

2015

Comportamiento de una base estabilizada con cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido en la fracción fina del agregado tamiz # 10 y # 20

Helbert Danilo Buitrago Ochoa
Universidad de La Salle, Bogotá

Edwin David Gonzalez Gonzalez
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

Buitrago Ochoa, H. D., & Gonzalez Gonzalez, E. D. (2015). Comportamiento de una base estabilizada con cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido en la fracción fina del agregado tamiz # 10 y # 20. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/405

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.

**COMPORTAMIENTO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO
SUSTITUYENDO PARTICULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA
FRACCION FINA DEL AGREGADO (TAMIZ # 10 Y # 20)**

**HELBERT DANILO BUITRAGO OCHOA
EDWIN DAVID GONZALEZ GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D. C.**

2015

**COMPORTAMIENTO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO
SUSTITUYENDO PARTICULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA
FRACCION FINA DEL AGREGADO (TAMIZ # 10 Y # 20)**

HELBERT DANILO BUITRAGO OCHOA

EDWIN DAVID GONZALEZ GONZALEZ

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

Director Temático

Ing. Sandra Elodia Ospina Lozano

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

BOGOTA D. C.

2015

AGRADECIMIENTO

Agradecemos primeramente a Dios por brindarnos la sabiduría y fortaleza necesaria a largo de nuestro proyecto, por permitir levantarnos ante cualquier circunstancia y darnos la fuerza necesaria para culminar con éxito nuestro proyecto de grado y así cumplir un logro más para convertirnos en profesionales.

A la Ingeniera Sandra Elodia Ospina lozano, directora de nuestro proyecto, por su dedicación y compromiso, quien con sus conocimientos, su experiencia, su apoyo y motivación, nos ha impulsado día a día para lograr culminar nuestro proyecto de manera satisfactoria.

Al Ingeniero Víctor Jaime Galvis Linares y al Ingeniero Lucio Guillermo López Yépez, quienes con sus aportes y sugerencias contribuyeron al mejoramiento continuo de nuestro proyecto.

A los docentes e ingenieros que hicieron parte de nuestros estudios profesionales, quienes nos formaron no solamente a nivel académico, sino a nivel personal, en búsqueda de un profesional integral, capaz de servirle a la sociedad y enriquecer permanentemente sus conocimientos propios.

A la Universidad de la Salle por ser el pilar fundamental de nuestra carrera, brindándonos las herramientas y mecanismos necesarios para desarrollar nuestras habilidades y capacidades como ingenieros.

A nuestros familiares, compañeros, y amigos quienes a lo largo de nuestro camino, fueron un apoyo incondicional en cada momento, compartiendo con nosotros momento de alegría, triunfos y amistad.

A todos y cada uno de ustedes mil gracias, este triunfo no es nuestro solamente, es de todos.

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre Luz Myriam Ochoa Gil quien fue mi apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera, fue mi principal motor y mi más grande motivación, la persona por la cual nunca desfallecí, quien estuvo a mi lado ante cualquier tropiezo, quien con su amor y valentía guio cada paso que di, quien día a día me brindo las mejores enseñanzas y me forjo como persona para afrontar los retos que se presentaron a largo de mi carrera, quien con su esfuerzo, sacrificio y dedicación me ayudo a salir adelante, a cumplir mis sueños y mis metas, a lograr un triunfo más en mi vida, un triunfo de los dos.

A mi abuelo Rafael Antonio Ochoa, quien dejo en mi grandes enseñanzas y grandes valores, quien con sus consejos y palabras ayudo a ser de mí la persona que soy, quien dejo recuerdos maravillosos que me motivan cada día a salir adelante y lograr todos mis objetivos, que aunque no se encuentra presente en este momento, sé que desde el cielo me acompaña y me guía en cada paso y cada decisión que tome.

A mi amigo y compañero de tesis Edwin González, quien me acompaño a lo largo mi vida universitaria, de quien me llevo no solo su esfuerzo, su dedicación, su emprendimiento, su lucha por cumplir sus metas y sus sueños, sino los mejores y más gratos recuerdos de lo que es un amigo, quien me acompaño en momentos de alegrías y dificultades, quien supero conmigo muchos de los obstáculos que se nos presentaron, quien me apoyo permanentemente, y junto a quien hoy logro este gran triunfo.

A mi novia Claudia Paz, por su apoyo incondicional, por acompañarme en mis triunfos y tropiezos, por llenarme de fuerza y cariño y acompañarme en este camino

A mis amigos y compañeros Iván Caamaño, Paola Villamil, Cesar Silva y Giovanni García quienes me acompañaron a lo largo de mi carrera, quienes me apoyaron de forma incondicional, de quienes me llevo grandes enseñanzas, los mejores recuerdos y una gran amistad. A mi abuela Ana de Ochoa y a mi primo Jimmy Preciado, quienes me acompañaron durante toda mi carrera, dándome su apoyo, su fuerza y su motivación.

Helbert Danilo Buitrago Ochoa

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo quiero dedicar a mi familia, especialmente a mi madre, Rosa Cecilia González González y a mi padre Miguel Vicente González Hamon, quienes me permitieron llegar a este mundo, brindándome el mayor y más sincero amor que un hijo puede recibir. Totalmente agradecido por el apoyo en cada uno de mis objetivos, metas y sueños trazados en el camino de la vida, mediante principios y valores, me enseñaron a esforzarme para superar cada dificultad que se presenta. Por ser el bastón en los momentos más difíciles y por los consejos que nunca sobran. Gracias a Dios por darme unos padres tan maravillosos, porque todo esto no hubiera sido posible, sin ustedes.

A mis hermanos, Miguel Ángel González González y Daniel Felipe González González, quienes fueron el mejor regalo que pude haber tenido desde niño, por tantas risas y buenos momentos que me han regalado al lado de ellos.

También quiero dedicar este trabajo a mi novia, Estefanía León Moreno, que aparte de darme su mayor cariño, ha sido la persona que me ha aconsejado en cada paso de mi vida, en especial el de “luchar por lo que uno quiere, así hayan tropiezos, desde que se tenga la convicción, todo se puede lograr”.

A mis compañeros, amigos y colegas, en especial a Helbert Danilo Buitrago Ochoa e Iván Alberto Caamaño Murillo por acompañarme, compartir conocimientos, ideas, y grandes momentos en mi carrera universitaria, de una manera incondicional.

Finalmente, a todas las personas que de algún modo u otro hacen de nosotros lo que somos, que con una sonrisa, una palabra de aliento, un reclamo, un abrazo o una mirada, permiten que cada día se tengan herramientas que permiten la mejora continua. Sea éste trabajo símbolo del sacrificio, entrega y tesón en cada cosa que se hace, la insignia de lo que supone el final de una gran etapa, pero, el inicio de otra, seguramente llena de oportunidades y de grandes retos por cumplir.

Edwin David González González

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	15
1.1. TITULO DEL PROYECTO	15
1.2. LINEA DE INVESTIGACION	15
1.3. DESCRIPCION DEL PROYECTO	16
1.3.1. Planteamiento del Problema	16
1.3.2. Formulación del Problema	17
1.4. JUSTIFICACION	17
1.5. OBJETIVOS	18
1.5.1. Objetivo General	18
1.5.2. Objetivos Específicos	18
1.6. DELIMITACION DEL PROYECTO	19
1.6.1. Sustitución del Material	21
1.7. MARCO REFERENCIAL	21
1.7.1. Antecedentes Teóricos	21
1.7.2. Marco Teórico	25
1.7.3. Marco Conceptual	32
1.7.4. Marco Normativo	34
1.7.5. Metodología	37
1.7.5.1. Fase 1. Revisión Bibliográfica– Normatividad, Antecedentes y Artículos.	37
Lecturas de Normas y Documentos	37
1.7.5.2. Fase 2. Fase Experimental	37
1.7.5.3. Fase 3. Cálculos y Análisis de Resultados	38
1.7.5.4. Fase 4. Desarrollo del Documento	39
1.7.6. Plan de Ensayos	39

2. CARACTERIZACION DEL MATERIAL _____	41
2.1. REQUISITOS ARTICULO 350 – 13 INVIAS _____	41
2.2. CARACTERIZACION FISICA DEL MATERIAL _____	44
2.2.1. Control Caracterización Física del Material _____	44
2.3. RECEBO COMUN _____	45
<i>Para el recebo común que fue utilizado para la elaboración del proyecto, se realizaron los siguientes ensayos: _____</i>	
2.3.1. Limite líquido de los suelos. Norma INV E – 125 – 13 _____	45
2.3.1.1. Control Limite Liquido de los Suelos _____	47
2.3.2. Limite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - Norma INV E – 126 – 13 _____	47
2.3.2.1. Control Índice de Plasticidad de los Suelos _____	48
2.3.3. Modificación del material granular _____	48
2.3.3.1. Arena de rio _____	49
2.3.3.2. Control de Modificación Realizada _____	49
2.3.4. Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos – Norma INV E – 123 – 13 51	
2.3.5. Clasificación del Material Granular _____	56
2.3.6. Determinación del Contenido Orgánico de un Suelo Mediante el Ensayo de Perdida por Ignición _____	56
2.4. POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS) _____	58
2.5. CEMENTO _____	61
3. DISEÑO DE MEZCLA DE SUELO CEMENTO _____	62
3.1. REQUISITOS ARTICULO 350 – 13 INVIAS _____	62
3.2. SUSTITUCIÓN DE PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO _____	64

3.3. RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO – NORMA INVE – 611 – 13 _____	67
3.3.1. Control Relación Humedad-Densidad de mezclas de suelo cemento _____	69
3.3.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido) _____	69
3.3.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido) _____	71
3.3.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido) _____	72
3.3.1.4. Suelo-Cemento (37,5% Poliestireno expandido) _____	72
3.3.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno expandido) _____	73
3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO- CEMENTO – NORMA INVE – 614 – 13 _____	74
3.4.1. Control Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo-Cemento _____	75
3.4.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido) _____	76
3.4.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido) _____	78
3.4.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido) _____	81
3.4.1.4. Suelo-Cemento (37,5% Poliestireno Expandido) _____	84
3.4.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno Expandido) _____	87
3.5. HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MUESTRAS COMPACTADAS DE SUELO- CEMENTO – NORMA INVE – 612 – 13 _____	91
3.5.1. Control de Humedecimiento y Secado de Muestras Compactadas de Suelo- Cemento 92	
3.5.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido) _____	94
3.5.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido) _____	95
3.5.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido) _____	96
3.5.1.4. Suelo Cemento (37,5% Poliestireno Expandido) _____	98
3.5.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno Expandido) _____	98
4. ANALISIS DE RESULTADOS _____	101
5. CONCLUSIONES _____	105

LISTAS DE TABLAS

<i>Tabla 1: Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento.</i>	20
<i>Tabla 2: Normas y especificaciones utilizadas para la elaboración del proyecto.</i>	35
<i>Tabla 3: Número de ensayos y repetitividad, elaborados durante la ejecución del proyecto.</i>	39
<i>Tabla 4: Número de briquetas elaboradas durante el proyecto.</i>	40
<i>Tabla 5: Requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento.</i>	42
<i>Tabla 6: Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento.</i>	43
<i>Tabla 7: Propiedades Arena de Rio.</i>	49
<i>Tabla 8: Tamices para el Análisis Granulométrico del Recebo Común.</i>	52
<i>Tabla 9: Resultados del Contenido de Material Orgánico.</i>	57
<i>Tabla 10: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos Granulometría, Límites de Atterberg y Contenido Material Orgánico.</i>	58
<i>Tabla 11: Propiedades Poliestireno Expandido.</i>	59
<i>Tabla 12: Tamices para el Análisis Granulométrico del Poliestireno Expandido.</i>	60
<i>Tabla 13 Resistencia a la Compresión.</i>	61
<i>Tabla 14: Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento.</i>	62
<i>Tabla 15: Nomenclatura.</i>	63
<i>Tabla 16: Clasificación de los suelos según AASHTO.</i>	63
<i>Tabla 17: Contenido de Cemento Aproximado para Proyectar las Mezclas de Suelo-Cemento.</i>	68
<i>Tabla 18: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Proctor (Relación Humedad y Densidad).</i>	74
<i>Tabla 19: Contenidos Óptimos de Humedad y Cemento para el Total de Sustituciones de Poliestireno Expandido.</i>	90
<i>Tabla 20: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Resistencia a la Compresión.</i>	91
<i>Tabla 21: Valores Máximos Variación Volumétrica y Perdidas de Mezcla Compactada.</i>	100
<i>Tabla 22: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Durabilidad.</i>	100

LISTAS DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1: Canteras para Extracción del Material.</i>	44
<i>Ilustración 2: Registro Fotográfico Ensayo Limite Líquido.</i>	46
<i>Ilustración 3: Curva de Fluides – Limite Líquido. Prueba No. 1. – Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.</i>	46
<i>Ilustración 4: Curva de Fluides – Limite Líquido. Prueba No. 2.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.</i>	47
<i>Ilustración 5: Curva de Fluides – Limite Líquido. Prueba No. 3.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.</i>	50
<i>Ilustración 6: Curva de Fluides – Limite Líquido. Prueba No. 4.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.</i>	50
<i>Ilustración 7: Registro Fotográfico Ensayo Granulometría – Desarrollo Propio.</i>	51
<i>Ilustración 8: Curva Granulométrica Material Granular. Prueba No. 5.</i>	53
<i>Ilustración 9: Curva Granulométrica Material Granular. Prueba No. 6.</i>	53
<i>Ilustración 10: Curva Granulométrica Material Granular.</i>	54
<i>Ilustración 11: Curva Granulométrica Material Granular.</i>	55
<i>Ilustración 12: Curva Granulométrica Material Granular.</i>	55
<i>Ilustración 13: Curva Granulométrica Material Granular.</i>	56
<i>Ilustración 15: Registro Fotográfico Ensayo Contenido Material Orgánico – Desarrollo Propio.</i>	57
<i>Ilustración 14: Curva Granulométrica Poliestireno Expandido. Prueba No. 7.</i>	60
<i>Ilustración 16. Equivalencia de Material Granular sustituido por Poliestireno Expandido.</i>	66
<i>Ilustración 17: Relación Humedad-Densidad Mezclas de Suelo-Cemento – Desarrollo Propio.</i>	68
<i>Ilustración 18: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 0% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 8.</i>	70

<i>Ilustración 19: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 0% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 9.</i>	70
<i>Ilustración 20: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 12,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 10.</i>	71
<i>Ilustración 21: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 12,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 11.</i>	71
<i>Ilustración 22: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 25% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 12.</i>	72
<i>Ilustración 23: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 37,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 13.</i>	73
<i>Ilustración 24: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 50% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 14.</i>	73
<i>Ilustración 25: Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo-Cemento – Desarrollo Propio.</i>	75
<i>Ilustración 26: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.</i>	76
<i>Ilustración 27: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.</i>	77
<i>Ilustración 28: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.</i>	77
<i>Ilustración 29: Proyección Contenido de Cemento, 0% Poliestireno Expandido.</i>	78
<i>Ilustración 30: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.</i>	79
<i>Ilustración 31: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.</i>	79
<i>Ilustración 32: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.</i>	80
<i>Ilustración 33: Proyección Contenido de Cemento, 12,5% Poliestireno Expandido.</i>	81
<i>Ilustración 34: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.</i>	82

<i>Ilustración 35: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%. _____</i>	82
<i>Ilustración 36: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%. _____</i>	83
<i>Ilustración 37: Proyección Contenido de Cemento, 25% Poliestireno Expandido. _____</i>	84
<i>Ilustración 38: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%. _____</i>	85
<i>Ilustración 39: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%. _____</i>	85
<i>Ilustración 40: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%. _____</i>	86
<i>Ilustración 41: Proyección Contenido de Cemento, 37,5% Poliestireno Expandido. _____</i>	87
<i>Ilustración 42: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%. _____</i>	88
<i>Ilustración 43: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%. _____</i>	88
<i>Ilustración 44: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%. _____</i>	89
<i>Ilustración 45: Proyección Contenido de Cemento, 50% Poliestireno Expandido. _____</i>	90
<i>Ilustración 46: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Proceso de Cámara Húmeda _____</i>	92
<i>Ilustración 47: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Ciclos de curado y Exposición a Temperatura – Desarrollo Propio. _____</i>	93
<i>Ilustración 48: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Raspado de Briquetas – Desarrollo Propio. _____</i>	94
<i>Ilustración 49: Variación Volumétrica y de Humedad, 0% Poliestireno Expandido. _____</i>	95
<i>Ilustración 50: Variación Volumétrica y de Humedad, 12,5% Poliestireno Expandido. _</i>	96
<i>Ilustración 51: Variación Volumétrica y de Humedad, 25% Poliestireno Expandido. ____</i>	97
<i>Ilustración 52: Variación Volumétrica y de Humedad - Repetibilidad, 25% Poliestireno Expandido. _____</i>	97
<i>Ilustración 53: Variación Volumétrica y de Humedad, 37,5% Poliestireno Expandido. _</i>	98

<i>Ilustración 54: Variación Volumétrica y de Humedad, 37,5% Poliestireno Expandido.</i>	<i>_ 99</i>
<i>Ilustración 55: Humedad Óptima Vs. Contenido de Poliestireno.</i>	<i>_____ 101</i>
<i>Ilustración 56: Densidad Máxima Vs. Contenido de Poliestireno.</i>	<i>_____ 102</i>
<i>Ilustración 57: Contenido de Cemento Vs. Contenido de Poliestireno.</i>	<i>_____ 103</i>
<i>Ilustración 58: Valores Máximos Variación Volumétrica y Perdidas de Mezcla Compactada.</i>	<i>_____ 104</i>

INTRODUCCION

Actualmente en Colombia la utilización de poliestireno expandido en obras de infraestructura de transporte es muy baja, aunque se han presentado varios avances en el área de pavimentos y en su utilización como material de cimentación y relleno en carreteras, es poco el aprovechamiento que se le da a este material.

Para la estabilización de suelos con cemento se está empezando a incursionar en la implementación de materiales alternativos, que permitan además de cumplir con los requerimientos para un desarrollo óptimo de los proyectos, una mitigación en el impacto ambiental que se presenta actualmente.

Más exactamente en la ciudad de Bogotá, el aprovechamiento de materiales alternativos es un tema que no tiene gran trascendencia, y al contrario la cantidad de material que tiene que ser desecho en los botaderos es bastante alta. Para el caso específico del poliestireno expandido se presenta la problemática de que sus desechos son reducidos y reutilizados mas no se realiza un adecuado reciclaje de los mismos, provocando que grandes volúmenes del material sean desechados generando un impacto ambiental negativo.

El presente proyecto tiene como propósito evaluar el comportamiento de un suelo estabilizado con cemento implementando poliestireno expandido dentro de una fracción del material granular de la mezcla de suelo-cemento. Para esto se tiene en cuenta los parámetros y el diseño dado en el Artículo 350-13 del INVIAS. En una primera etapa de experimentación se caracteriza el material a utilizar definiendo el tipo de suelo trabajado. A partir de esto se elaboran 48 briquetas, de las que se obtiene el contenido óptimo de humedad, densidad máxima y contenido óptimo de cemento para cumplir con la resistencia requerida en la mezcla de suelo-cemento. Tomando los resultados anteriores se diseñaron 12 probetas, donde finalmente mide la durabilidad de la mezcla de suelo-cemento. De acuerdo a los resultados anteriormente analizados se evalúa la viabilidad del poliestireno expandido como material alternativo para las mezclas de suelo-cemento.

1. GENERALIDADES

1.1. TITULO DEL PROYECTO

COMPORTAMIENTO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON CEMENTO SUSTITUYENDO PARTICULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA FRACCION FINA DEL AGREGADO (TAMIZ # 10 Y # 20).

1.2. LINEA DE INVESTIGACION

Innovación y desarrollo tecnológico.

1.3. DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.3.1. Planteamiento del Problema

El poliestireno expandido actualmente presenta un problema ambiental en la ciudad de Bogotá de gran importancia, en primer lugar el poliestireno es un material que no se degrada luego del paso de miles de años o puede llegar a no degradarse; en el ciclo común que tiene el manejo de los desechos de reducir, reciclar y reutilizar (las 3 R), este tipo de material logra ser reducido y reutilizado, pero la gran falencia se presenta en el reciclaje del mismo. El motivo del bajo reciclaje de este material es la mínima rentabilidad generada y la baja compra del mismo, ya que de las empresas registradas para la compra de material reciclable solo el 0.1% adquieren poliestireno. (SoyECOLombiano)

Los residuos de poliestireno que deben ser llevados a los rellenos sanitarios ocupan un espacio bastante significativo, ya que el volumen equivalente a una tonelada de poliestireno es el mismo para 100 toneladas de otro tipo de materiales, por tanto el espacio ocupado por este material es bastante alto y la cantidad del mismo no se hace significativa. (Junca, 2014)

Con este proyecto se buscó identificar la viabilidad del uso del poliestireno expandido en un suelo estabilizado con cemento, cumpliendo con los requerimientos encontrados en el artículo 350 del INVIAS 2013, analizando las principales propiedades de la mezcla, su comportamiento y determinando el nivel de optimización y viabilidad que tendría su utilización en una estructura de pavimento. Al mismo tiempo, se buscó proporcionar un nuevo material alternativo para las mezclas de suelo-cemento.

La utilización del poliestireno en mezclas de suelo-cemento, busca generar un impacto ambiental positivo, proporcionando una nueva forma de reutilización del material, y a la vez reduciendo el uso de los rellenos sanitarios para su depósito.

1.3.2. Formulación del Problema

¿Es factible el uso de poliestireno expandido para la producción de bases estabilizadas con cemento, que cumplan con el artículo 350-13 del instituto nacional de vías (INVIAS)?

1.4. JUSTIFICACION

La presente investigación tenía como propósito la generación de materiales alternativos para su utilización en bases estabilizadas, que contribuyan con la disminución del impacto ambiental que se genera actualmente por la producción de desperdicios de materiales de baja o nula degradación.

Este proyecto de estabilización de suelos se dirigió directamente a la ciudad de Bogotá D.C., teniendo en cuenta que las propiedades de los suelos en la ciudad no son ideales para obras de infraestructura, lo cual lleva a que se implemente nuevos materiales alternativos para las bases estabilizadas. El proyecto planteó la utilización poliestireno expandido como nuevo material, con el objetivo de mitigar el impacto generado por la generación de desechos que no están siendo reciclados actualmente. El poliestireno es un material que aplica al ciclo de desechos que permite su reducción y reutilización, sin embargo el proceso de reciclaje no se está llevando a cabo para este material, ya que la rentabilidad generada es muy baja. Esto genera la producción de grandes cantidades de desperdicio que deben ser llevados a los rellenos sanitarios, que para el caso del poliestireno, genera un gran volumen del material.

La utilización del poliestireno para bases estabilizadas permite el reciclaje de este material, mitigando el daño ambiental generado y el volumen de material de desperdicio producido en dichos rellenos.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

- Evaluar el comportamiento de una mezcla de suelo-cemento sustituyendo poliestireno expandido en el agregado fino, de acuerdo a las especificaciones encontradas en el artículo 350 del INVIAS del año 2013.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Elaborar un suelo estabilizado con cemento, sustituyendo partículas de poliestireno expandido en una fracción del material granular correspondiente al 10% del mismo, a partir del artículo 350 - 2013 del INVIAS, para la elaboración de un suelo-cemento.
- Evaluar las características mecánicas de un suelo estabilizado con cemento, mezclado con poliestireno expandido, definiendo la humedad óptima y densidad máxima a utilizar en la estabilización del suelo-cemento, teniendo en cuenta la norma de ensayo INV E - 611 – 13 correspondiente a la relación humedad-densidad de mezclas de suelo cemento.
- Identificar cómo se afecta la estabilidad volumétrica y la durabilidad de un suelo-cemento mezclado con poliestireno expandido reciclado, con base en la norma de ensayo INV E - 612 – 13, correspondiente al humedecimiento y secado de muestras compactadas de suelo-cemento.
- Determinar la resistencia a la compresión de un suelo-cemento mezclado con poliestireno expandido, a partir de la norma de ensayo INV E - 614 – 13

correspondiente a la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.

- Demostrar la viabilidad del uso de poliestireno expandido reciclado en mezclas de suelo-cemento.

