICK, R. B., & EL-KORCHI, T. (2009). *Pavement engineering: principles and practice*. Boca Raton: CRC Press.

MARIANO. (16 de 7 de 2012). *TECNOLOGÍA DE LOS PLÁSTICOS*. Obtenido de http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2012/07/polietileno-pe.html

MUÑOZ, e. i. (agosto de 2012). Reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas. *reciclaje de desechos de concreto y verificación de características físicas y propiedades mecánicas*. Guatemala : UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

MURILLO, I. E. (2010). *Estudio del comportamiento de la base de pavimentos rigidos en la ciudad de cuenca y su influencia en el diseño.* Cuenca Ecuador

ORTIZ, D. B., & SALAZAR, J. S. (2016). *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.* Universidad de la Salle, Bogotá.

ORTIZ, J. A. (2013). *Suelos arcillosos reforzados con materiales de plastico reciclado (PET).* Tesis, Antiquia.

PLASTEMPACK DE COLOMBIA LTDA. (5 de 2015). Obtenido de http://www.plastempack.com/telas-y-mallas/polisombra.html

REYES LIZCANO, F. A. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. Bogotá: CEJA: Escuela Colombiana de Ingeniería

RINCON, E., QUINTANA, H. R., PINZON, D. V., & AGUIRRE, L. A. (30 de 6 de 2006). Influencia de la inclusion de desecho de PVC sobre el CBR de un material granular tipo subbase. *Revista Ingenierias Universidad de Medellin*.

RIVERA, J., & GARCIA, D. L. (30 de 6 de 2014). Mechanical characteristics of Raschel mesh and their application to the design of large fog collectors. *ELSEVIER*.

SINGER, F. L., & PYTEL, A. (1980). *Strength of materials.* New York: Harper & Row.

SISTEMA NACIONAL AMBIENTAL. (16 de 4 de 2016). *MINANBIENTE*. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/index.php/temas-ordenamiento-ambiental-territorial-y-coordinacion-del-sina

TECNOLOGÍA DE LOS PLASTICOS. (6 de 2 de 2014). *tecnologiadelosplasticos*. Obtenido de: http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/