1.6. DELIMITACION DEL PROYECTO

Para la ejecución del proyecto se tuvieron en cuenta las especificaciones generales para la construcción de carreteras INVIAS 2013, siguiendo el artículo 350 para suelo-cemento. Se presentan las siguientes condiciones en los materiales requeridos, para un desarrollo óptimo del mismo:

- El material a estabilizar con cemento portland podrá provenir de la escarificación de la capa superficial existente, o ser un suelo natural proveniente de excavaciones, o agregados locales de baja calidad, o una mezcla de los mismo. Cuando este se encuentre combinado, deberá estar libre de toda materia orgánica o sustancia que pueda alterar el fraguado del cemento.
- Se define como clase de suelo-cemento a trabajar la SC-R, teniendo como criterios de diseño de la mezcla la durabilidad y resistencia de la misma.
- El contenido de cemento mínimo en ningún caso será menor al 3% de la masa seca del material por estabilizar.
- El material granular, además, debe cumplir con los siguientes requisitos: el porcentaje máximo de límite líquido corresponde a un 35%, el porcentaje máximo de límite plástico corresponde a un 15% y el porcentaje máximo de sulfatos del material combinado corresponde a un 1.0%.

- La granulometría del material deberá ajustarse a los límites señalados a continuación:

Tabla 1: Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento.

Tamiz		Porcentaje que Pasa
Normal	Alternativo	
4.75 mm	No. 4	40-80%
75 µm	No. 200	2-35%

Fuente: Artículo INVIAS INV E-350-2013.

- El cemento para estabilización deberá ser cemento portland tipo 1. Si por algún motivo el cemento ha fraguado parcialmente o contiene terrones del producto endurecido, no podrá ser utilizado.
- El agua utilizada para la estabilización deberá ser limpia y libre de materia orgánica, su pH deberá estar dentro de un rango de 5.5 y 8, y su contenido de sulfatos no debe superar el valor de 1 g/L. Si el agua reconocida como potable, cumple con dichas características.
- Para el diseño de la mezcla se deberá diseñar mediante los ensayos de resistencia a la compresión (INV E-614-2013) y humedecimiento y secado (INV E-612-2013). La resistencia a la compresión mínima debe ser de 2.1 MPa. luego de siete días de curado húmedo. Respecto al ensayo de humedecimiento y secado la pérdida de masa de la mezcla compactada no deberá superar el 14%.
- Para el desarrollo de los ensayos se debe tener en cuenta la disponibilidad de los laboratorios de la Universidad de la Salle, del espacio y el equipo encontrados allí mismo.

1.6.1. Sustitución del Material

Para la sustitución del poliestireno expandido en la fracción de suelo correspondiente al 10% (material pasante en tamiz No. 10 y retenido en tamiz No. 20), se propondrán las sustituciones del 12.5%, 25%, 37.5% y 50% dentro del mismo. Se adopta como máximo porcentaje de sustitución el 50% ya que desde este punto el volumen de icopor se hace muy elevado.

1.7. MARCO REFERENCIAL

1.7.1. Antecedentes Teóricos

Para el estudio de antecedentes sobre la utilización de poliestireno expandido en la estabilización y mejoramiento de suelos, los resultados fueron muy pocos, el uso de este tipo de material se da manera significativa para la modificación de mezclas asfálticas, mas no se encontraron registros de su utilización en el mejoramiento de material granular.

En mezclas asfálticas la **Universidad de la Salle** muestra un estudio de caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada, donde se presenta el análisis experimental de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. La importancia de dicho trabajo se centra en la incorporación de desechos no biodegradables, que generan un alto grado de contaminación, en materiales asfálticos utilizados para la infraestructura vial. Para dicha investigación se trabajó con un asfalto blando, producido en la planta de Ecopetrol de Barrancabermeja, Colombia. Se emplearon dos modificadores: poliestireno y llanta triturada, como producto de los residuos industriales. La modificación se realizó por vía húmeda para lograr una mejor integración de la mezcla. Posteriormente se analizaron las propiedades físicas del asfalto modificado y se compararon sus resultados con un asfalto convencional.

Los resultados obtenidos luego de la inspección visual y teniendo en cuenta la tendencia de los ensayos, se evidencio una mejor incorporación del grano de caucho reciclado y el poliestireno durante los procedimientos de mezclado, obteniendo un cemento asfáltico modificado de mayor homogeneidad. El cemento asfáltico modificado solo con poliestireno presento una mayor consistencia respecto al ligante convencional, ya que mostro una reducción en la penetración de las muestras modificadas.

El ligante modificado con poliestireno revelo una rigidización en comparación con el asfalto convencional, evidenciado en la disminución de la ductilidad para el cemento asfáltico modificado.

El ligante asfáltico modificado con poliestireno y llanta triturada comparado con el cemento asfáltico convencional muestra mayores registros de punto de ablandamiento, los cuales se incrementan de manera proporcional al contenido de los modificadores.

Las viscosidades de los asfaltos modificados con los dos polímeros son mucho mayores que la del ligante sin modificar, estas se incrementaron en cuanto mayor contenido de llanta triturada se hizo parte de la modificación. Esto se debió a que los modificadores cambian las propiedades del material original, tanto por la incorporación de estos, como por las altas temperaturas a las que es sometido el asfalto original en el proceso de modificación. (Figuroa Infante & Reyes Lizcano, 2007)

La **Asociación Nacional de Poliestireno Expandido (ANAPE)** en España caracteriza este material como ligero de cimentación idóneo para el sector de la ingeniería civil. A sus condiciones como aislante se le suman otras cualidades como su estabilidad, resistencia mecánica y cohesión, que permite la construcción de estructuras de elevada resistencia vertical y horizontal.

A pesar de su bajo peso, la singular estructura de este material aporta los beneficios de una resistencia excepcional a la compresión sin que se pierdan prestaciones con la humedad. Este hecho lo convierte en un material idóneo como relleno de base

estructural en carreteras, ferrocarriles, puentes, y en toda estructura que pueda generar un asentamiento o pérdida de estabilidad.

El poliestireno expandido como material de cementación es de gran utilidad en la construcción de pantallas acústicas, construcción de estructuras de bajo asentamiento y deformación, prevención de cargas laterales, ausencia de daños por heladas o drenajes.

Algo más enfocados en construcción de carreteras, la ANAPE muestra que el poliestireno tiene usos en la cementación de carreteras, en la ampliación de carreteras, en rellenos de estribos de puentes, en la construcción de carreteras de montaña en la protección frente a heladas e implementación para la reducción de vibraciones. (ANAPE, 2011)

Estudios llevados a cabo en la **Universidad de Medellín** muestran la posibilidad de utilizar residuos de caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, que podrían utilizarse como sustituto de agregado grueso en bases, sub-bases y llenos estructurales. Para este propósito se investigan los principales cambios en las propiedades mecánicas en la mezcla suelo-caucho, tales como el peso unitario máximo, la capacidad de soporte (C.B.R.), y resistencia al esfuerzo cortante. Las conclusiones primarias conducen a una posible utilización de la mezcla base-caucho como materiales de sub-base granular y en general en cualquier tipo de estructura de tierra con pocos requerimientos técnicos, para llenos estructurales la mezcla arenilla-caucho puede ser utilizada como material de relleno en muros de contención y otras estructuras de tierra mediante un apropiado diseño geotécnico.

Como conclusiones del proyecto, se obtuvo que aunque el material de caucho con el que se realizaron los ensayos no presentaba ninguna clase de refuerzo de acero, esto no significa que los resultados arrojados se deban limitar a este tipo de material, puesto que la gravedad específica del caucho, es similar a las encontradas en investigaciones anteriores donde el caucho si incluía acero.

Los valores obtenidos de C.B.R. en las muestras sumergidas son muy bajos para que se pueda pensar en una implementación de caucho dentro de la estructura de un

pavimento flexible, ya que dichos valores no alcanzan a la mitad del valor mínimo estimado.

Para llenos estructurales los parámetros obtenidos pueden ser utilizados en los diseños convencionales para muros de contención y análisis de estabilidad, pero son beneficios por el menor peso unitario en las estructuras pero manteniendo unas resistencias al corte bastante adecuadas. (Giraldo Ruiz & Suarez Gamarra, 2004).

La **Universidad de La Salle**, realizo un estudio sobre el aprovechamiento del caucho de las llantas, implementándolo como material alternativo para la estabilización con cemento. Siendo este material poco aprovechado y reutilizado al terminar su vida útil, el cual es depositado en los rellenos sanitario generando una acumulación de material.

Este estudio tiene como objetivo aprovechar el caucho de las llantas vehiculares en bases estabilizadas con cemento, para ello tuvieron que triturar el caucho de las llantas por medio de una empresa de reciclaje “Mundo Limpio”, encargada de recolectar y reciclar este material. Las partículas de caucho tienen un tamaño de 0.6 mm y 2.3 mm, las cuales son utilizadas para adicionar porcentajes de caucho de 5%, 25% y 50% en la base estabilizada con cemento según su peso. Este material modificado se le realiza diferentes ensayos de laboratorio para determinar la resistencia a la compresión y durabilidad al humedecimiento y secado según lo requiere el Art. 341 – 07 del INVIAS.

Los resultados obtenidos en los ensayos realizados para la resistencia a la compresión fueron los siguientes: para el material modificado con el 5% de caucho alcanza una resistencia del 2.1 MPa con un porcentaje de cemento de 13%; para el material de 25% de caucho se obtuvo la misma resistencia pero con un porcentaje de cemento del 20%; pero para el material con el 50% de caucho no se pudo realizar por la gran cantidad de material que se adiciona. Mientras que en los ensayos de durabilidad se obtuvieron resultados positivos para el material del 5% de caucho, con un porcentaje de pérdidas del 9.13% cumpliendo con la especificación,

pero para la muestra del 25% de caucho presenta un pérdidas del 19.03% pasando el límite del 14% permitido para bases estabilizadas suelo cemento.

Como conclusiones del estudio realizado, se deduce que la humedad óptima de compactación no presenta alteración por la adición de caucho, con un rango de diferencia de 2% en cada uno de los materiales. La cantidad del cemento utilizado para los ensayos de resistencia, presentan resultados directamente proporcionales al contenido de caucho. Como recomendación, sugiere la utilización del material, adicionándole el 5% de caucho triturado, debido que es el porcentaje donde menos se presenta cambios de las propiedades físico mecánicas del suelo natural, cumpliendo con los requisitos de la especificación de suelo cemento para una base estabilizante.

1.7.2. Marco Teórico

Hoy en día, el país asume un nuevo reto con la cuarta generación de concesiones de carreteras, el cual busca aumentar la competitividad del mismo que se ve afectada por la deficiencia en la calidad de la infraestructura de transporte, ya que el estado actual de las vías en nuestro país, así como su pobre crecimiento, afecta de manera significativa la economía de nuestro país, incrementando el costo de transporte de insumos, productos y servicios.. El objetivo del gobierno es aumentar la inversión en infraestructura de transporte la cual solo correspondía al 1% del PIB. Este nuevo reto tiene como objetivo la construcción de 8170 kilómetros de doble calzada a lo largo de Colombia. (Andrade Moreno , 2012)

La ciudad presenta características geológicas muy particulares, ya que los agregados naturales que encontramos en la mayoría de zonas de la misma, presenta deficiencias ante sollicitaciones de capacidad portante, resistencia bajo la acción de cargas, y durabilidad ante el intemperismo y fuerzas actuantes dentro de una estructura. Para estos casos actualmente se dispone de diferentes metodologías en busca de generar un tratamiento de los suelos que permita aumentar en los mismos los parámetros mecánicos anteriormente mencionados.

En la actualidad una de las metodologías para la estabilización y mejoramiento de suelos más utilizada es la aplicación de materiales cementantes en la construcción de capas granulares y estabilización de todo tipo de suelos dentro de las estructuras granulares compactadas, demostrando grandes ventajas relacionadas principalmente con el incremento de sus propiedades mecánicas y la reducida susceptibilidad a condiciones climáticas adversas. (Holcim, 2014)

Dichas metodologías a la vez han permitido un mejor aprovechamiento de materiales disponibles en el entorno, lo cual genera un equilibrio entre los procesos de explotación y el medio ambiente. El poliestireno expandido (icopor®) es el material utilizado dentro de la investigación; para poder determinar que propiedades varían en una base estabilizada con suelo-cemento, sustituyendo en diferentes porcentajes una fracción de la granulometría convencional por poliestireno.

La selección de poliestireno expandido se hizo basados el aprovechamiento de dicho material en nuestra ciudad. Encontramos que el reciclaje de poliestireno en Bogotá es prácticamente nulo, ya que la rentabilidad generada luego de este proceso era muy baja, por lo tanto no es un material que se reutilice. Al mismo tiempo, su baja reutilización genera un exceso de este material en los botaderos de la ciudad, ocupando grandes volúmenes de espacio, que no se recuperara, ya que este material tarda millones de años en degradarse o llega a no tener ningún tipo de degradación.

Con la realización de este proyecto, se buscó involucrar un nuevo material dentro de la elaboración de una mezcla suelo-cemento que cumpla con las especificaciones encontradas en el artículo 350 INVIAS del 2013 para la construcción de carreteras.

A continuación se indica la geología de la ciudad de Bogotá y las normas de ensayo dadas por las especificaciones del INVIAS 2013 para la elaboración de la investigación:

Geología de la Ciudad de Bogotá

Para la elaboración del trabajo se muestra a continuación la geología de la capital colombiana, identificando los suelos que se encuentran en diversas zonas de la ciudad,

demostrando las bajas propiedades mecánicas de los mismos y justificando la elaboración de nuestra investigación para Bogotá.

De acuerdo al estudio de microzonificación sísmica adoptado para la ciudad de Bogotá mediante el decreto 523 del 2010, de conformidad con el reglamento técnico de construcción sismo resistente del mismo año, se identifican las formaciones que conforman la ciudad de Bogotá.

Hacia el oriente de la ciudad, en los cerros de suba y en algunos sectores del sur aparece uno de los grupos de formaciones rocosas más antiguos, el grupo Guadalupe. Este grupo fue depositado hace aproximadamente 69 millones de años en el periodo cretáceo superior cuando se aumentó la depositación de areniscas. Las formaciones geológicas encontradas en esta zona corresponden a areniscas duras en sectores de alta pendiente y arcillolitas blandas en sectores de moderada pendiente.

Las areniscas duras están compuestas por rocas competentes y resistentes a la meteorización, presentan problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto principalmente cuando están fracturas. Las arcillolitas blandas están compuestas por rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, presentando también problemas de estabilidad en excavaciones a cielo abierto. En esta zona podemos obtener arena de peña utilizada para la construcción.

En la zona del piedemonte al oriente de la ciudad, en los cerros de suba, en sectores del sur y suroccidente de la ciudad se presentan coluviones y complejos de cono aluviales, encontrando gravas arcillo-arenosas compactadas y gravas areno-arcillosas compactadas, siendo suelos de alta capacidad portante pero presentando problemas en excavaciones a cielo abierto. El material allí encontrado es apto para la fabricación de productos comerciales como ladrillos y tejas.

En la zona norte de la ciudad predomina la existencia de suelos lacustres muy blandos, compuestos por arcillas limosas muy blandas, Se presentan suelos de muy baja a mediana capacidad portante, muy compresibles.

En la zona central de la ciudad arcillas encontramos suelos lacustres blandos y suelos lacustres aluviales, compuestos por arcillas limosas blandas y arcillas arenosas. Se presentan suelos de muy baja a mediana capacidad portante, muy compresibles.

En la zona sur de la ciudad encontramos suelos aluviales gruesos a medios, compuestos por arenas arcillosas sueltas a compactadas. Se presentan suelos de mediana a alta capacidad portante, poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto.

Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías

En el proyecto se tuvo como referencia el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías, el cual permitió conocer los procedimientos de muestra y ensayos a realizar en el laboratorio. Se trabajó con las Normas y Especificaciones del INVIAS 2013. A continuación se describe el artículo de referencia para la realización del proyecto y cada uno de los ensayos más relevantes a realizar:

Suelo-Cemento (ARTICULO 350 – 13)

Este trabajo consiste en la construcción de una capa estructural de pavimento, constituida por una mezcla uniforme de suelos o agregados (material adicionado totalmente o resultante de la escarificación de la capa superficial existente, o una mezcla de ambos), cemento hidráulico, agua y eventualmente aditivos. Se describen dos clases de suelo-cemento en función de los criterios para el diseño de la mezcla (durabilidad y resistencia). El material para estabilizar con cemento hidráulico deberá cumplir con requerimientos de composición, limpieza, características químicas, así como con requerimientos granulométricos especificados en el artículo.

Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos (INV E – 123 – 13)

Este ensayo permite obtener una distribución de partículas de la muestra de agregados finos y gruesos según su tamaño, por medio de tamices de aberturas cuadradas. Para realizar el ensayo se debe escoger un grupo de tamices adecuados para suministrar la información requerida en caracterizar el material.

Determinación de Limite Líquido de los Suelos (INV E – 125 – 13)

Este ensayo permite determinar el porcentaje de humedad cuando éste se halla en el límite líquido y el límite plástico; para realizar este ensayo se requiere una muestra de 150 a 200 g que pase el tamiz N° 40 (0.425 mm). Esta muestra se debe mezclar con agua destilada aproximadamente de 15 a 20 ml, amasando de forma cuidadosa tal que el agua se adhiera a cada partícula de la muestra, agregándole de 1 a 3 ml hasta conseguir una pasta uniforme, esta pasta se coloca en el la cazuela de bronce, haciendo una división tal que pase por el centro del diámetro de la cazuela, con el fin que se vea una separación entre cada uno de los lados, para conseguir en que cada uno de los lados fluya hasta que estén en contacto a medida de los golpes que reciba la cazuela de bronce. Para obtener el porcentaje de humedad se toma cierta cantidad de pasta utilizada en la cazuela de bronce, el cual se pesa y se anota; se coloca en el horno aproximadamente durante 24 horas o hasta tener una masa constante, se pesa nuevamente para tener peso seco.

Limite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos (INV E – 126 – 13)

El índice de plasticidad es el tamaño del intervalo del contenido de agua, en el cual el suelo se encuentra en estado plástico. Hay que tener en cuenta que para el cálculo del índice de plasticidad se debe calcular el límite líquido y el límite plástico, ya que el índice es la diferencia entre estos dos límites. Se toma 15 g de la porción de muestra húmeda utilizada en la cazuela de bronce, el cual se deben tomar en el proceso que se pueda amasar, formando una esfera que no se pegue a los dedos. De los 15 g de muestra húmeda se toma de 1.5 g a 2.0 g, se deben formar rollos de masa cilíndrica con un diámetro de 3.2 mm

(1/8") con rotaciones de 80 a 90 veces por minuto, siendo una rotación un movimiento de la mano hacia adelante y hacia atrás. Cuando ya se tenga un diámetro de 3,2 mm (1/8"), se divide el rollo entre 6 a 8 pedazos; se toman todos los pedazos para volverlos amasar formando una masa uniforme, enrollando nuevamente para obtener un diámetro de 3,2 mm (1/8") hasta que la muestra se empiece a desmoronarse y agrietarse, esto se presenta cuando llega a su estado plástico, el cual se procede a hallar el porcentaje de humedad.

Relaciones Humedad-Densidad de Mezclas de Suelo Cemento (INV E – 611 – 13)

La relación entre húmeda-densidad de mezclas de suelo cemento es cuando se realiza la compactación antes de realizar la hidratación. Para este ensayo se toma el material que se va estabilizar el cual deben pasar por el tamiz No 4 (0.425 mm), tomando una muestra representativa de 2.5 kg. De acuerdo con el diseño establecido, se le agrega al suelo la cantidad de cemento correspondiente, hasta obtener un color uniforme. Se forma un espécimen compactado en el molde de collar ajustado, con la mezcla suelo cemento se realiza tres capas compactadas, cada una de 130 mm de profundidad, el cual es compactado con 25 golpes distribuidos en cada una de las capas. Se extrae del molde la probeta, se corta verticalmente con respecto al eje principal, tomando una muestra no menor a 100 g para determinar el porcentaje de humedad.

Humedecimiento y Secado de Mezclas Compactadas de Suelo-Cemento (INV E – 612 – 13)

El ensayo permite determinar las pérdidas del suelo-cemento a los cambios de humedad y de volumen (expansión y contracción). Al realizar este ensayo, se debe realizar la muestra suelo-cemento según el diseño acordado, el cual deben presentar un color uniforme. Luego se le agrega agua potable para tener un contenido óptimo de humedad en el momento de la compactación, el cual debe se debe compactar en el molde (con el collar ajustado); al momento de ser compactado se toma una porción de muestra representativa no menor a 100 g, se toma la masa inmediatamente y se coloca en el horno a 110 °C por lo menos durante 12 horas, para luego calcular el porcentaje de humedad. Se extrae el espécimen del molde

para calcular el volumen y así colocarlo en la cámara de húmeda durante 7 días. Luego de este periodo de almacenamiento, se sumerge el espécimen en agua potable durante 5 horas, habiendo cumplido este periodo, se colocan en el horno a 71 ° C durante 42 horas, determinar la masa del espécimen; y mediante un cepillo de alambre se pasa sobre la superficie paralela a los bordes, el cual se requieren de 18 a 20 pasadas verticales. Este procedimiento se debe realizar durante 12 ciclos, para luego secar el espécimen hasta tener una masa contante a 110 ° C, tomando la masa seca al horno.

Preparación y Curado de Probetas de Suelo-Cemento para Pruebas de Compresión y Flexión en el Laboratorio (INV E – 613 – 13)

Mediante este ensayo se determina el procedimiento adecuado para moldear y curar probetas de suelo-cemento mediante pruebas de compresión y flexión. Para el proyecto solamente se realizara la prueba de compresión.

La prueba de compresión se realiza mediante molde de forma cilíndrica, el cual se deben aplicar aceite comercial en el interior del molde. Se deposita en el molde una masa respectiva de la mezcla suelo-cemento, compactándolo de una forma distribuida con una varilla compactadora hasta obtener una altura aproximadamente de 150 mm, teniendo cuidado en no dejar vacíos en la mezcla. Se coloca el pistón superior en posición y se aplica una carga con una máquina de compresión, hasta tener una altura de 142 mm. Estas probetas se curan dentro de los moldes en la cámara de húmeda durante 12 horas o más, para poder extraer las probetas compactadas. Se introducen nuevamente en la cámara de húmeda para así luego poderlas ser ensayados a compresión.

Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo-Cemento (INV E – 614 – 13)

En este ensayo se determina la resistencia a la compresión del suelo-cemento mediante cilindros moldeados. Se coloca las probetas en la plataforma de la máquina de ensayo,

alineando del eje vertical de la probeta con el centro de empuje del bloque asentado. Se aplica la carga hasta llegar a la falla de la probeta, anotando el registro de la carga de falla.

1.7.3. Marco Conceptual

Con el objetivo de conocer los conceptos necesarios para el desarrollo de la investigación, se presentan las definiciones conceptuales para el tipo de material a utilizar en el método de estabilización químico y mecánico propuesto (suelo-cemento), así mismo, se muestran las definiciones de las características evaluadas en dicho método:

Estabilización de Suelos

La estabilización de suelos consiste en la modificación de propiedades del material existente para hacerlo capaz de cumplir en mejor forma los requisitos deseados o, cuando menos, que la calidad obtenida sea la adecuada. Las propiedades de un suelo pueden ser alteradas mediante estabilización por medios mecánicos, siendo la compactación del suelo y la mezcla de suelos los más conocidos; estabilización por drenaje; estabilización por calor y calcinación; y estabilización por medios químicos, lograda con la adición de agentes estabilizantes tales como el cemento y la cal. (Montejo Fonseca, 2002)

Estabilización de Suelos con Cemento

Consiste en el mejoramiento de las propiedades del suelo a base de mezclarles proporciones de cemento tipo Portland. La estabilización de suelo con cemento consta de varias etapas:

- 1.** La acción de la naturaleza fibrosa del silicato de calcio cuando los granos del cemento entran en contacto con el agua.
- 2.** Se forman masas de fibras que se traban fuertemente unas con otras y con otros cuerpos.
- 3.** La mezcla entre cemento, agua y partículas del suelo, permite que los iones de calcio acumulen las partículas de suelo cargadas negativamente generando una floculación por acción de la gravedad.
- 4.** Al compactar la mezcla, produce una reacción del calcio con sílice y alúmina, produciendo compuestos de silicatos y aluminatos que aumenta la resistencia de la mezcla. (Montejo Fonseca, 2002)

Estabilidad Volumétrica

Propiedad del suelo capaz de expandirse y contraerse, originado a cambios de humedad. Si las expansiones se presentan por el aumento de humedad no se controla en alguna forma, ocasionando graves rupturas y deformaciones en el pavimento, como en cualquier obra, por esta razón es necesario detectar los suelos expansivos, su composición y debido tratamiento. Las soluciones para evitar cambios volumétricos en suelos expansivos son de introducir humedad al suelo en forma periódica, aplicar cargas que equilibren la presión de expansión y el uso de membranas impermeable. (Montejo Fonseca, 2002)

Compresibilidad

La compresibilidad es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. La compresibilidad de un suelo puede presentar variaciones importantes dependiendo de factores tales como la relación de la carga aplicada respecto a la que el suelo soportaba anteriormente y el tiempo de aplicación de la carga una vez se ha disipado la presión de poro. (Montejo Fonseca, 2002)

Resistencia

La resistencia es el esfuerzo máximo que puede soportar un material ante la aplicación de una carga de aplastamiento, su cálculo se realiza mediante la relación de la carga aplicada sobre el área transversal original en una probeta de ensayo. Generalmente esta resistencia se hace más baja en suelos con un alto contenido de humedad y una baja cohesión. (Montejo Fonseca, 2002) (INVIAS, 2013)

Durabilidad

Por medio de esta propiedad se puede determinar el comportamiento del resultado del diseño de la mezcla de suelo-cemento a diferentes condiciones, como por ejemplo el tiempo, el intemperismo, y las fuerzas externas que actúen sobre esta mezcla. Para esto, se somete la mezcla a pruebas de desgaste, establecido por la norma INV E- 612-2013.

Cemento

Es una sustancia de polvo fino, hecha de argamasa de yeso capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con el agua y que se endurece espontáneamente en contacto con el aire. El cemento es un material que une los fragmentos detríticos (arenas o gravas) de ciertas rocas clásticas (areniscas o conglomerados). El cemento alcanzando altas resistencias debido a la combinación química que presenta, principalmente entre Cal (CaO) 63% y Sílice (SiO) 20%. (Cemex, 2014)

Poliestireno Expandido (EPS)

El poliestireno expandido, conocido en Colombia con el nombre de icopor®, adquiere este nombre ya que icopor fue la primera empresa en Colombia en elaborar este producto; es un material plástico espumado, el cual consiste en un 95% de poliestireno y un 5% de un gas que forma burbujas las cuales reducen la densidad del material. Sus principales características son su ligereza, resistencia a la humedad, y capacidad de absorción de los impactos. Su aplicación principal es como aislante térmico y acústico, utilización en el aligeramiento de losas de concreto, y embalaje de productos frágiles. (ICOFORMAS, 2014)

1.7.4. Marco Normativo

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvieron en cuenta la utilización de las siguientes normas y especificaciones tomadas del instituto nacional de vías (INVIAS) del año 2013:

Tabla 2: Normas y especificaciones utilizadas para la elaboración del proyecto.

NORMA INVIAS INV – 13	NOMBRE	DESCRIPCION
102	Descripción e identificación de suelos (Procedimiento visual y manual).	Procedimiento para identificar suelos con base en el sistema unificado de clasificación de suelos. Esta clasificación se hace mediante examen visual y ensayos manuales.
106	Preparación en seco de muestras de suelo y suelo-agregado para ensayo.	Preparación en seco de muestras de suelo para análisis mecánico, pruebas físicas, relación entre humedad y densidad.
122	Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado.	Determinación en el laboratorio del contenido de agua del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado por peso.
123	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	Determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. La distribución de partículas se realiza por tamizado.
125	Determinación del límite líquido de los suelos.	Contenido de humedad cuando se halla entre los estados líquido y plástico.
126	Limite plástico e índice de plasticidad de suelos.	El limite plástico es el contenido más bajo de agua en el suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla entre los estados plástico y semisólido. El índice de plasticidad es el rango de contenido de agua dentro del cual un suelo se comporta plásticamente.

<p>Artículo 350 - 2013 – INVIAS</p>	<p>Suelo-cemento.</p>	<p>Construcción de un capa estructural de pavimento, constituida por una mezcla uniforme de suelos o agregados, cemento hidráulico, agua y aditivos, de acuerdo con las dimensiones, alineamientos, y secciones indicados en los documentos del proyecto.</p>
<p>611</p>	<p>Relación humedad-densidad de mezclas de suelo cemento.</p>	<p>Determinación de la relación entre la humedad y la densidad de mezclas suelo-cemento cuando se compactan, antes de que ocurra la hidratación del cemento.</p>
<p>612</p>	<p>Humedecimiento y secado de muestras compactadas de suelo-cemento.</p>	<p>Determinar las pérdidas, los cambios de humedad, y los cambios de volumen producidos por el humedecimiento y secado repetido de especímenes endurecidos de suelo-cemento.</p>
<p>613</p>	<p>Preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión y flexión en el laboratorio.</p>	<p>Procedimiento para moldear y curar en el laboratorio probetas de suelo-cemento, utilizadas en pruebas de compresión y flexión, bajo control de cantidad de materiales y condiciones de ensayo.</p>
<p>614</p>	<p>Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento.</p>	<p>Determinación de la resistencia a la compresión del suelo-cemento, empleando cilindros moldeados como especímenes de ensayo.</p>

Fuente: Elaboración Autores.

1.7.5. Metodología

1.7.5.1. Fase 1. Revisión Bibliográfica– Normatividad, Antecedentes y Artículos.

Lecturas de Normas y Documentos

Se realizó un reconocimiento previo de antecedentes e investigaciones sobre estabilización de suelo-cemento; donde se evidencio que la implementación de poliestireno expandido dentro de este tipo de mejoramientos es casi nula, su aplicación se da en mayor medida dentro de asfaltos modificados o como material ligero de cimentación. De igual manera se revisó cuidadosamente cada una de las normas de ensayos a proceder de acuerdo al Artículo 350 - 2013 – INVIAS con el fin garantizar un adecuado procedimiento y obtención de resultados confiables.

1.7.5.2. Fase 2. Fase Experimental

Consecución de Materiales

Los materiales que se utilizaron en el proyecto fueron recebo común obtenido a partir de las especificaciones dadas en el artículo 350-13 del INVIAS, poliestireno expandido (Icopor®) reciclado, obtenido por medio de recolección de bloques de icopor sobrante de obras de construcción, arena de rio suministrada por la universidad de La Salle, cemento Tipo I suministrado por la Universidad de la Salle. El tamaño de las partículas de poliestireno expandido utilizado es el encontrado dentro de los tamices No. 10 y No. 20, dicho tamaño es obtenido por medio de la trituración del material.

Clasificación de Materiales

Para caracterizar el material a estudiar se realizará los ensayos de límites de Atterberg de acuerdo a las normas INV E – 125 – 2013 (limite líquido) y INV E – 126 – 2013 (índice de plasticidad), teniendo en cuenta un análisis granulométrico de partículas del suelo previo

según INV E – 123 – 2013, el cual permite obtener la fracción a sustituir de partículas de poliestireno expandido dentro de la base estabilizada con suelo cemento.

Diseño de Mezcla Suelo-Cemento Sustituyendo Partículas de Poliestireno Expandido

El diseño de la base estabilizada con suelo cemento se realizó a partir del método de la PCA (suelo cemento y suelo cemento con partículas de poliestireno expandido) sustituyendo en una fracción granulométrica del suelo a estabilizar correspondiente al 10% del mismo, partículas de poliestireno expandido, seleccionando entre los porcentajes de sustitución de 12.5%, 25%, 37,5% y 50% el más óptimo teniendo, en cuenta la resistencia y deformación de los mismos, sustitución que se realizara teniendo en cuenta densidad de los materiales a sustituir. La cantidad adecuada de cemento para realizar el ensayo se tomó a partir de la Tabla de la Norma General de Dosificación de Suelo – Cemento de la PCA, reconociendo la cantidad apropiada para la compactación y elaboración de briquetas.

Posteriormente se realizó el ensayo de relación de humedad – densidad de mezclas suelo-cemento según la norma INV E - 611 - 2013 donde se obtuvo el porcentaje óptimo de agua. Se realizaron las briquetas de suelo-cemento y suelo-cemento con partículas de poliestireno expandido según la norma INV E - 614 – 2013 para su posterior colocación a curado por 7 días. Luego fueron falladas a compresión en la maquina universal según la norma INV E - 613 – 2013 “Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento”. Luego de realizar el ensayo de resistencia a la compresión, se determinó los porcentajes óptimos de cemento de la mezcla estabilizada, con relación al ensayo de durabilidad del INV E – 612 – 2013 “Humedecimiento y secado de muestras compactadas de suelo-cemento”.

1.7.5.3. Fase 3. Cálculos y Análisis de Resultados

Se caracterizó tanto física y mecánicamente la base estabilizada con suelo cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido, analizando cada uno de los resultados obtenidos de los determinados ensayos realizados, y así comprobar si cumplieron con las

especificaciones dadas en el Artículo 350 - 2013 – INVIAS, para determinar la viabilidad del uso de poliestireno expandido en la estabilización de suelo cemento.

1.7.5.4. Fase 4. Desarrollo del Documento

En esta etapa se desarrollara el documento adecuado para la entrega del trabajo según las normas APA en cada una de las fases, con los estudios concluidos y las recomendaciones convenientes.

1.7.6. Plan de Ensayos

En las siguientes tablas se establecen el número de ensayos que se realizaron para cada una de las normas establecidas en el artículo 350 del INVIAS y en función de la cantidad y el porcentaje de sustituciones de poliestireno realizadas:

Tabla 3: Número de ensayos y repetitividad, elaborados durante la ejecución del proyecto.

Porcentajes de Sustitución de Poliestireno Expandido en la Base Estabilizada de Suelo Cemento							
Normas INVIAS 2013	Nombre del Ensayo	EPS	0%	12,5%	25%	37,5%	50%
123	Granulometría	2	2	-	-	-	-
125	Índice de Plasticidad	-	2	1	1	1	1
126	Limite Liquido	-	2	1	1	1	1
611	Proctor	-	1	2	1	1	1
612	Durabilidad	-	1	1	2	1	1
613 Y 614	Preparación y Curado de Probetas, Resistencia a la Compresión Simple	-	9	9	9	12	9

Fuente: Elaboración Autores.

Así mismo se presenta un cuadro resumen con la cantidad de probetas realizadas durante el proyecto, según la norma de ensayo que requirió de la elaboración de las mismas:

Tabla 4: Número de briquetas elaboradas durante el proyecto.

Numero de Probetas a Realizar								
Norma INVIAS 2013	Nombre de Ensayo	Poliestireno	Porcentajes de Reemplazo					Total por Ensayo
			0	12,5	25	37,5	50	
123	Granulometría	–	–	–	–	–	–	
125	Índice de Plasticidad	–	–	–	–	–	–	
126	Limite Liquido	–	–	–	–	–	–	
611	Proctor	–	–	–	–	–	–	
612	Durabilidad	–	2	2	4	2	2	12
613 y 614	Preparación y Curado de Probetas, Resistencia a la Compresión Simple	–	9	9	9	12	9	48
Total de Probetas a Realizar en el Proyecto								60

Fuente: Elaboración Autores.

2. CARACTERIZACION DEL MATERIAL

Para el desarrollo de nuestro proyecto se ejecutaron los ensayos dispuestos en el Artículo 350 del INVIAS del año 2013 para suelo-cemento.

El material natural con el que se desarrolló nuestro proyecto fue proveniente de zonas de excavación, localizada en una cantera en el sector nororiental de la ciudad de Bogotá; dicho material, mediante sustituciones porcentuales de poliestireno expandido permitió la elaboración de una mezcla de suelo-cemento la cual fue sometida a los ensayos requeridos en el Artículo 350 del INVIAS. La elaboración de dicho ensayos permitió evaluar el comportamiento de la mezcla, características mecánicas de la misma, su estabilidad, durabilidad y comportamiento frente a cargas de compresión. Las anteriores pruebas se realizaron de manera tal que se permita evaluar la viabilidad de dicha mezcla en proyectos de infraestructura.

2.1. REQUISITOS ARTICULO 350 – 13 INVIAS

Los resultados que se mostraran a continuación serán verificados con las siguientes tablas dadas por la especificación del INVIAS, dicha verificación nos permite conocer si los resultados obtenidos dan cumplimiento a los requerimientos dados:

Tabla 5: Requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento.

CARACTERISTICA	ENSAYO INV - 13	GRADACION TIPO A	GRADACION TIPO B
Composición (F)			
Granulometría del material pulverizado, listo para estabilizar		Tabla 350 – 3	
	123		
Tamaño máximo, fracción máxima del espesor de la capa compactada		1\2	
Limpieza (F)			
Limite líquido, % máximo	125	30	35
Índice de plasticidad, % máximo	125 y 126	12	15
Contenido de materia orgánica, % máximo	121	1	
Características Químicas (O)			
Proporción de sulfatos del material combinado, expresado como SO ₄ , % máximo	233	0,5	
Reactividad álcali-agregado: Concentración SiO ₂ y reducción de alcalinidad R	234		

Fuente: Artículo INVIAS INV E-350-2013.

Tabla 6: Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento.

TIPO DE GRADACION	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	20-45	2-25
Tolerancias de producción sobre las fórmulas de trabajo (+/-)		0%			7%			6%		3%
TIPO B	B-50-1	100	–	–	–	–	40-80	–	–	2-35
	B-50-2	100	–	–	–	–	60-100	–	–	0-50
Tolerancias de producción sobre las fórmulas de trabajo (+/-)		0%			–			8%		5%

Fuente: Artículo INVIAS INV E-350-2013.

2.2. CARACTERIZACION FISICA DEL MATERIAL

El recebo común dispuesto para la elaboración del proyecto corresponde a un suelo de excavación proveniente de canteras localizadas en la zona nororiental de la ciudad de Bogotá, se tomó una muestra de 290 kilos a fin de tener alteraciones mínimas en su obtención y disponer del material suficiente para la elaboración de los respectivos ensayos.



Ilustración 1: Cantera para Extracción del Material.

Fuente: Elaboración Autores.

2.2.1. Control Caracterización Física del Material

La selección del material se dio con base a lo planteado en el artículo 350 – 13 del INVIAS el cual indica que el material a estabilizar podrá provenir de la escarificación de la capa superficial existente, o ser un suelo natural proveniente de excavaciones, o agregados locales de baja calidad, o una mezcla de los mismos. Cuando este se encuentre combinado, deberá estar libre de toda materia orgánica o sustancia que pueda alterar el fraguado del cemento.

2.3. RECEBO COMUN

Para el recebo común que fue utilizado para la elaboración del proyecto, se realizaron los siguientes ensayos:

2.3.1. Limite líquido de los suelos. Norma INV E – 125 – 13

Para la elaboración del ensayo tomamos una muestra inicial de 1000 g, la cual es colocada en el horno a una temperatura aproximada de 110 °C. Posterior a 24 horas de secado el material es disgregado, evitando cambiar el tamaño original de las partículas. El material se somete a proceso de tamizado, empleando el tamiz No. 40, de allí obtenemos una muestra aproximada de 200 g. De la muestra obtenida se tomó 150 g. y se les agrega la cantidad de agua necesaria hasta formar una pasta similar a la pasta dental, se toma una porción de la muestra y se coloca sobre la cazuela de Casagrande, se pasa el ranurador justo por la mitad de la cuchara formando dos porciones de muestra. Posterior a ello se procede a dar los golpes necesarios hasta que las dos porciones de muestra entren en contacto. Se toma como dato la cantidad de golpes aplicados obteniendo un punto de conteo, se repite el procedimiento anterior hasta obtener tres puntos de conteo; de cada punto de conteo se toma una muestra representativa de la cuchara, tomando un peso inicial, y un peso final (correspondiente al peso de la muestra luego de que es llevada al horno por 24 horas a una temperatura aproximada de 110 °C.), esto con el fin de obtener el valor real de la humedad de dicha porción. Posterior a ello se graficó el número de golpes contra la humedad obtenida en cada conteo, obteniendo como límite líquido el porcentaje de humedad proyectado a 25 golpes de la cazuela.



Ilustración 2: Registro Fotográfico Ensayo Limite Líquido.

Fuente: Elaboración Autores.

Las ilustraciones No. 3y No. 4 muestran los puntos del conteo mencionado anteriormente y la proyección de la humedad a 25 golpes.

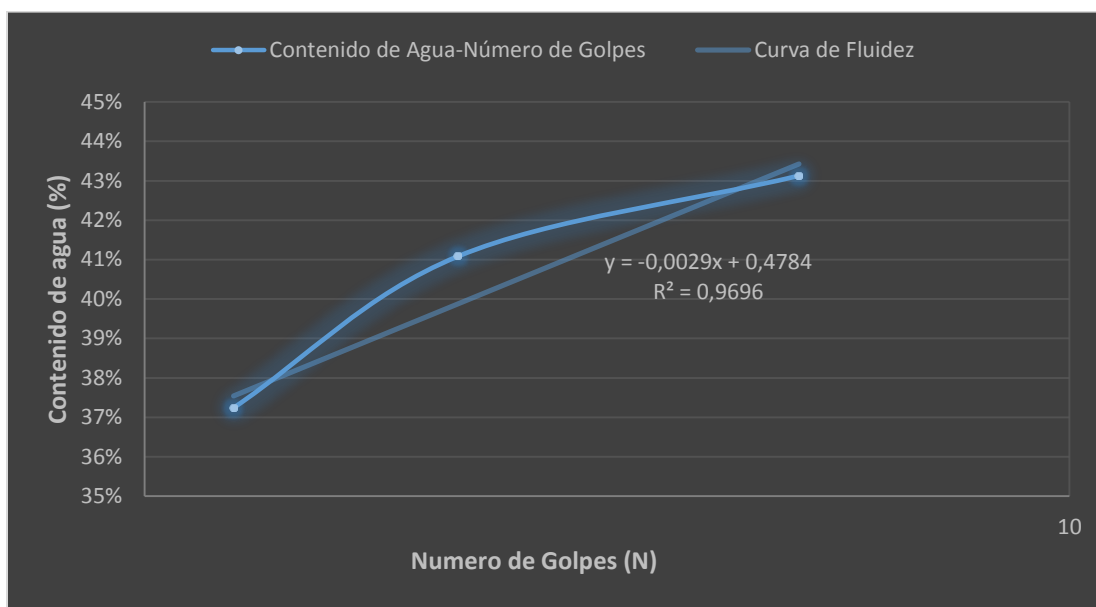


Ilustración 3: Curva de Fluidez – Limite Líquido. Prueba No. 1. – Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.

Fuente: Elaboración Autores

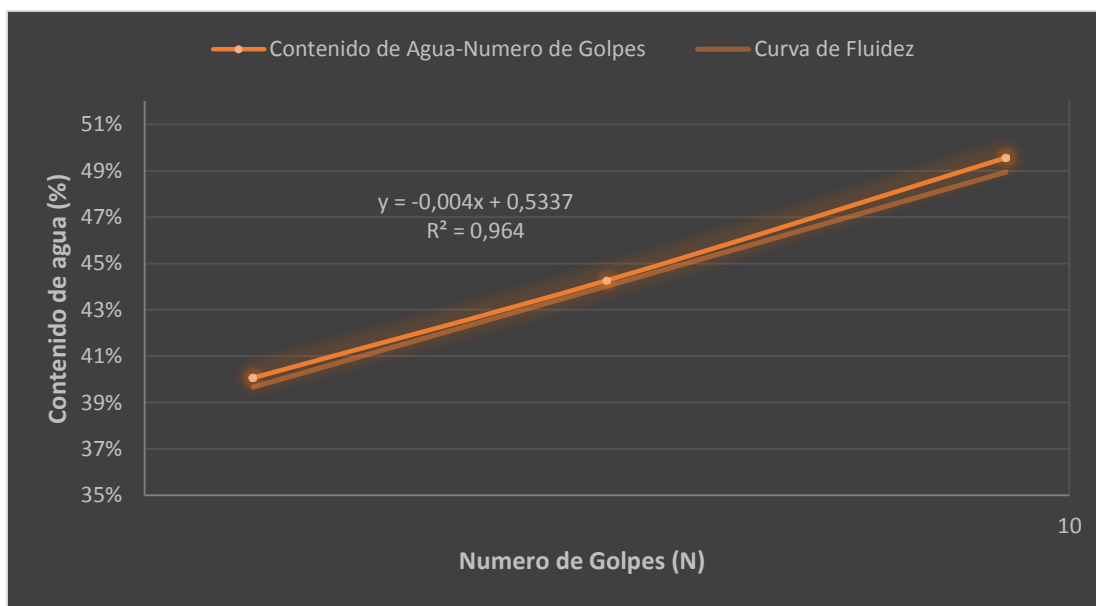


Ilustración 4: Curva de Fluidez – Límite Líquido. Prueba No. 2.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.

Fuente: Elaboración Autores.

2.3.1.1. Control Límite Líquido de los Suelos

De acuerdo a los requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento (Tabla 5) el porcentaje máximo permitido para el límite líquido es del 35%; parámetro que el suelo no está cumpliendo y no lo hace apto para la elaboración de nuestro proyecto ya que se obtienen valores de 41% y 43% para las pruebas realizadas respectivamente. Los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo 1 y Anexo 2.

2.3.2. Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - Norma INV E – 126 – 13

Para la elaboración de este ensayo tomamos el excedente del material utilizado para el ensayo de límite líquido, para el caso de la muestra pasante por el tamiz No. 40 se tomaron

50 g. Posterior a ello se agrega la cantidad de agua necesaria hasta que se logre una pasta cuya consistencia permita hacer un rollo sin que el material quede pegado en la mano. De esta porción de masa se tomaron entre 1 y 2 gramos de material y se dispone a formar un rollo que a lo largo de su longitud presente un diámetro aproximado a 3 mm. Cuando el rollo formado no se desmorona se divide en pequeños trozos, se aplasta en el pulgar, se forma nuevamente una masa compacta y nuevamente se hace el rollo. Este procedimiento se repite hasta que el rollo, en el diámetro esperado, comience a desmoronarse. Cuando la masa se encuentra en este punto se toma una muestra de la misma, tomando un peso inicial y un peso final (correspondiente al peso de la muestra luego de que es llevada al horno por 24 horas a una temperatura aproximada de 110 °C.). El valor del límite plástico será la humedad medida en la muestra llevada al horno.

2.3.2.1. Control Índice de Plasticidad de los Suelos

De acuerdo a los requisitos de los materiales para la construcción de suelo-cemento (Tabla 5), el porcentaje máximo permitido para el índice de plasticidad es igual al 15%, obtenido como la resta entre el límite líquido y el límite plástico; requerimiento que nuestro suelo no está cumpliendo, ya que se están obteniendo valores de 20% para las dos pruebas realizadas. Los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo 1 y Anexo 2.

2.3.3. Modificación del material granular

Los resultados anteriormente mostrados arrojaron que el suelo dispuesto para la elaboración del proyecto no cuentan con las características requeridas por el Artículo 350 -13 del INVIAS presentando un límite líquido y una plasticidad muy elevadas; por tal motivo se realizó una modificación de dicho material agregando arena de río al mismo en una proporción 4:1 a fin de disminuir la alta absorción de agua que presentaba el material. Ver anexo No. 3 y Anexo No.4.

2.3.3.1. Arena de río

Es una arena natural, que se obtiene a partir de un proceso de explotación, cribado y lavado de los materiales del río, cuenta con una excelente graduación granulométrica, con un tamaño máximo de 7 mm. La arena de río presenta las siguientes propiedades:

Tabla 7: Propiedades Arena de Río.

Prueba	Designación	Promedio	Max	Min
Sanidad (%)	ASTM-C-88	1,1	1,1	1,1
Peso Unitario Suelto (Kg/m ³)	ASTM-C-29	1372	1400	1340
Módulo de Finura	ASTM-C-117	3,2	3,3	3,1
Lavado en # 200 (%)	ASTM-C-117	1,8	2,6	0,4
Humedad (%)	ASTM-C-566	10,7	15,8	1,1
Gbs	ASTM-C-127	2,5	2,5	2,5
Equivalente de Arena (%)	ASTM-C-2418	85,0	85,0	85,0
Absorción (%)	ASTM-C-128	3,8	4,4	3,2

Fuente: Documento Web – Catálogos y Agregados.

2.3.3.2. Control de Modificación Realizada

A continuación se muestra los resultados obtenidos para los límites y la plasticidad del suelo, luego de realizada la adición de arena al material, cabe señalar que la arena utilizada para la modificación es una arena de río:

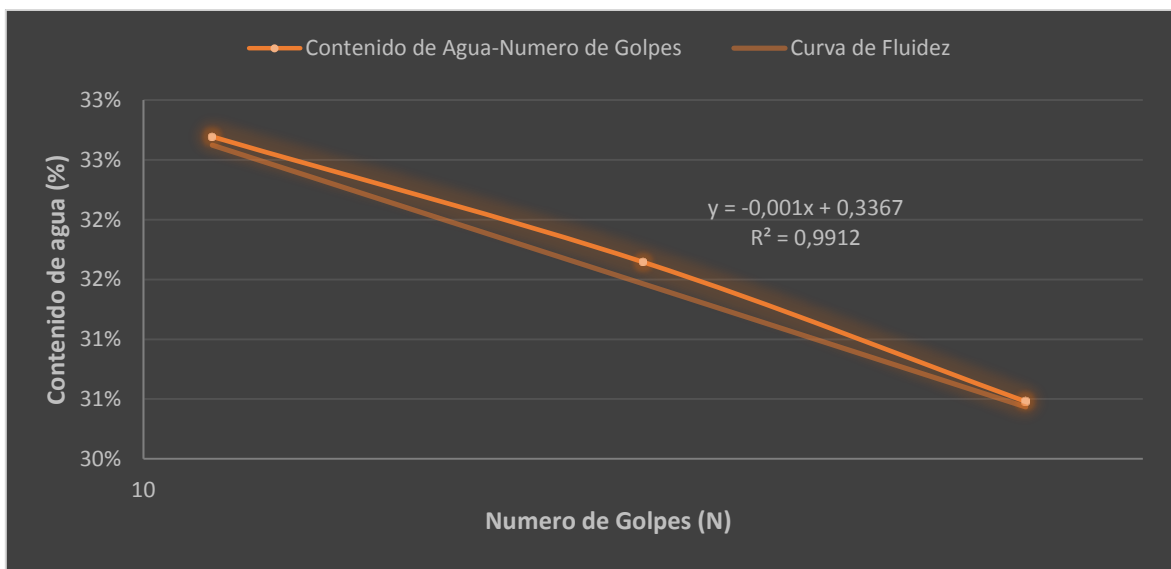


Ilustración 5: Curva de Fluidez – Limite Liquido. Prueba No. 3.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.

Fuente: Elaboración Autores.

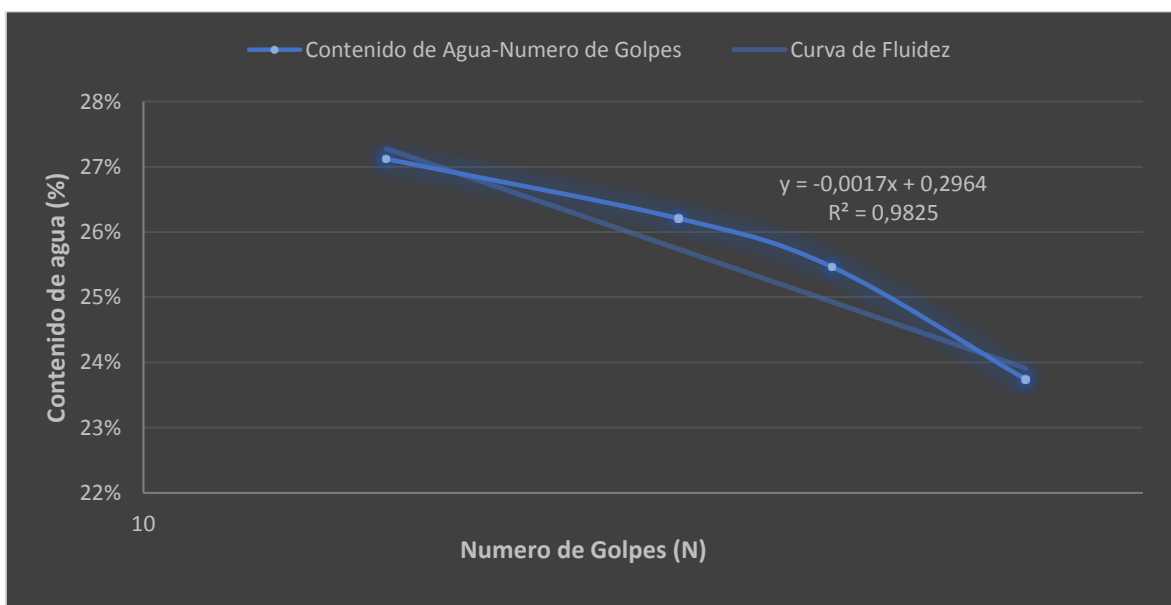


Ilustración 6: Curva de Fluidez – Limite Liquido. Prueba No. 4.- Nota: La línea de tendencia, siendo lineal, presenta una curvatura ya que se encuentra sobre un formato logarítmico.

Fuente: Elaboración Autores.

La modificación realizada al material granular rojo como resultado un límite líquido de 25% y 31% respectivamente, la resta entre el límite líquido y el límite plástico para la

obtención del índice de plasticidad arrojó como resultado 11% y 13% para las dos pruebas realizadas. Estos valores si cumplen con los requerimientos descritos en el Artículo 350 – 13 del INVIAS, esto permite la utilización del material granular modificado para el desarrollo del proyecto.

2.3.4. Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos – Norma INV E – 123 – 13

La determinación del tamaño de las partículas del material a estabilizar se realizó mediante la Norma INV E 123 – 13 como lo requiere la especificación Suelo-Cemento. Para este ensayo es necesario que se seque el material como lo indica la Norma INV E 106 - 13, de tal manera se tomó aproximadamente 20 Kg. para dejarlos en el horno a una de 60 °C. Durante 24 horas. Posterior a ello, se realizó un cuarteo de manera manual, escogiendo una muestra representativa de 6000 g., la cual, es la muestra con la que trabajamos para iniciar el ensayo. Con esta muestra de 6000 g. se procedió a realizar el ensayo granulométrico, levando el material mediante el Tamiz No 200, para separar las partículas finas de las partículas granulares; este material lavado se dejó en el horno durante 24 horas para tener el material seco lavado, el cual debe ser pesado al finalizar el periodo de secado. En seguida se selecciona un juego de tamices para realizar el análisis mecánico del material, los cuales fueron los siguientes (Tabla No. 9.):



Ilustración 7: Registro Fotoaráfico Ensayo Granulometría – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 8: Tamices para el Análisis Granulométrico del Recebo Común.

TAMIZ	ABERTURA
No	(mm)
3"	75,000
2"	50,000
1 1/2"	37,500
1"	25,000
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,750
N° 10	2,000
N° 20	0,850
N° 40	0,425
N° 60	0,250
N° 100	0,106
N° 200	0,075

Fuente: Elaboración Autores.

Antes de comenzar el proceso de tamizado, es necesario pesar cada uno de los tamices para determinar el material retenido. El proceso de tamizado se realizó de manera manual, el cual se debía sacudir los tamices con movimientos laterales y verticales, a su vez con vibraciones y movimientos circulares, tal forma que el movimiento sea continuo durante 15 min. Posteriormente, se pesa cada tamiz con el material.

Dentro del proyecto se realizó 2 ensayo de granulometría para caracterizar el material granular (Recebo Común), el cual el primer ensayo se obtuvo una curva granulométrica (ver ilustración No. 8.) y para el segundo ensayo se obtuvo la curva (ver ilustración No. 9).

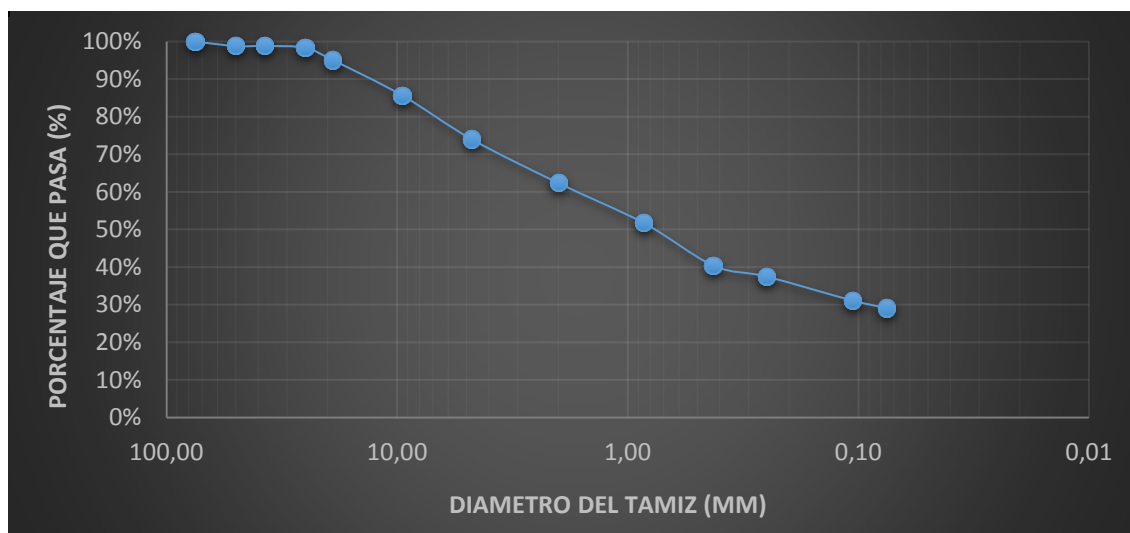


Ilustración 8: Curva Granulométrica Material Granular. Prueba No. 5.

Fuente: Elaboración Autores.

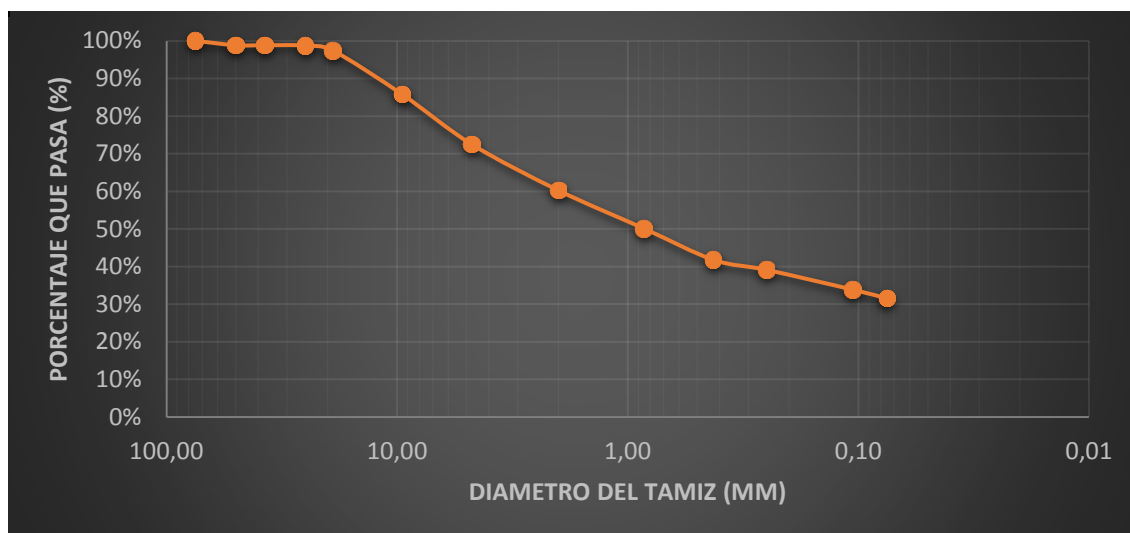


Ilustración 9: Curva Granulométrica Material Granular. Prueba No. 6.

Fuente: Elaboración Autores.

En cada uno de los ensayos para la determinación de las partículas del material a trabajar se obtuvieron resultados similares tanto en la curva granulométrica como en el tipo de gradación (ver Anexo No. 5 y Anexo No. 6); en la especificación Suelo-Cemento Artículo 350 – 13 del INVIAS presenta los requisitos que debe tener el material granular para ser

estabilizado, siendo cuatro tipos de gradación que puede presentar el material (Tipo A-50, Tipo A-25, Tipo B-50-1 y Tipo B-50-2), cada tipo de gradación tiene un rango permitido.

La granulometría del Recebo Común es analizada en cada uno de los requisitos granulométricos, el cual solamente en uno cumple. En el Tipo de gradación A-50, más del 90 % de la curva granulométrica se encuentra fuera del rango que requiere este tipo (ver ilustración No. 10), no cumpliendo el material para este tipo de gradación. El Tipo de gradación A-25, presenta un rango más adecuado para el material a estabilizar, cumpliendo casi en su totalidad; pero en los tamaños de las partículas finas, no se encuentran dentro del rango que se requiere (ver ilustración No. 11), en el que tampoco cumple. La gradación B-50-1 presenta un rango en que gran parte de la curva granulométrica se encuentra pero no en su totalidad, un 15% del suelo no está dentro del rango que se requiere, más exactamente en las partículas gravas de la curva granulométrica del recebo común (ver ilustración No. 12), no cumpliendo con el requisito. El Tipo de gradación B-50-2 es la que cumple el material para estabilizar, porque la totalidad de las curva granulométrica está dentro del rango que se requiere, encontrándose en la parte central del rango en cada uno de los tamaños de las partículas evaluados (ver ilustración No. 13).

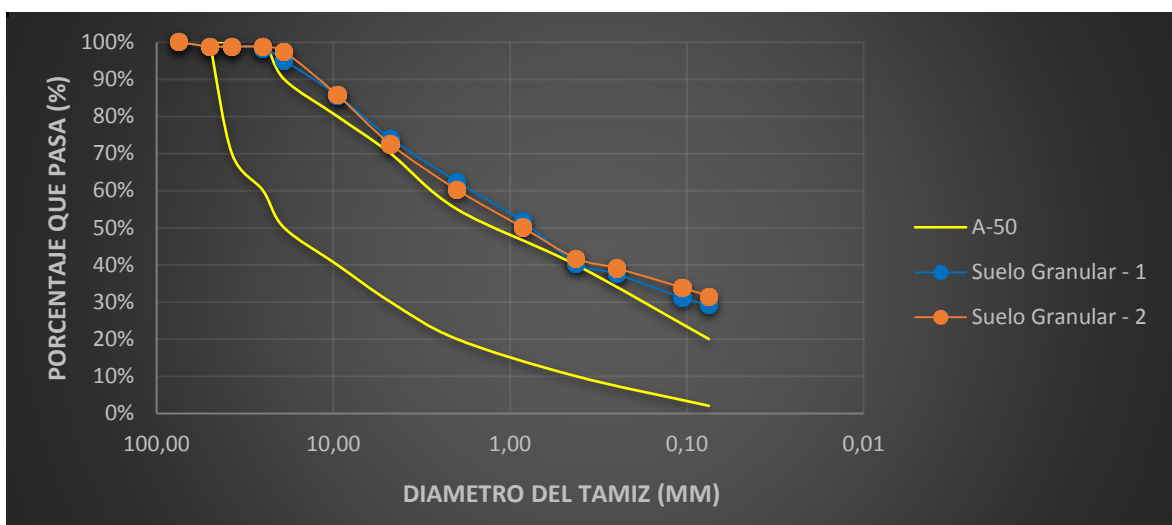
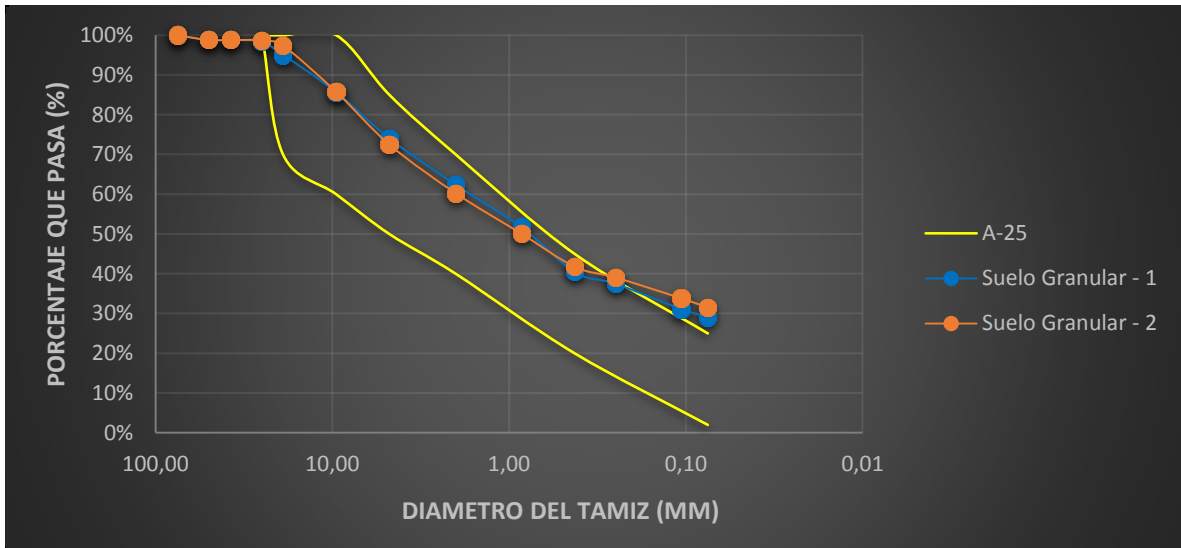


Ilustración 10: Curva Granulométrica Material Granular.

Fuente: Elaboración Autores.



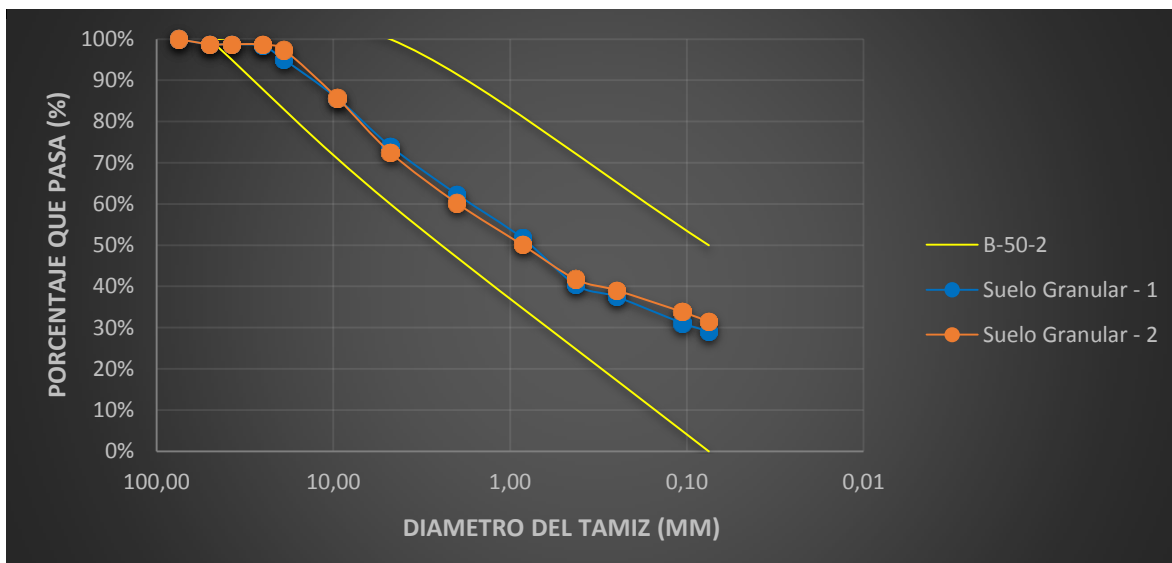


Ilustración 13: Curva Granulométrica Material Granular.

Fuente: Elaboración Autores.

2.3.5. Clasificación del Material Granular

Según los resultados obtenidos mediante la clasificación de la AASHTO, el material con el que se desarrolló el proyecto es un suelo A-2-6: este material corresponde a una arena con grava bien gradada con pocos finos (SW), corresponde a un material permeable, por lo cual presenta una absorción considerable de agua. Además de esto el material se clasifica como una arena limosa (SM), correspondiente a la parte fina, la cual presenta una absorción moderada de agua (ver Tabla No 13).

2.3.6. Determinación del Contenido Orgánico de un Suelo Mediante el Ensayo de Perdida por Ignición

Para la determinación del contenido del material orgánico del Recebo Común se realiza según la Norma INV E 121 – 13, en el que el material se debe secar durante 24 horas en el horno a 110 °C. Teniendo el material seco, se coloca sobre la porcelana para introducirlo en

la mufla, pero antes se pesa y se anota como la “masa de plato de evaporación y suelo antes de ignición”; en seguida se coloca el material en la mufla durante 6 horas a una temperatura constante de 450 °C; al terminar este periodo, se abre la mufla para secar el material, se pesa y se anota “masa de plato de evaporación y suelo después de ignición”. Para el cálculo del contenido orgánico se realiza como se calculara una humedad.



Ilustración 14: Registro Fotográfico Ensayo Contenido Material Orgánico – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

Para este ensayo se realiza de pruebas, los cuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9: Resultados del Contenido de Material Orgánico.

Prueba	Contenido de Material Orgánico
1.	0.74 %
2.	0.94 %

Fuente: Elaboración Autores.

Según los resultados (ver Tabla No. 09), se observa que el contenido de material orgánico cumple para ser estabilizado “Suelo-Cemento, el cual debe ser menor del 1% (ver Tabla 5.), según el Artículo 350 – 13 del INVIAS.

Tabla 10: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos Granulometría, Límites de Atterberg y Contenido Material Orgánico.

Ensayo	Noma del Ensayo INVE	Material	Requisitos Según Art. 350 - 13 INVIAS	Resultado	Resultado(R)	Cumple
Granulometría	E-123	MG	Ver Tabla No. 6	Gradación Tipo B-50-2	Gradación Tipo B-50-3	Si Cumple
		EPS		N.A.	N.A.	N.A.
Limite Liquido	E-125	MG	Max. 35%	25,39%	31,17%	Si Cumple
Índice de Plasticidad	E-126	MG	Max. 15%	10,57%	13,38%	Si Cumple
Contenido Material Orgánico	E-121	MG	Max. 1%	0,74%	0,94%	Si Cumple

N.P. = No Presenta, N.A. = No Aplica

Fuente: Elaboración Autores.

2.4. POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)

El poliestireno expandido presenta las siguientes propiedades:

Densidad: Los productos y artículos terminados en poliestireno expandido se caracterizan por ser ligeros aunque resistentes. En función de la aplicación las densidades se sitúan en el intervalo que va desde los 10kg/m³ hasta los 35kg/m³.

Color: El color natural de poliestireno expandido es blanco, esto se debe a la refracción de la luz.

Resistencia mecánica: La densidad del material guarda una estrecha relación con las propiedades de resistencia mecánica. Los gráficos a continuación muestran los valores

alcanzados sobre estas propiedades en función de la densidad aparente de los materiales de poliestireno expandido.

Aislamiento térmico: Los productos y materiales de poliestireno expandido presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico. Esta buena capacidad de aislamiento térmico se debe a la propia estructura del material que esencialmente consiste en aire ocluido dentro de una estructura celular conformada por el poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% materia sólida (poliestireno), siendo el aire en reposo es un excelente aislante térmico.

Tabla 11: Propiedades Poliestireno Expandido.

Propiedades	Valores		
Densidad, kg/m ³	16	32	48
Resistencia a la tensión, kg/cm ²	138	414	615
Resistencia al cortante, kg/cm ²	138	276	410
Resistencia a la flexión, kg/cm ²	207	640	1034
Resistencia a la compresión, kg/cm ²	70	152	295
Resistencia térmica, W/m ³ C	0.0375	0.0346	0.0349

Fuente: Pagina Web –Aislantes y Empaques.

El Poliestireno Expandido se trituro con una máquina que se elaboró para facilitar el proceso (ver Anexo 38), de esta manera se obtuvo en partículas (EPS) para poder realizar el análisis granulométrico.

Para el ensayo realizado para el material EPS, se utilizaron una serie de tamices, en que se tuvo en cuenta que fueran los mismos que se utilizaron para el recebo común; los cueles fueron los siguientes (ver Tabla No 10):

Tabla 12: Tamices para el Análisis Granulométrico del Poliestireno Expandido.

TAMIZ	ABERTURA
No	(mm)
3/4"	19,000
3/8"	9,500
N° 4	4,750
N° 10	2,000
N° 20	0,850
N° 40	0,425

Fuente: Elaboración Autores.

Este material para poder ser tamizado, no es necesario que sea lavado, como si se le hizo al recebo común, ya que no presenta material fino y se encuentra limpio. Para el proceso de tamizado se realiza de la misma manera que se hizo para el recebo común, como indica el numeral 4.5.1 con los tamices anteriormente enunciados.

A continuación se presenta la curva granulométrica (ver ilustración No. 14) que se obtuvo para el material Poliestireno Expandido:

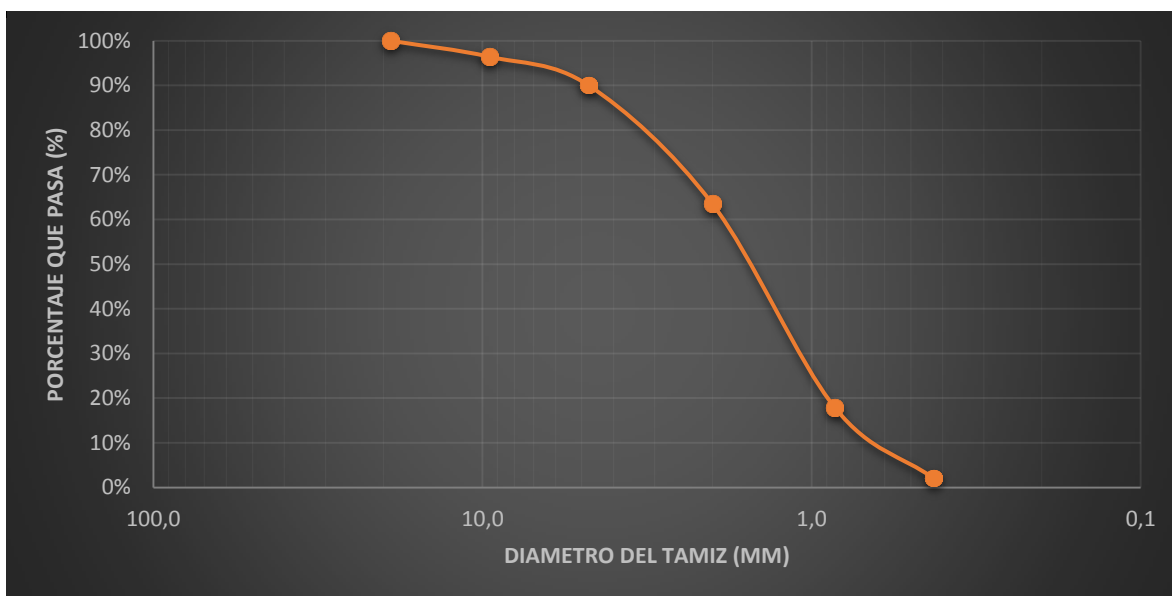


Ilustración 15: Curva Granulométrica Poliestireno Expandido. Prueba No. 7.

Fuente: Elaboración Autores.

La granulometría del Poliestireno Expandido presenta diferentes tamaños de las partículas, debido que en el proceso de la trituración la maquina no cogía la totalidad del material, dejando pedazos más grandes que otros. Según la granulometría realizada para el Poliestireno Expandido (ver Anexo No. 7), el cual se obtuvo con mayores porcentajes de material retenido en los Tamices No. 10 y No. 20, con porcentajes del 26.51 % y 45.58% cada uno correspondiente; y con menores porcentajes retenidos en los Tamices 3/4” y 3/8”, menores al 4.0%.

2.5. CEMENTO

El cemento utilizado para el desarrollo del proyecto es un cemento gris de uso general tipo 1 de marca Argos. Este cemento cumple con las siguientes propiedades:

- ✓ Presenta un cambio de longitud por expansión límite de 0.8%.
- ✓ El tiempo de fraguado es no menor a 45 minutos y no mayor de 420 minutos.
- ✓ El contenido de aire en volumen de mortero es de máximo 12%.
- ✓ La expansión de barras de mortero a 14 días es de máximo 0.02%.
- ✓ Presenta resistencias a la compresión de la siguiente manera:

Tabla 13 Resistencia a la Compresión.

DIAS	RESISTENCIA (MPa)
3	9
7	16
28	26

Fuente: Cementos Argos.

3. DISEÑO DE MEZCLA DE SUELO CEMENTO

3.1. REQUISITOS ARTICULO 350 – 13 INVIAS

Los resultados que se mostraran a continuación serán verificados con las siguientes tablas dadas por la especificación del INVIAS, dicha verificación nos permite conocer si los resultados obtenidos dan cumplimiento a los requerimientos dados:

Tabla 14: Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento.

ENSAYO	ENSAYO INV - 13	SC-D	SC-R
Durabilidad			
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	612		14
Suelos A-2-6, A-2-7, A-4, A-5			10
Suelos A-6, A-7			7
Resistencia			
Comportamiento de la resistencia con:			
Incremento en el contenido de cemento	614		Crece
Incremento en la edad			Crece
Resistencia a la compresión a 7 días			
Mínima	614		2,1
Máxima		4,5	4,5

Fuente: Artículo INVIAS INV E-350-2013.

Nota: Para el desarrollo del trabajo se tendrá en cuenta la siguiente nomenclatura asignada por autoría propia; para el caso del poliestireno expandido, las siglas EPS, son referidas a su símbolo internacional.

Tabla 15: Nomenclatura.

Nomenclatura	
MG	Material Granular
EPS	Poliestireno Expandido
0,0% EPS	Sustitución de EPS del 0,0%
12,5% EPS	Sustitución de EPS del 12,5%
25,0% EPS	Sustitución de EPS del 25,0%
37,5% EPS	Sustitución de EPS del 37,5%
50,0% EPS	Sustitución de EPS del 50,0%
(R)	Repetitividad

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 16: Clasificación de los suelos según AASHTO.

CLASIFICACION GENERAL	Materiales granulares (igual o menor del 35% pasa por el tamiz No. 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35% pasa por el tamiz No. 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
GRUPOS	A-1-A	A-1-B		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	
SUB-GRUPOS											A-7-6	
% Que Pasa por el Tamiz:												
No. 10	50 máx.											
No. 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.									
No. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	36 min	
Características del material que pasa por el tamiz No. 40												
Limite Liquido			No Plástico	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 máx.	
Índice de Plasticidad	6 máx.	6 máx.		10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Tipos de material	Fragmentos de Piedra Grava y Arena		Arena Fina	Gravas, Arenas Limosas Arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente					

Fuente: AASHTO.

3.2. SUSTITUCIÓN DE PARTÍCULAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO EN LA FRACCIÓN FINA DEL AGREGADO

La elaboración de la base estabilizada se realiza a partir de dos materiales “Recebo Común y Poliestireno Expandido”, los cuales anteriormente se caracterizaron, descritos en los numerales 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6, el Recebo Común mediante límites de Atterberg, granulometría y contenido orgánico, y el Poliestireno Expandido según la granulometría. Para determinar el comportamiento que presenta una base estabilizada con partículas de Poliestireno Expandido, se realiza una sustitución en la fracción granulométrica entre Tamiz No. 10 y Tamiz No. 20, es decir que pase por el Tamiz No. 10 y se retenga por el Tamiz No. 20, equivalente al 10 % del total del material Granular (ver Anexo 3 y 4); que a su vez es la fracción granulométrica del Poliestireno Expandido donde más se presenta material (ver Anexo 5) para realizar el proyecto.

La sustitución del Poliestireno Expandido dentro de la fracción granulométrica del Recebo Común se realizó según su densidad, ya que la densidad del Poliestireno Expandido es pequeña ($\gamma_{EPS} = 0.4 \text{ g/cm}^3$), porque si se hubiera realizado mediante una sustitución según el peso, la cantidad de EPS hubiera sido demasiado grande a comparación al Recebo Común a reemplazar; por esta razón se realizó la sustitución según la densidad de los materiales, de la siguiente forma:

Por ejemplo, para una probeta de un ensayo de Compresión, se necesitan 2300 g. por cada una. Para saber cuánto es el material de Recebo Común a sustituir, es necesario saber el volumen de este material, obteniéndolo mediante la densidad del Recebo Común ($\gamma_{Recebo Común} = 1.85 \text{ g/cm}^3$), de la siguiente manera:

$$V_{Recebo Común} = \frac{2300 \text{ g}}{1.85 \text{ g/cm}^3} = 1243.24 \text{ cm}^3$$

Como la fracción granulometría a sustituir es del 10%, se calcula esta fracción del volumen total del material granular:

$$10\% V_{Recebo Común} = 1243.24 \text{ cm}^3 * 10\% = 124.32 \text{ cm}^3$$

El Volumen “10 % $V_{\text{Recebo Común}}$ ” equivaldría el 100% de la fracción a sustituir; de igual manera para conocer la cantidad de material de Poliestireno Expandido, se tiene en cuenta tanto 10 % $V_{\text{Recebo Común}}$ como γ_{EPS} , de la siguiente forma:

$$W_{\text{EPS}} = 124.32\text{cm}^3 \times 0.4 \text{ g/cm}^3 = 49.72 \text{ g}$$

La cantidad de Poliestireno Expandido a utilizar para una probeta de ensayo Compresión en un 100% de la fracción a sustituir es de $W_{\text{EPS}} = 49.72 \text{ g}$.

Según lo programado en el anteproyecto, la sustitución que se realizó en el proyecto, para la elaboración del material de las probetas y briquetas modificadas con Poliestireno Expandido se utilizaron los porcentajes de 0%, 12.5%, 25%, 37.5% y 50% para cada uno de los ensayos. No se realizaron porcentajes mayores al 50 % de la sustitución, debido a la gran cantidad de material de Poliestireno Expandido de estas fracciones, no permitía realizar las probetas de manera adecuada.

Aunque la sustitución que se realizó en el material granular, no alcance al 100%, se puede observar (ver ilustración 16) que la sustitución en cada uno de los porcentajes es realmente representativa para el estudio y evaluación de una base estabilizada Suelo Cemento.

Sustitucion del 12.5%

Poliestireno Expandido = 6.21 g.

Material Granular = 28.75g.



Sustitucion del 25.0 %

Poliestireno Expandido = 12.43 g.

Material Granular = 57.5 g.



Sustitucion del 37.5 %

Poliestireno Expandido = 18.65 g.

Material Granular = 85.10 g.



Sustitucion del 50.0 %

Poliestireno Expandido = 24.65 g.

Material Granular = 113.85g.



Ilustración 16. Equivalencia de Material Granular sustituido por Poliéstireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.3. RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO – NORMA INV E – 611 – 13

Con la elaboración de este ensayo se determinó el valor de la humedad óptima y la densidad máxima para la preparación de la mezcla de suelo-cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido, para dicha preparación se toma como referencia el método de la PCA (Portland Cement Association).

Como primera medida el método pide que se realice una clasificación del material a trabajar para el proyecto, esta se da mediante la tabla de clasificación de suelos según AASHTO (Tabla 13), esta tabla arroja el tipo de terreno teniendo en cuenta el límite líquido e índice de plasticidad, calculados anteriormente.

Como segundo paso se calcula el contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo-cemento (Tabla 14). Este contenido de cemento se obtiene según la clasificación del suelo obtenida en el paso inmediatamente anterior.

El ensayo inicia con la preparación del material, para el cual seleccionamos muestras pasantes por el tamiz No. 4, el material es llevado al horno durante 24 horas a una temperatura aproximada de 110 °C. Posterior a ello se tomaron 2700 g. de muestra para cada una de las probetas y se realizó la sustitución de poliestireno expandido requerida. Ya que la cantidad de poliestireno es bastante alta y el material es bastante volátil, se tuvo especial cuidado en el momento de mezclar el material, cuidando que el total de la muestra fuera homogénea. Seguido a esto se adiciona la cantidad de cemento requerida y se mezcla con el total de la muestra. Posterior a ello se formó un espécimen compactando en el molde, la mezcla de suelo-cemento en tres capas iguales, empleando 25 con el martillo manual por cada una de las capas. Posterior a ello se enrasa la muestra cuidadosamente y se determina la masa del molde con la muestra compactada. Con la masa tomada y el volumen del molde, se determinó el primer punto de densidad seca. En la muestra compactada se realiza un corte vertical y del centro de la misma se toma una pequeña porción la cual fue llevada al horno, por 24 horas, para determinar la humedad con la que se trabajó la muestra. Posterior a ello la muestra se disgrega y se adiciona agua, en un porcentaje equivalente al

3% de la muestra, repitiendo el procedimiento de mezclado, compactación, pesado y toma de muestra para determinación de la humedad. La adición de agua se repite en porcentajes del 3% hasta detectar una caída en la densidad de la muestra. Con los valores de densidades obtenidos, y las humedades encontradas en cada proceso de compactación se obtiene una gráfica de humedad contra densidad seca máxima, teniendo en su punto más alto el valor de la humedad óptima con que se trabajaron las mezclas de suelo-cemento posteriores.



Ilustración 17: Relación Humedad-Densidad Mezclas de Suelo-Cemento – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 17: Contenido de Cemento Aproximado para Proyectar las Mezclas de Suelo-Cemento.

Grupo de Suelo Según la AASHTO	% de Cemento Requerido en Peso	Contenido de Cemento Estimado Para la Prueba de Compactación en Peso	Contenido de Cemento para la Prueba de Humedecimiento y Secado en Peso
A-1-A	3 a 5	5	3-4-5-7
A-1-B	5 a 8	6	4-6-8
A-2	5 a 9	7	5-7-9
A-3	7 a 11	9	7-9-11
A-4	7 a 12	10	8-10-12
A-5	8 a 13	10	8-10-13
A-6	9 a 15	12	10-12-14

Fuente: Método de la PCA.

3.3.1. Control Relación Humedad-Densidad de mezclas de suelo cemento

Como primer paso, en la clasificación del suelo, obtuvimos como resultado un tipo de material A-2-6, ya que este no excede el límite de 35% de material pasante por el tamiz No. 200, su límite líquido no sobrepasa el 40% y su índice de plasticidad se encuentra arriba del 11% que tiene como parámetro mínimo.

En el caso del porcentaje de cemento estimado para la prueba de compactación, este nos arrojó un 7%, y los porcentajes de cemento estimados para la prueba de humedecimiento y secado obtenidos fueron de 5%, 7%, y 9%. Durante el desarrollo del proyecto se elaboraron probetas de ensayo, con el fin de determinar si era posible la elaboración de las briquetas, ya que la cantidad de poliestireno expandido en las sustituciones con el porcentaje más elevado era bastante alta. Para la realización de dichas briquetas se toma como porcentaje de cemento un 8% y como resultado se obtienen resistencia a la compresión que no supera los 0,6 MPa. Por tal motivo se decide incrementar en un punto porcentual, el contenido de cemento tanto para la prueba de compresión, como para la prueba de humedecimiento y secado, esto a fin de obtener resultados que se acerquen más al valor de resistencia requerido de 2,1 MPa. (Tabla 7.)

3.3.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido)

Para la primera prueba de Proctor, realizada en la mezcla de suelo-cemento sin sustitución de poliestireno se obtiene una gráfica que arrojó como porcentaje óptimo de humedad un 4,8 % y una densidad seca máxima de 1737,6 Kg/m³ (ilustración 18). La elaboración de este porcentaje de sustitución no tenía planteada una repetitividad, sin embargo con la siguiente prueba de Proctor (sustitución del 12,5% de poliestireno expandido), la cual evidencio un incremento bastante alto en su humedad optima con respecto al 0%, se decide repetir la prueba incrementando la cantidad de agua suministrada a la muestra, la gráfica para esta muestra arrojó un incremento tanto en la densidad como en la humedad optima

con respecto a la muestra anterior, obteniendo como resultado una humedad óptima del 13,41% y una densidad seca máxima de 1846,3 Kg/m³ (ilustración 19).

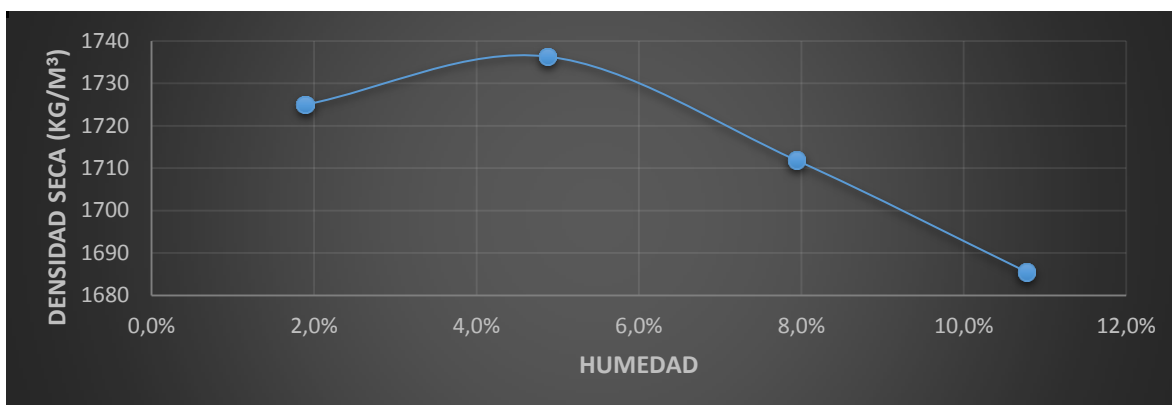


Ilustración 18: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 0% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 8.

Fuente: Elaboración Autores.

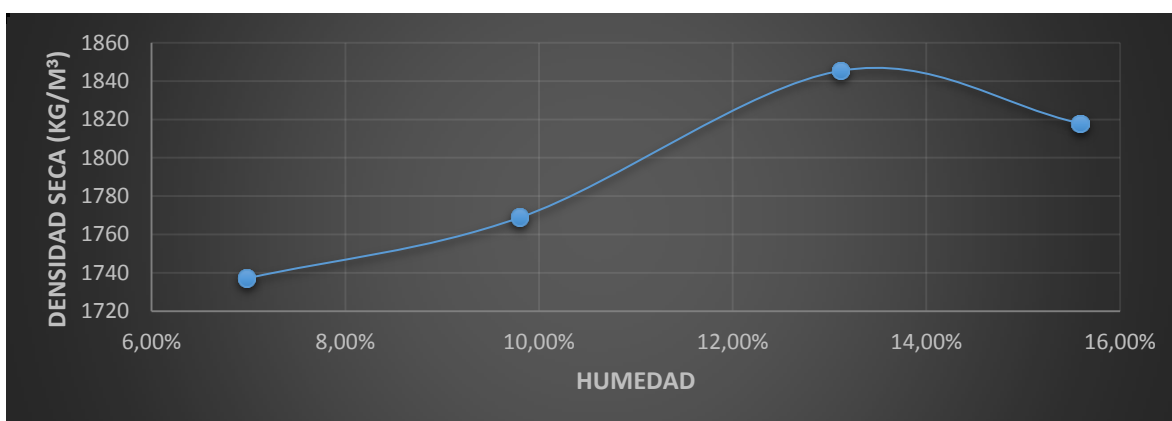


Ilustración 19: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 0% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 9.

Fuente: Elaboración Autores.

3.3.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido)

Para la segunda prueba de Proctor, realizada para la primera sustitución de poliestireno expandido equivalente a un 12,5%, se obtiene un valor de humedad óptima de 15,5% y una densidad seca máxima de 1813,4 Kg/m³ (ilustración 20). Para esta prueba se plantea repetitividad obteniendo como resultado de esta una humedad óptima de 15,52% y una densidad seca máxima de 1796,0 Kg/m³ (ilustración 21).

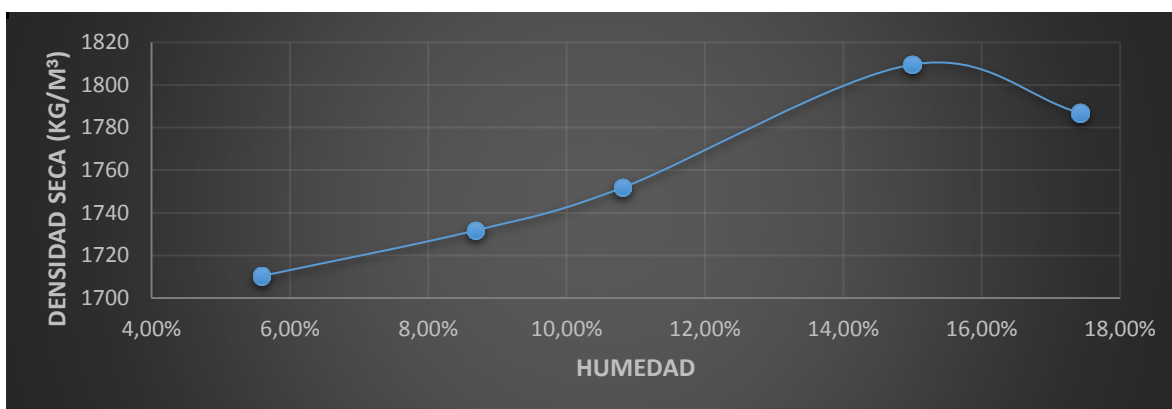


Ilustración 20: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 12,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 10.

Fuente: Elaboración Autores.

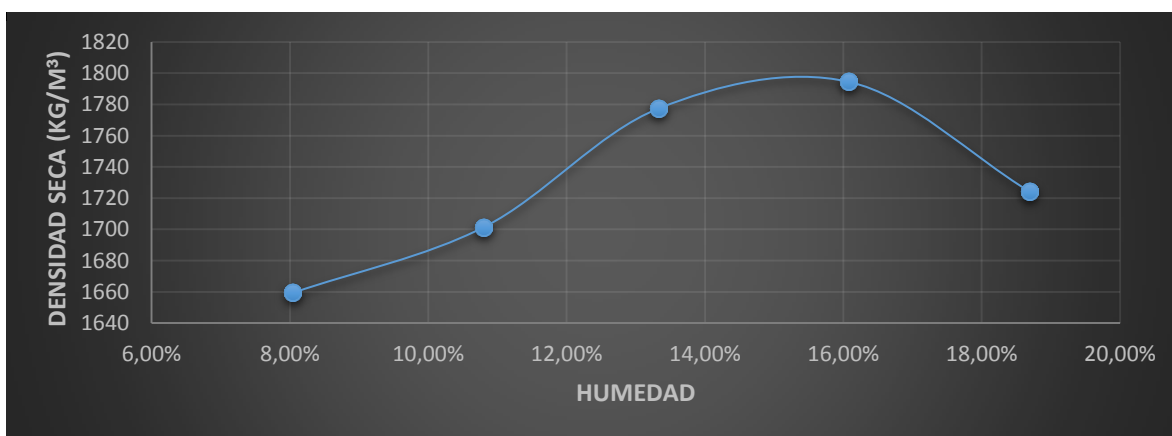


Ilustración 21: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 12,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 11.

Fuente: Elaboración Autores.

3.3.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido)

Para la tercera prueba de Proctor, realizada para la segunda sustitución de poliestireno expandido equivalente a un 25%, se obtiene un valor de humedad óptima de 15,65% y una densidad seca máxima de 1795,6 Kg/m³ (ilustración 22).

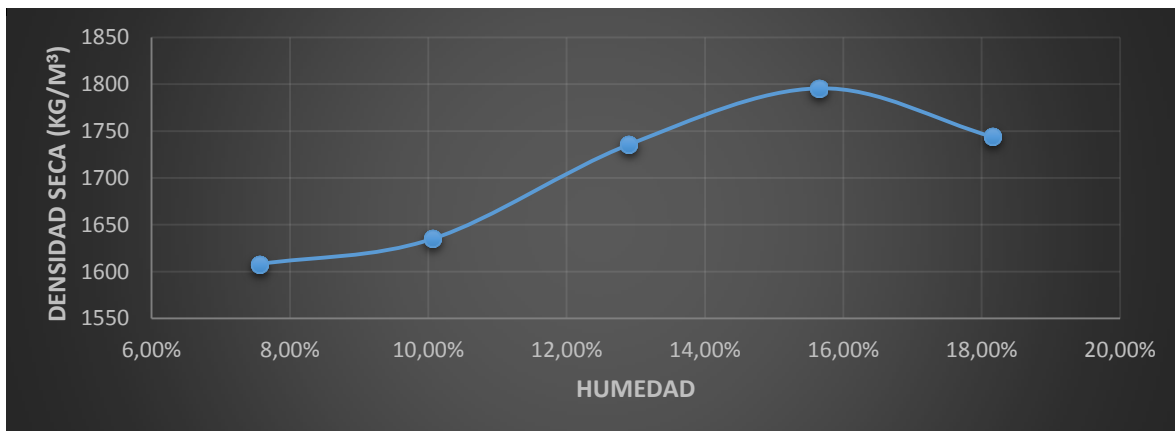


Ilustración 22: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 25% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 12.

Fuente: Elaboración Autores.

3.3.1.4. Suelo-Cemento (37,5% Poliestireno expandido)

Para la cuarta prueba de Proctor, realizada para la tercera sustitución de poliestireno expandido equivalente a un 37,5%, se obtiene un valor de humedad óptima de 16,5% y una densidad seca máxima de 1758,7 Kg/m³ (ilustración 23).

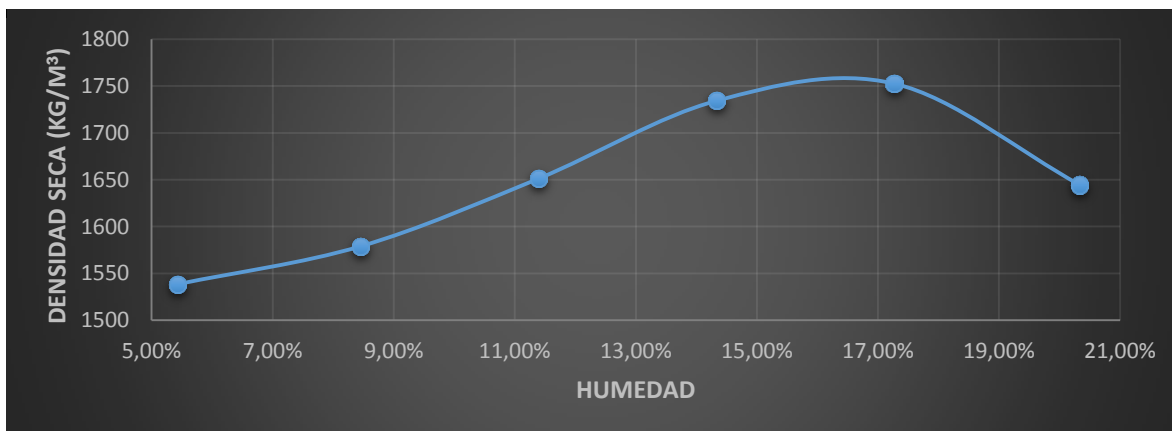


Ilustración 23: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 37,5% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 13.

Fuente: Elaboración Autores.

3.3.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno expandido)

Para la quinta prueba de Proctor, realizada para la cuarta sustitución de poliestireno expandido equivalente a un 50%, se obtiene un valor de humedad óptima de 16,48% y una densidad seca máxima de 1652,2 Kg/m³ (ilustración 24).

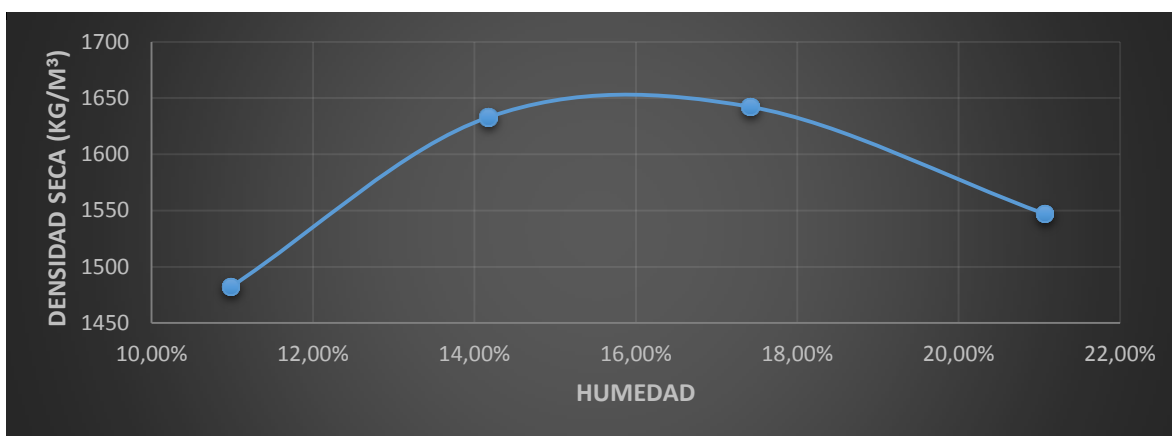


Ilustración 24: Ensayo Proctor, Humedad Óptima con 50% de Poliestireno en Mezcla Suelo-Cemento. Prueba No. 14.

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 18: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Proctor (Relación Humedad y Densidad).

Ensayo	Norma del Ensayo INVE	Mezcla	Requisitos Según Art. 350 - 13 INVIAS	Resultado	
				Humedad	Densidad (Kg/m ³)
Proctor	E-611	0,0% EPS	N.P.	13,41%	1846,3
		12,5% EPS		15,50%	1813,4
		12,5% EPS (R)		15,52%	1796,0
		25,0% EPS		15,65%	1795,6
		25% EPS (R)		14,32%	1725,1
		37,5% EPS		16,50%	1758,7
		50,0% EPS		16,48%	1652,2

N.P. = No Presenta

Fuente: Elaboración Autores.

3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO-CEMENTO – NORMA INVE – 614 – 13

El ensayo inicia con la preparación del material, para el cual seleccionamos muestras pasantes por el tamiz No. 4, el material es llevado al horno durante 24 horas a una temperatura aproximada de 110 °C. Posterior a ello se tomaron 2300 g. de muestra para cada una de las briquetas y se realizó la sustitución de poliestireno expandido requerida. Nuevamente se tiene especial cuidado en el mezclado de la muestra, tratando de lograr la mayor homogeneidad posible. Seguido a esto se adiciona la cantidad de cemento requerida y se mezcla con el total de la muestra. Paso seguido se adiciona la cantidad de agua requerida para cada muestra, dato que obtuvimos con anterioridad del ensayo de relación de humedad-densidad. Posterior a ello se formó un espécimen compactando en el molde, la mezcla de suelo-cemento en tres capas iguales, empleando 25 con el martillo manual por cada una de las capas. Posterior a ello se enrasa la muestra cuidadosamente. Luego del enrasado se lleva la muestra a una cámara húmeda por 7 días, cuidando de mantener la humedad de la cámara. Finalmente las briquetas son retiradas de la cámara y llevadas a la máquina universal, para realizar la compresión de las mismas. Con este ensayo obtenemos graficas de esfuerzo contra deformación, estos datos son proyectados para obtener el

porcentaje de cemento que cumpla con el requerimiento de resistencia del artículo 350 – 13 del INVIAS (Tabla 7).

3.4.1. Control Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo-Cemento

Para cada porcentaje de sustitución de poliestireno expandido (12,5%, 25%, 37,5%, y 50%) y para la mezcla de suelo sin sustitución se trabajaron porcentajes de cemento de 6%, 8% y 10%, para cada porcentaje de cemento se elaboraron tres briquetas de suelo-cemento de las cuales se obtuvo un valor máximo de resistencia a la compresión, los valores máximos de cada probeta en cada porcentaje de cemento se promedian y se elabora una gráfica con los tres porcentajes de cemento utilizados en la mezcla, por medio de la gráfica realizada se obtiene una proyección de la que se obtuvo el porcentaje de cemento requerido para obtener una resistencia de 2.1 MPa.

Sustitucion 12,5%



Sustitucion 25%



Sustitucion 37,5%



Sustitucion 50%



Ilustración 25: Resistencia a la Compresión de Cilindros Moldeados de Suelo-Cemento – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

3.4.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 6% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,16 MPa., 0,23 MPa. y 0,20 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.20 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

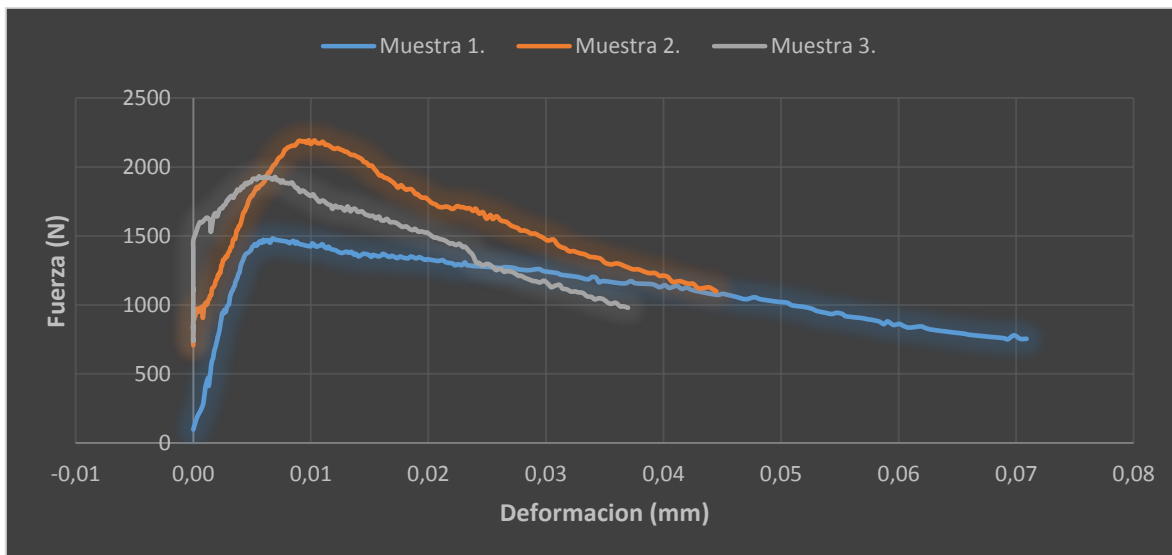


Ilustración 26: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el segundo caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 8% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,55 MPa., 0,47 MPa. y 0,40 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.47 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

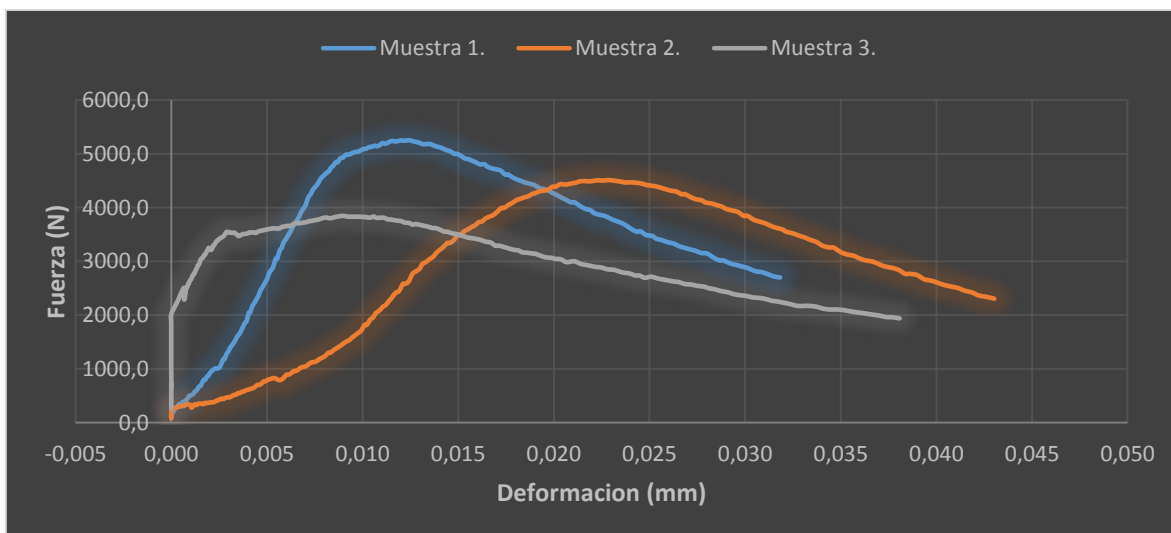


Ilustración 27: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el tercer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 10% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,53 MPa., 0,35 MPa. y 0,64 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0,51 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

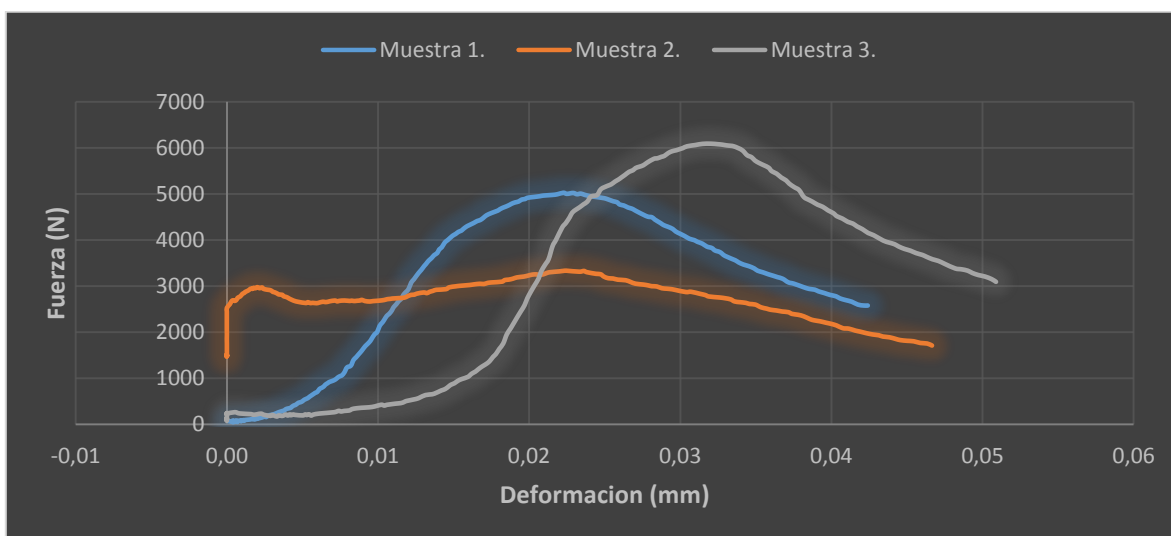


Ilustración 28: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.

Fuente: Elaboración Autores.

Con los valores promedios obtenidos se realizó la gráfica de proyección de la cantidad de cemento a utilizar con respecto a la resistencia deseada, en el caso de las briquetas con un 0% de poliestireno, se requiere un porcentaje de cemento del 30% para lograr una resistencia de 2,1 MPa.:

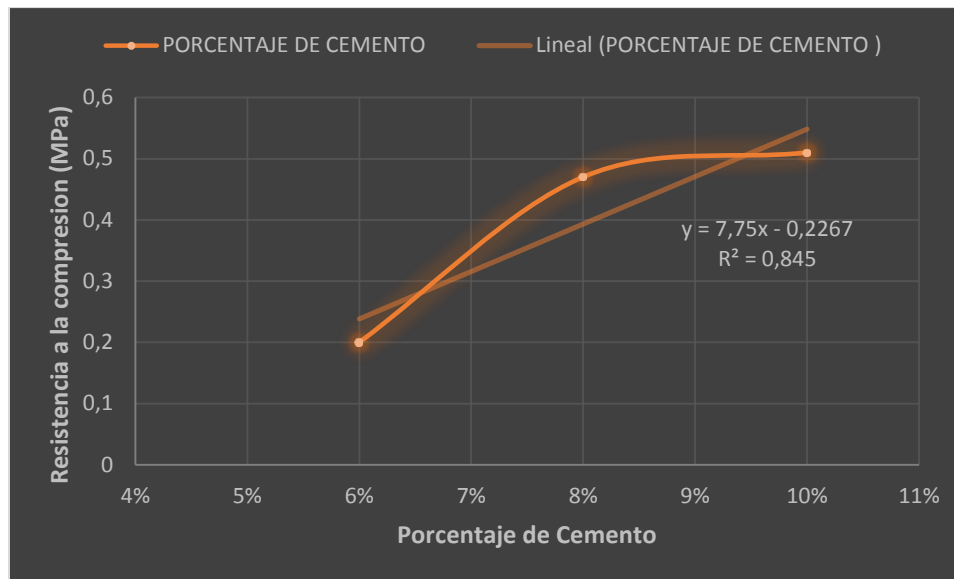


Ilustración 29: Proyección Contenido de Cemento, 0% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.4.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 6% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,23 MPa., 0,29 MPa. y 0,27 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0,26 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

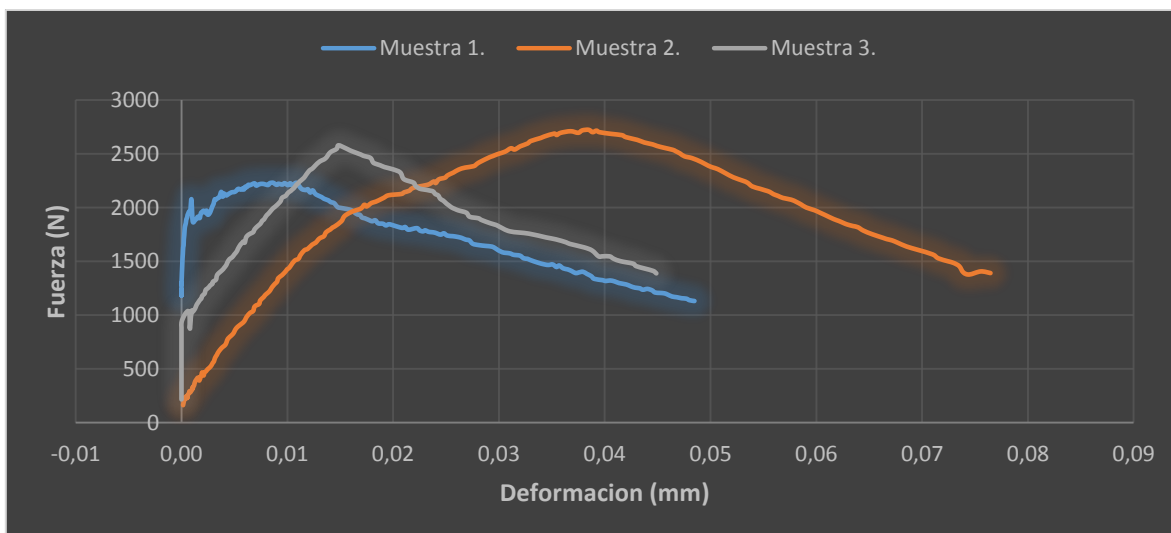


Ilustración 30: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el segundo caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 8% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,42MPa., 0,47 MPa. y0,51MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.47 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

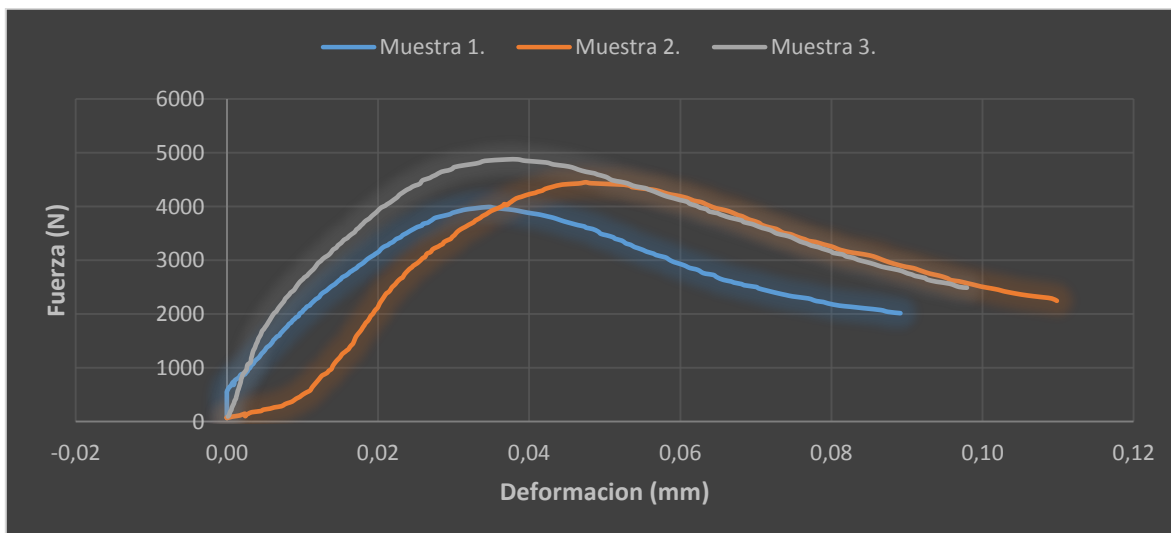


Ilustración 31: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el tercer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 10% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,51MPa., 0,59MPa. Y 0,49MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.53MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

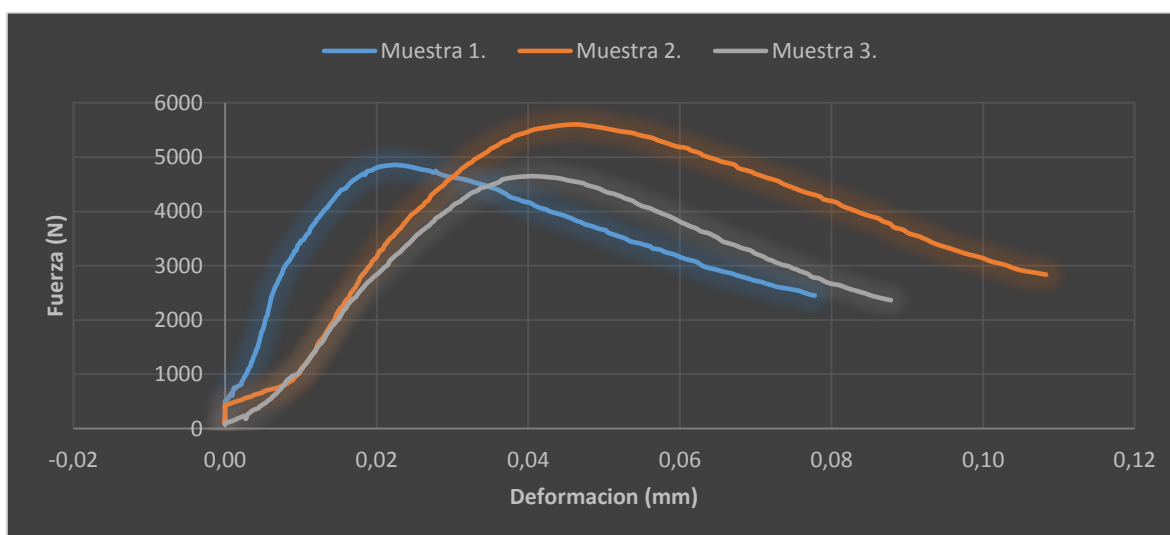


Ilustración 32: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.

Fuente: Elaboración Autores.

Con los valores promedios obtenidos se realizó la gráfica de proyección de la cantidad de cemento a utilizar con respecto a la resistencia deseada, en el caso de las briquetas con un 12.5% de poliestireno, se requiere un porcentaje de cemento del 32% para lograr una resistencia de 2,1 MPa.:

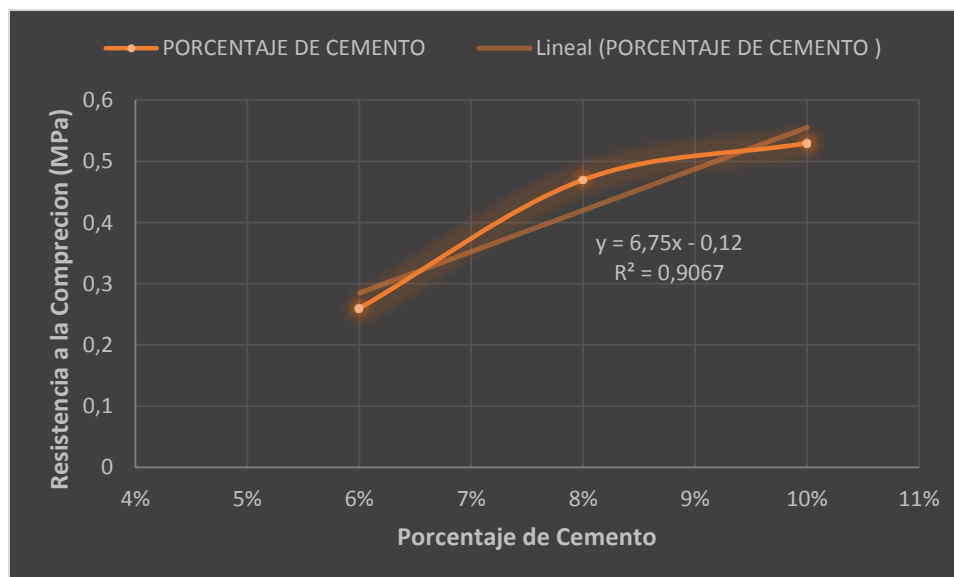


Ilustración 33: Proyección Contenido de Cemento, 12,5% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.4.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 6% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,27MPa., 0,21MPa. y 0,33MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0,27MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

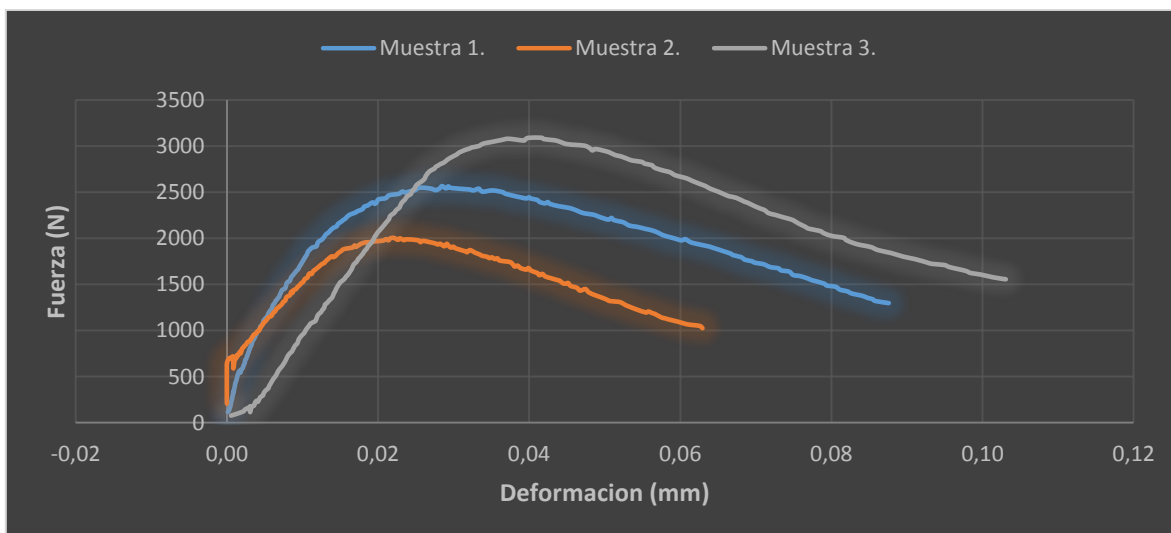


Ilustración 34: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el segundo caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 8% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,50MPa., 0,36MPa. y 0,43MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0,43MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

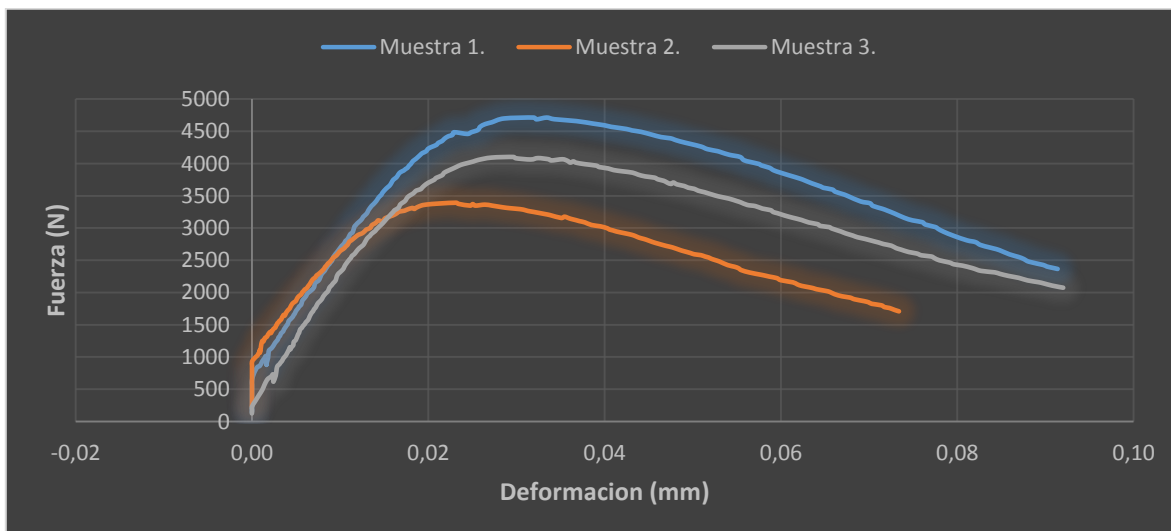


Ilustración 35: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el tercer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 10% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,58MPa., 0,51MPa. y 0,47MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.52MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

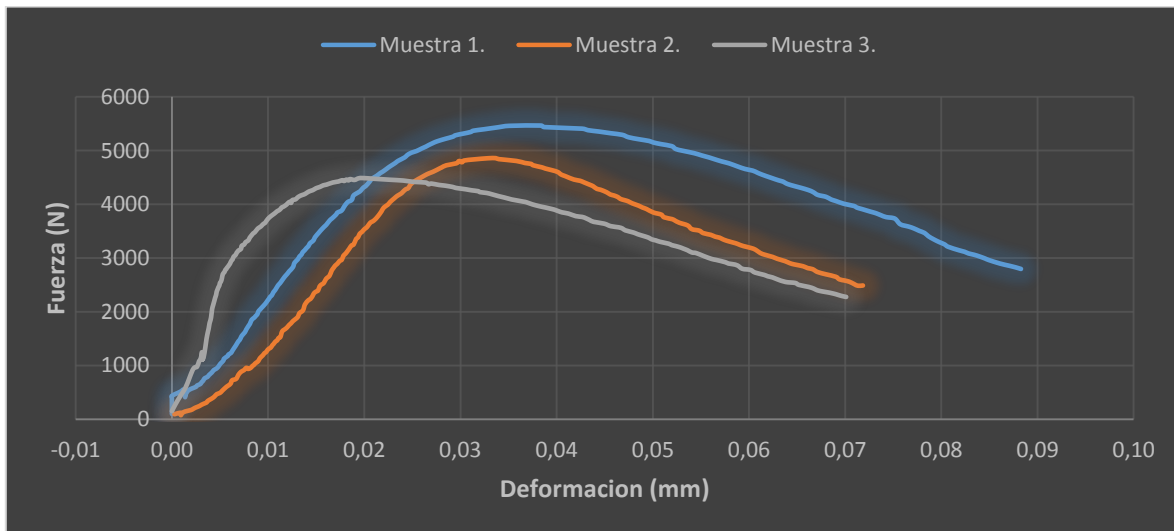


Ilustración 36: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.

Fuente: Elaboración Autores.

Con los valores promedios obtenidos se realizó la gráfica de proyección de la cantidad de cemento a utilizar con respecto a la resistencia deseada, en el caso de las briquetas con un 25% de poliestireno, se requiere un porcentaje de cemento del 35% para lograr una resistencia de 2,1 MPa.:

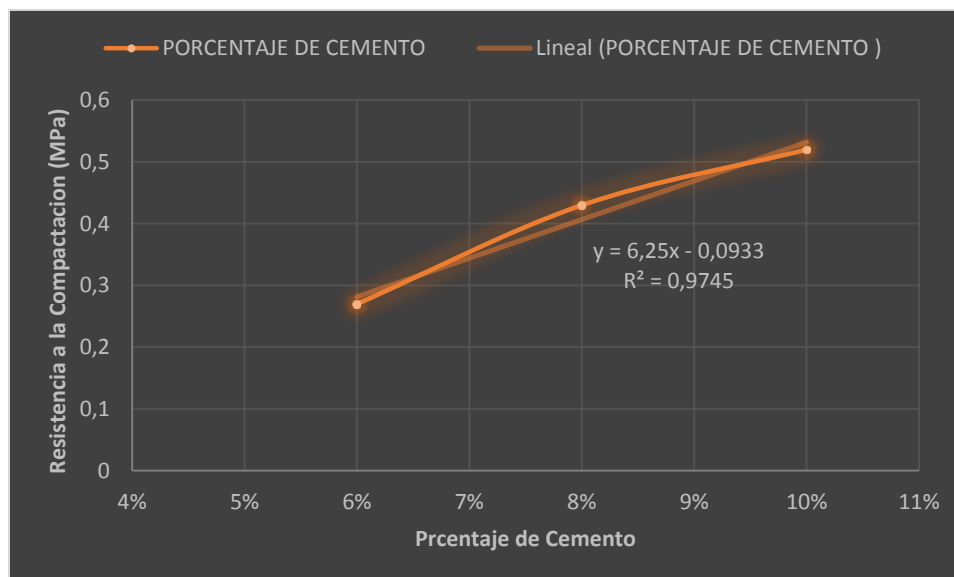


Ilustración 37: Proyección Contenido de Cemento, 25% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.4.1.4. Suelo-Cemento (37,5% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 6% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,19 MPa., 0,18 MPa. Y 0,21MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.19MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

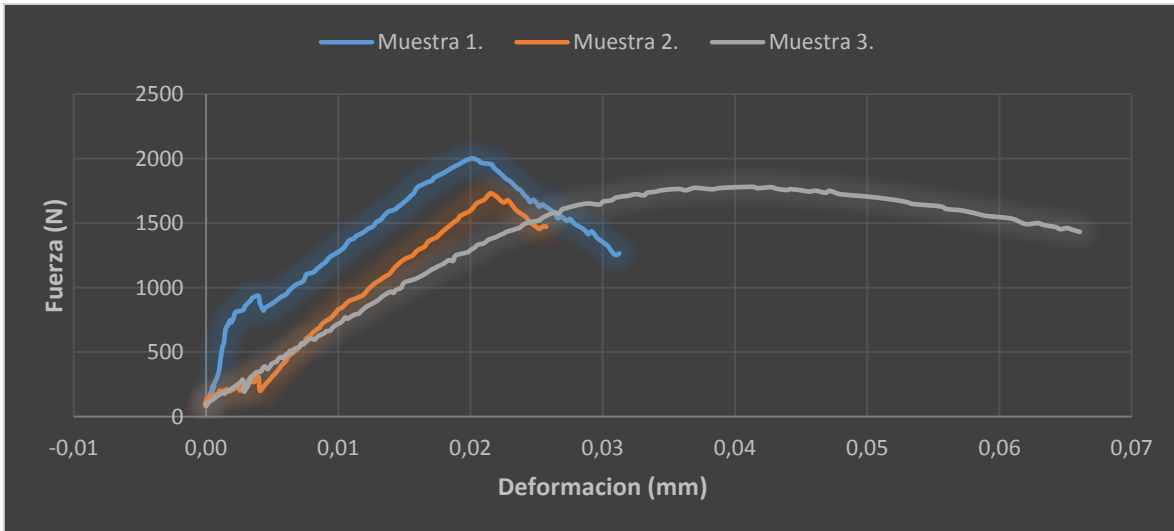


Ilustración 38: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el segundo caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 8% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,34MPa., 0,33MPa. Y 0,35MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.34MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

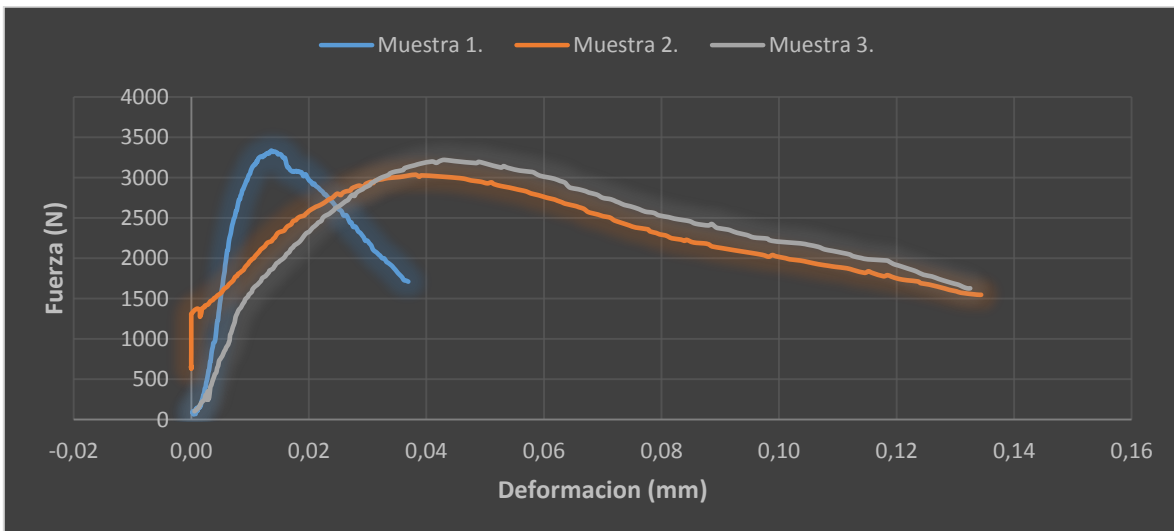


Ilustración 39: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el tercer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 10% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,49MPa., 0,40MPa. y 0,42MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.44MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

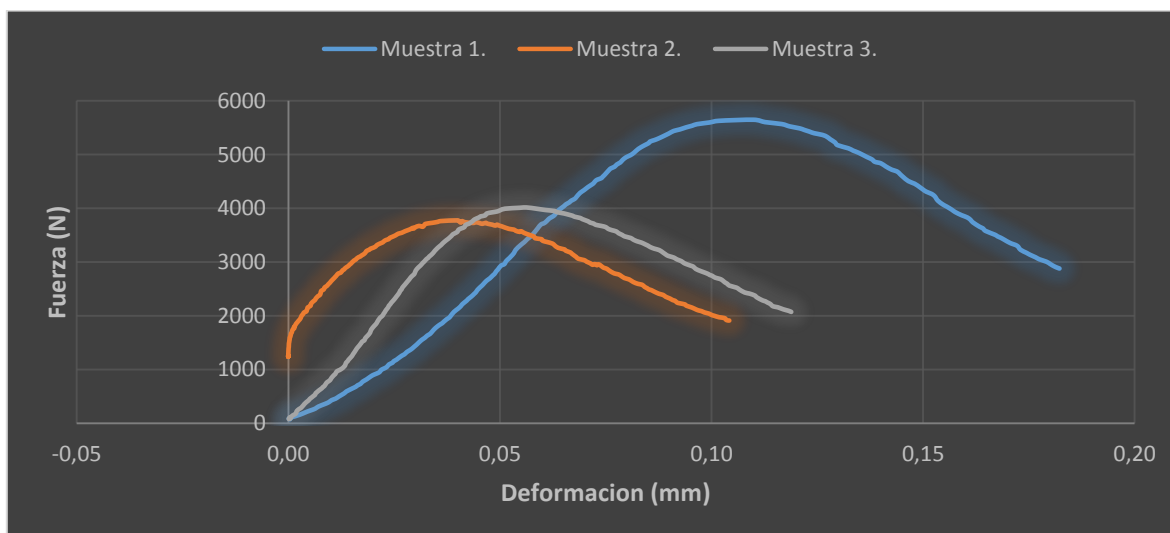


Ilustración 40: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.

Fuente: Elaboración Autores.

Con los valores promedios obtenidos se realizó la gráfica de proyección de la cantidad de cemento a utilizar con respecto a la resistencia deseada, en el caso de las briquetas con un 37.5% de poliestireno, se requiere un porcentaje de cemento del 36% para lograr una resistencia de 2,1 MPa.:

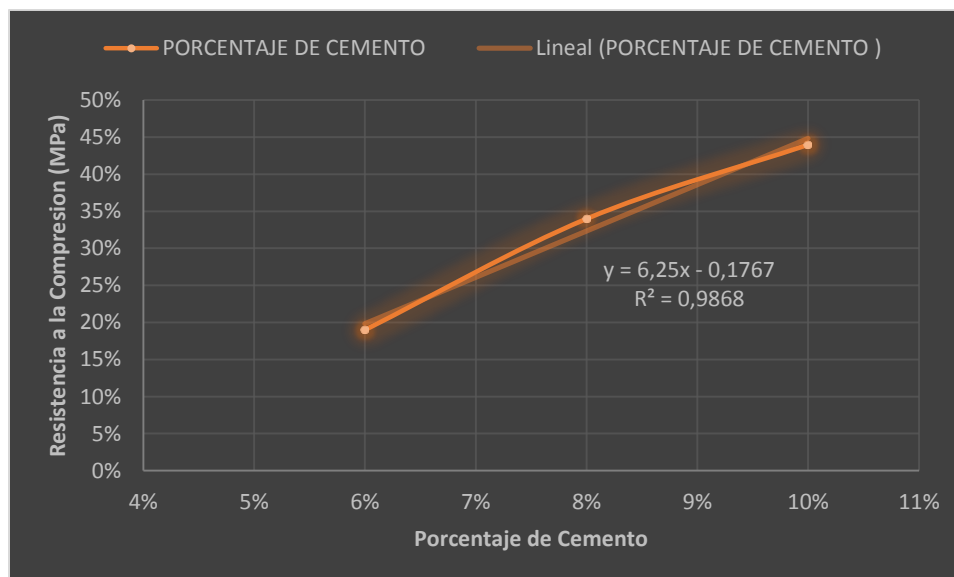


Ilustración 41: Proyección Contenido de Cemento, 37,5% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.4.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 6% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,17 MPa., 0,18 MPa., 0,26 MPa. y 0,22 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.21 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

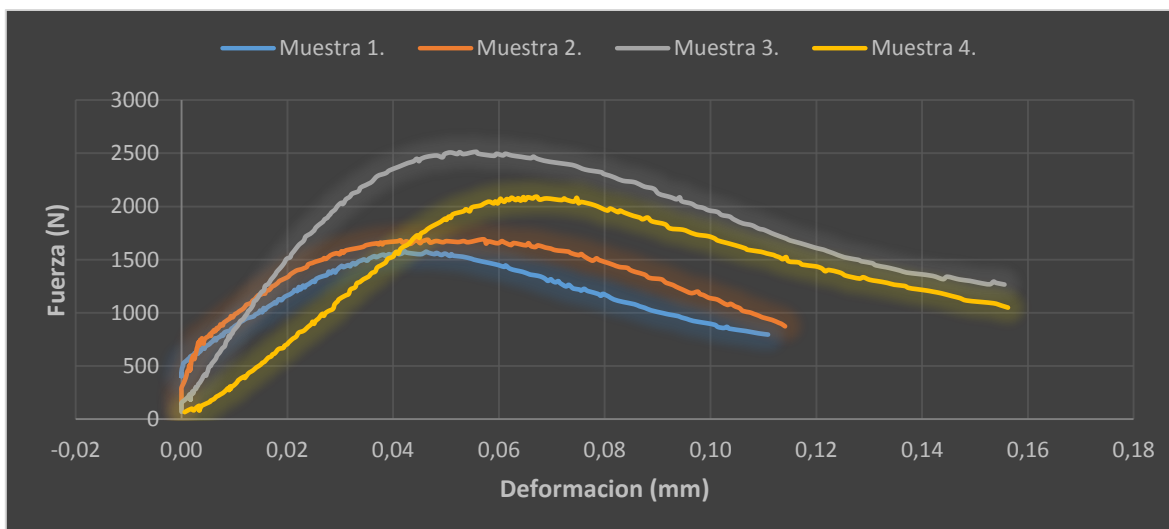


Ilustración 42: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 6%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el segundo caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 8% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,37 MPa., 0,35 MPa., 0,37 MPa. y 0,41 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0,38 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

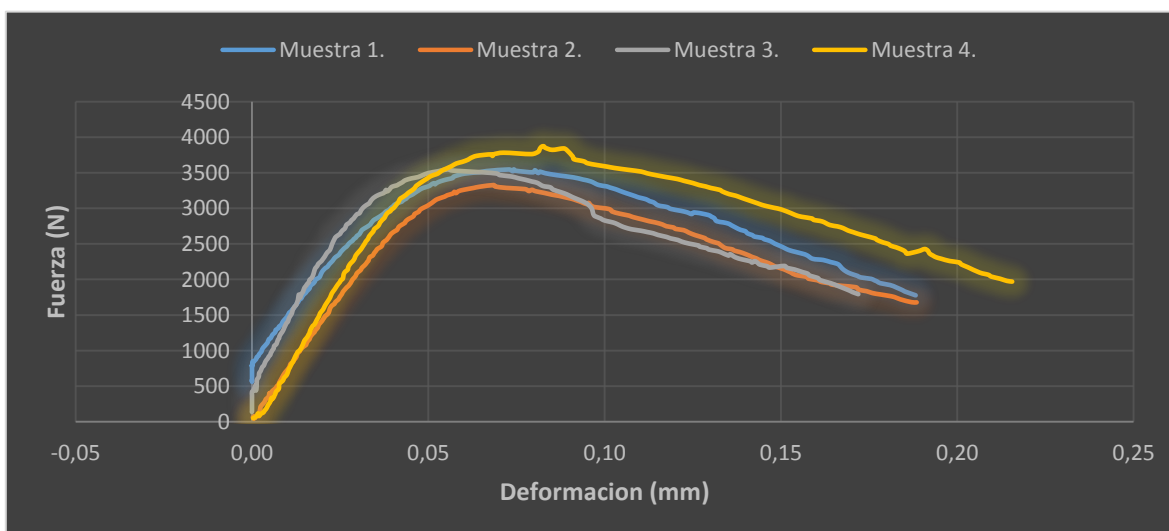


Ilustración 43: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 8%.

Fuente: Elaboración Autores.

Para el tercer caso donde se requiere de un porcentaje de cemento equivalente al 10% se obtuvieron valores de resistencia a la compresión de 0,49 MPa., 0,40 MPa. y 0,42 MPa. Teniendo como valor promedio para la elaboración de la gráfica 0.44 MPa. A continuación se muestra la gráfica donde se encuentra representado cada uno de los ensayos realizados:

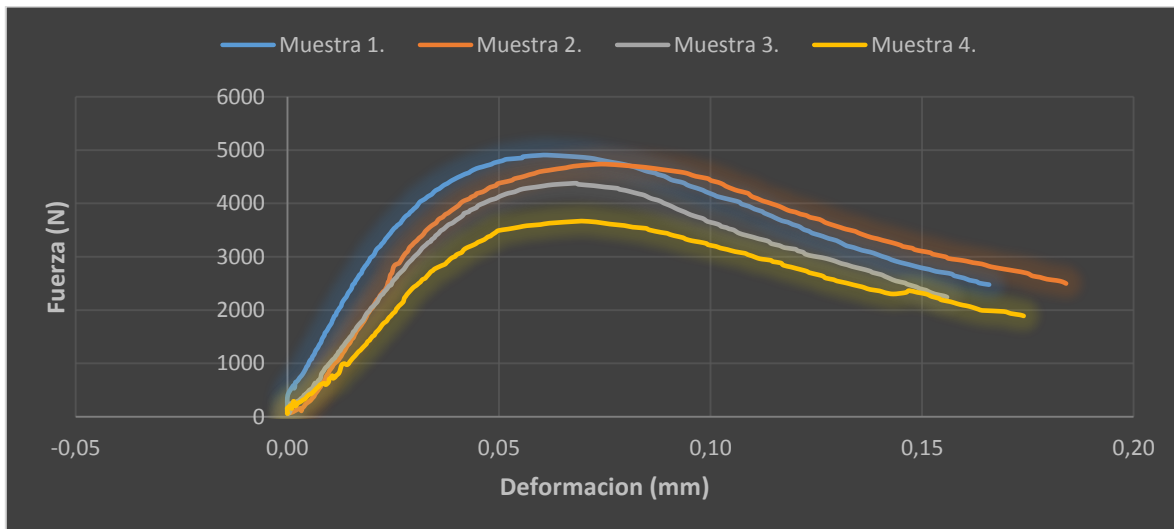


Ilustración 44: Ensayo Compresión, Curva Fuerza-Deformación, Contenido de cemento de 10%.

Fuente: Elaboración Autores.

Con los valores promedios obtenidos se realizó la gráfica de proyección de la cantidad de cemento a utilizar con respecto a la resistencia deseada, en el caso de las briquetas con un 50% de poliestireno, se requiere un porcentaje de cemento del 36% para lograr una resistencia de 2,1 MPa.:

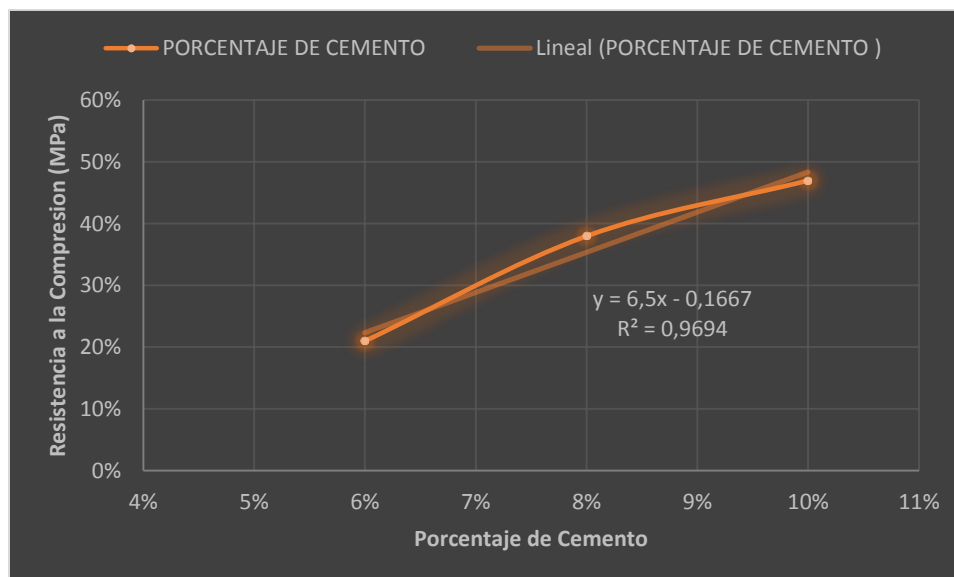


Ilustración 45: Proyección Contenido de Cemento, 50% Poliéstireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

A continuación se muestra la recopilación de datos necesarios para la elaboración de las briquetas finales, mostrando la humedad y porcentajes de cemento óptimos:

Tabla 19: Contenidos Óptimos de Humedad y Cemento para el Total de Sustituciones de Poliéstireno Expandido.

Briqueta	Humedad Óptima (%)	Densidad Optima Kg/m ³	Cemento Óptimo (%)
0% EPS	13,40	18112,5	30.0
12.5 % EPS	15,50	17789,8	32.0
25.0 % EPS	15,65	17615,2	35.0
37.5 % EPS	16,50	17253,2	36.0
50.0 % EPS	16,48	16208,5	35.0

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 20: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Resistencia a la Compresión.

Ensayo	Norma del Ensayo o INVE	Material		Requisitos Según Art. 350 - 13 INVIAS	Resultado (Mpa)	Resultado Proyectado		Cumple
		Muestra	Cemento			Cemento	Resistencia (Mpa)	
Resistencia a la Compresión	E-614	0,0% EPS	6%	N.P.	0,197	30,00%	2,1	Si Cumple
			8%		0,473			
			10%		0,507			
		12,5% EPS	6%	N.P.	0,263	32,00%	2,1	Si Cumple
			8%		0,467			
			10%		0,530			
		25,0% EPS	6%	N.P.	0,270	35,00%	2,1	Si Cumple
			8%		0,430			
			10%		0,520			
		37,5% EPS	6%	N.P.	0,193	36,00%	2,1	Si Cumple
			8%		0,337			
			10%		0,437			
50,0% EPS	6%	N.P.	0,208	35,00%	2,1	Si Cumple		
	8%		0,375					
			10%		0,468			

N.P. = No Presenta, N.A. = No Aplica

Fuente: Elaboración Autores.

3.5. HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MUESTRAS COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO – NORMA INVE – 612 – 13

El ensayo de humedecimiento y secado permite determinar los cambios de volumen, cambios de humedad y pérdidas, debidos a procesos seguidos de humedecimiento y secado de briquetas compactadas de suelo-cemento. Este ensayo se realizó según la Norma INVE 612 – 13, el cual se elaboraron 12 briquetas, dos por cada porcentaje de Poliestireno Expandido establecidos en el anteproyecto (0%, 12,5%, 25%, 37,5% y 50%) y una repetitividad en el porcentaje de 25%; enumeradas con el número 1 y número 2 (ver Imagen No. 6) por cada una de las dos briquetas de cada porcentaje de Poliestireno Expandido, siendo las briquetas enumeradas con el número 1 las que se determinaron el

cambio de volumen y de humedad, y para las briquetas con el número 2 se determinaron las pérdidas.



Ilustración 46: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Proceso de Cámara Húmeda

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1. Control de Humedecimiento y Secado de Muestras Compactadas de Suelo-Cemento

Para la elaboración de las briquetas, se realizaron los mismos procedimientos de compactación del ensayo de Proctor (Norma INV E 611 – 13), en los moldes de 101.6 mm de diámetro y 116.4 mm de altura de tubos de PVC, los cuales se fabricaron para poder realizar el desmoldado de los especímenes sin alterarlos. Ya habiendo elaborado las briquetas, se midió el diámetro, altura y peso de cada una de ellas, siendo el primer dato de inicio como referencia para el cálculo de cambio volumétrico y cambio de densidad; enseguida se dejaron en curado durante 7 días para la hidratación del cemento.

Habiendo transcurrido el periodo de curado, inician los ciclos de humedecimiento y secado; las briquetas, comienzan un ciclo con humedecimiento en agua durante 5 horas, luego se dejan en el horno a una temperatura de 71 ° C. durante 42 horas (ver Ilustración No. 47); se tomaron las mediciones de diámetro, altura y peso para las briquetas marcadas con el número 1, para las briquetas marcadas con el número 2 se raspo con un cepillo de cedras de alambre alrededor del eje longitudinal de los especímenes con 20 pasadas y a los dos bordes 4 pasadas por cada uno (ver Ilustración No. 48), posterior a ello se realiza el pesaje

de las mismas. Los pasos anteriormente mencionados equivales a un ciclo de la prueba, en total se realizaron 12 ciclos.



Ilustración 47: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Ciclos de curado y Exposición a Temperatura – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

Al finalizar los 12 ciclos, se dejaron las briquetas en el horno durante 12 horas a una temperatura de 110 °C, para obtener la masa seca al horno, para calcular el porcentaje de pérdidas suelo-cemento.



Ilustración 48: Humedecimiento y Secado de briquetas de Suelo-Cemento – Raspado de Briquetas – Desarrollo Propio.

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1.1. Suelo-Cemento (0% Poliestireno Expandido)

Para el primer caso de análisis con una sustitución equivalente al 0%, las briquetas dispuestas para el ensayo nos arrojan un cambio volumétrico máximo de 4,88% y un contenido de humedad máximo de 11,65%. Las pérdidas de la mezcla compactada presentan un valor de 8,89%, cumpliendo con el límite dado por el artículo 350 – 13 del INVIAS, donde las pérdidas no podían exceder un 10% (Tabla 7).

A continuación se presenta la gráfica con los valores de cambio volumétrico y humedad para cada uno de los ciclos:

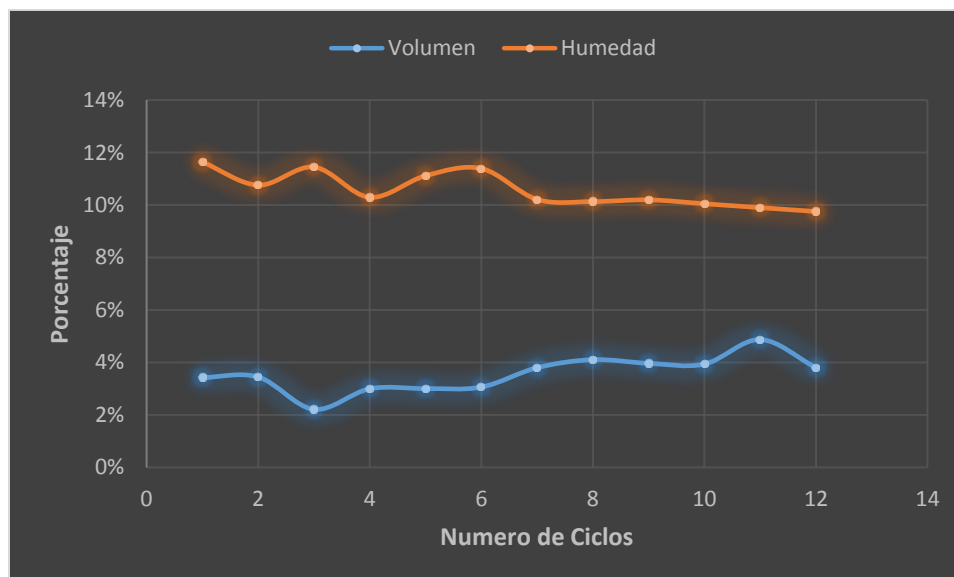


Ilustración 49: Variación Volumétrica y de Humedad, 0% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1.2. Suelo-Cemento (12,5% Poliestireno Expandido)

Para el segundo caso de análisis con una sustitución equivalente al 12,5%, las briquetas dispuestas para el ensayo nos arrojan un cambio volumétrico máximo de 5,13% y un contenido de humedad máximo de 9,37%. Las pérdidas de la mezcla compactada presentan un valor de 8,29%, cumpliendo con el límite dado por el artículo 350 – 13 del INVIAS, donde las pérdidas no podían exceder un 10% (Tabla 7).

A continuación se presenta la gráfica con los valores de cambio volumétrico y humedad para cada uno de los ciclos:

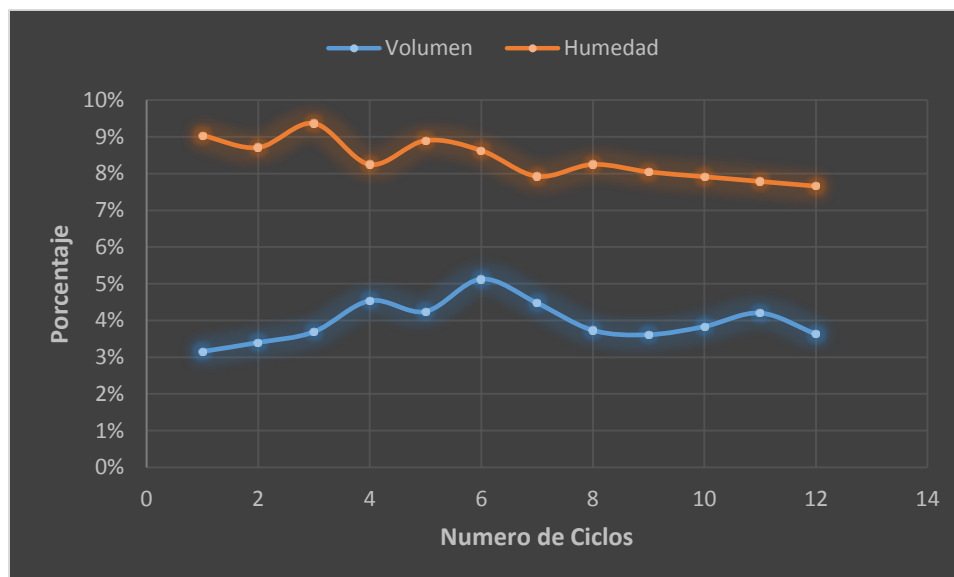


Ilustración 50: Variación Volumétrica y de Humedad, 12,5% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1.3. Suelo-Cemento (25% Poliestireno Expandido)

Para el tercer caso de análisis con una sustitución equivalente al 25%, las briquetas dispuestas para el ensayo nos arrojan un cambio volumétrico promedio de 2,28% y un contenido de humedad promedio de 10,44%. En este caso no se obtienen valores promedios ya que para este porcentaje se maneja repetitividad para la realización del ensayo. Las pérdidas de la mezcla compactada presentan un valor promedio de 9,45%, cumpliendo con el límite dado por el artículo 350 – 13 del INVIAS, donde las pérdidas no podían exceder un 10% (Tabla 7).

A continuación se presentan las gráficas con los valores de cambio volumétrico y humedad para cada uno de los ciclos:

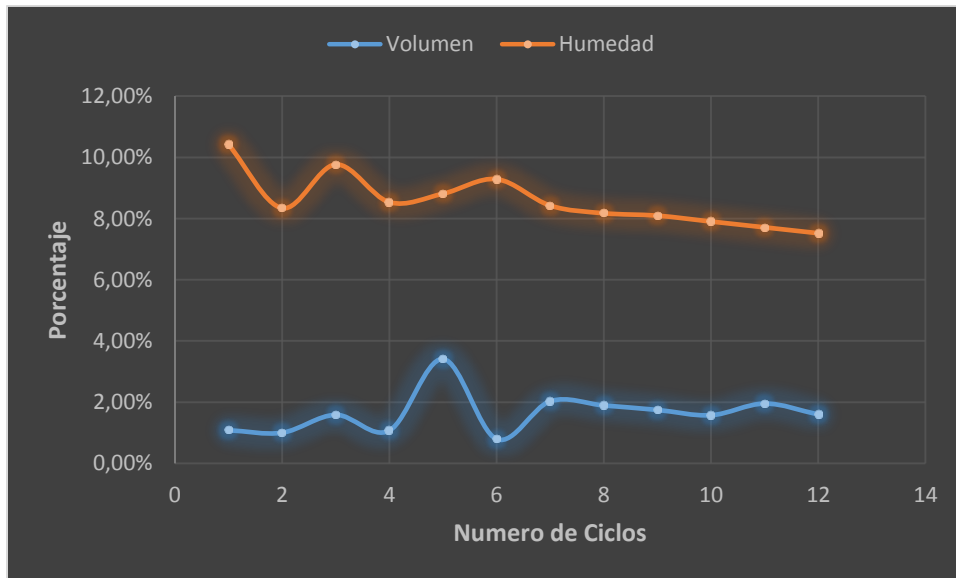


Ilustración 51: Variación Volumétrica y de Humedad, 25% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

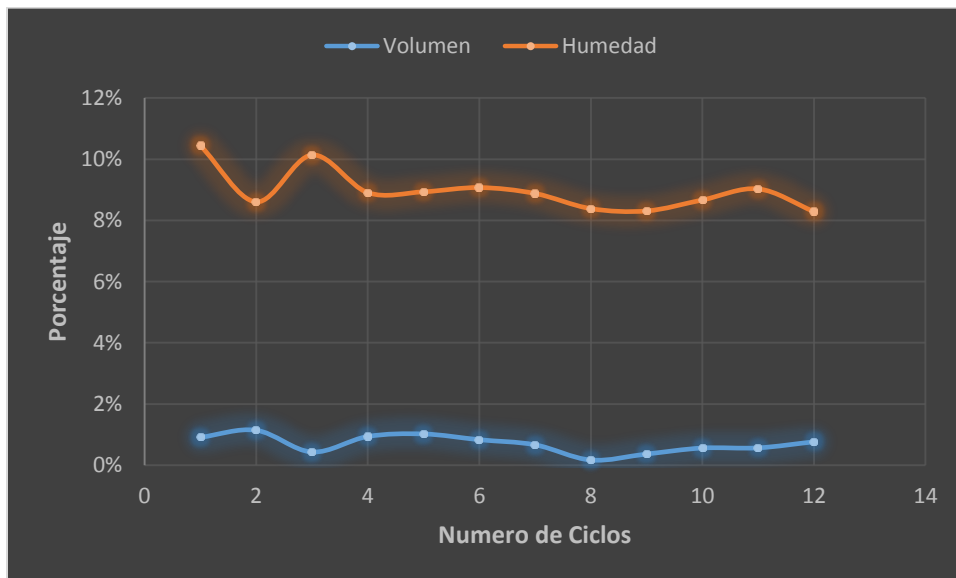


Ilustración 52: Variación Volumétrica y de Humedad - Repetibilidad, 25% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1.4. Suelo Cemento (37,5% Poliestireno Expandido)

Para el cuarto caso de análisis con una sustitución equivalente al 37,5%, las briquetas dispuestas para el ensayo nos arrojan un cambio volumétrico máximo de 3,89% y un contenido de humedad máximo de 11,65%. Las pérdidas de la mezcla compactada presentan un valor de 10,43%, este valor sobrepasa el límite dado por el artículo 350 – 13 del INVIAS, donde las pérdidas no podían exceder un 10% (Tabla 7).

A continuación se presenta la gráfica con los valores de cambio volumétrico y humedad para cada uno de los ciclos:

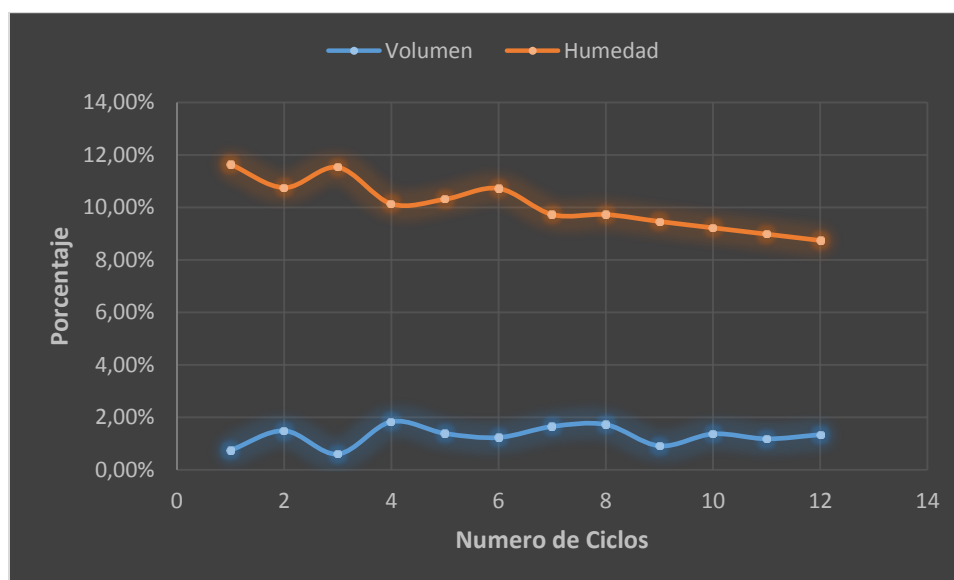


Ilustración 53: Variación Volumétrica y de Humedad, 37,5% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

3.5.1.5. Suelo-Cemento (50% Poliestireno Expandido)

Para el quinto caso de análisis con una sustitución equivalente al 50%, las briquetas dispuestas para el ensayo nos arrojan un cambio volumétrico máximo de 1,83% y un

contenido de humedad máximo de 14,75%. Las pérdidas de la mezcla compactada presentan un valor de 11,73%, este valor sobrepasa el límite dado por el artículo 350 – 13 del INVIAS, donde las pérdidas no podían exceder un 10% (Tabla 7).

A continuación se presenta la gráfica con los valores de cambio volumétrico y humedad para cada uno de los ciclos:

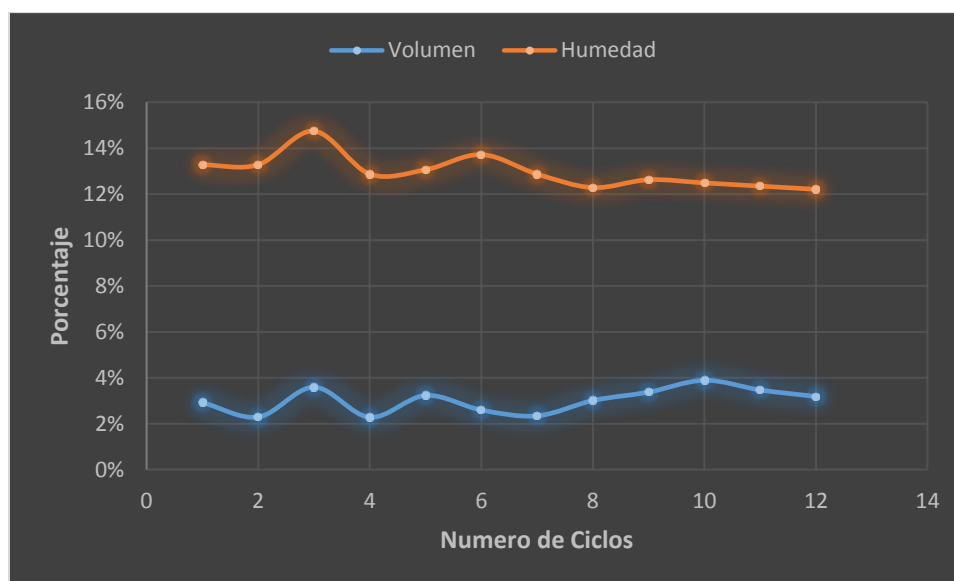


Ilustración 54: Variación Volumétrica y de Humedad, 37,5% Poliestireno Expandido.

Fuente: Elaboración Autores.

A continuación se muestra la variación volumétrica y el contenido de humedad más altos para cada porcentaje de sustitución:

Tabla 21: Valores Máximos Variación Volumétrica y Perdidas de Mezcla Compactada.

Porcentaje	Perdidas	Δ Volumétrica
0,0% EPS	8,89%	4,88%
12,5% EPS	8,29%	5,13%
25,0% EPS	9,44%	3,42%
25% EPS(R)	9,46%	1,14%
37,5% EPS	10,43%	1,83%
50,0% EPS	11,73%	3,89%

Fuente: Elaboración Autores.

Tabla 22: Tabla Resumen de Resultados Obtenidos de Durabilidad.

Ensayo	Noma del Ensayo INVE	Mezcla	Requisitos Según Art. 350 - 13 INVIAS	Resultado		Cumple
				Δ Volumétrica	Perdidas	
Durabilidad (Perdidas de Suelo- Cemento)	E-612	0,0% EPS	Max. 10%	4,88%	8,89%	Si Cumple
		12,5% EPS		5,13%	8,29%	Si Cumple
		25,0% EPS		3,42%	9,44%	Si Cumple
		25% EPS(R)		1,14%	9,46%	Si Cumple
		37,5% EPS		1,83%	10,43%	N.A.
		50,0% EPS		3,89%	11,73%	N.A.

N.P. = No Presenta, N.A. = No Aplica

Fuente: Elaboración Autores.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

- El primer aspecto a mencionar es la humedad óptima de compactación de las muestras de suelo-cemento. Esta humedad se encuentra en un rango de valores entre el 13% y el 16%, siendo valores considerables; un suelo arenoso presenta humedades optimas entre 3% y 6%, pero para el suelo trabajado en el proyecto, por su contenido de limos aproximado al 30% requiere de una mayor cantidad de agua para encontrar su punto de humedad optima, debido a que es un material semi-impermeable (Institute Interlocking Concrete Pavement, 2007). Además se encontró que la cantidad de agua requerida para la compactación tiene una relación directamente proporcional a la cantidad de poliestireno expandido sustituido en la mezcla, esto se debe a que este material está compuesto en un 95% de gas, el cual al momento de realizar la mezcla es ocupado por el agua (ver ilustración 55).

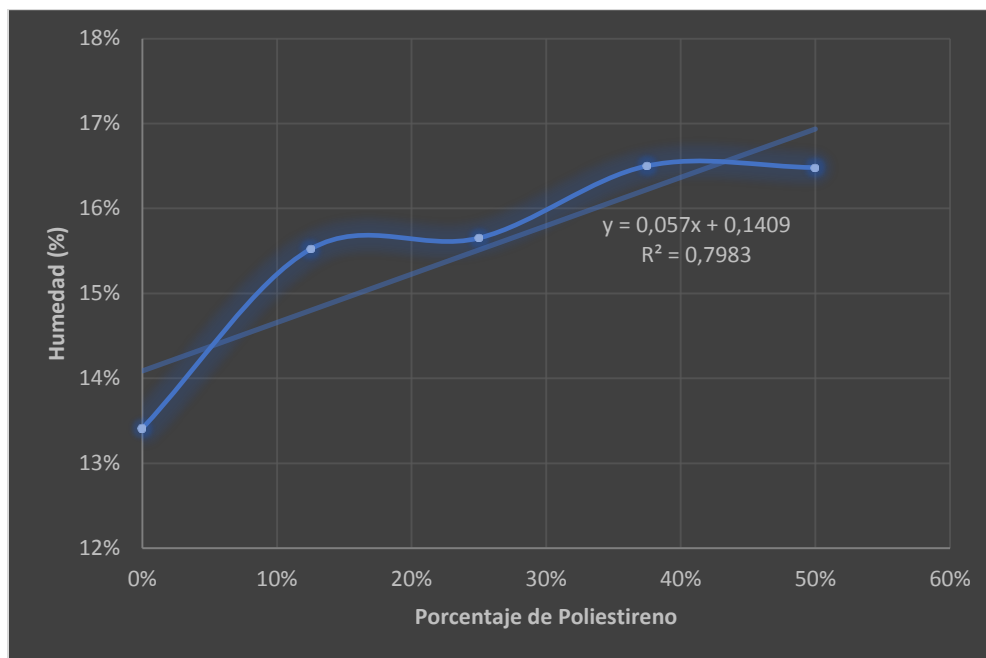


Ilustración 55: Humedad Óptima Vs. Contenido de Poliestireno.

Fuente: Elaboración Autores.

- El segundo aspecto a identificar es la densidad seca máxima de la mezcla de suelo-cemento, aquí se puede observar como la densidad presenta una relación inversamente proporcional con respecto al porcentaje de poliestireno que contiene la muestra; se evidencia una disminución del 10% en la densidad desde su punto más alto hasta su punto más bajo, esto se debe a que el peso del poliestireno es muy bajo en relación al volumen que ocupa, haciendo que en las muestras con un alto contenido del mismo el peso total del espécimen disminuya (ver ilustración 56).

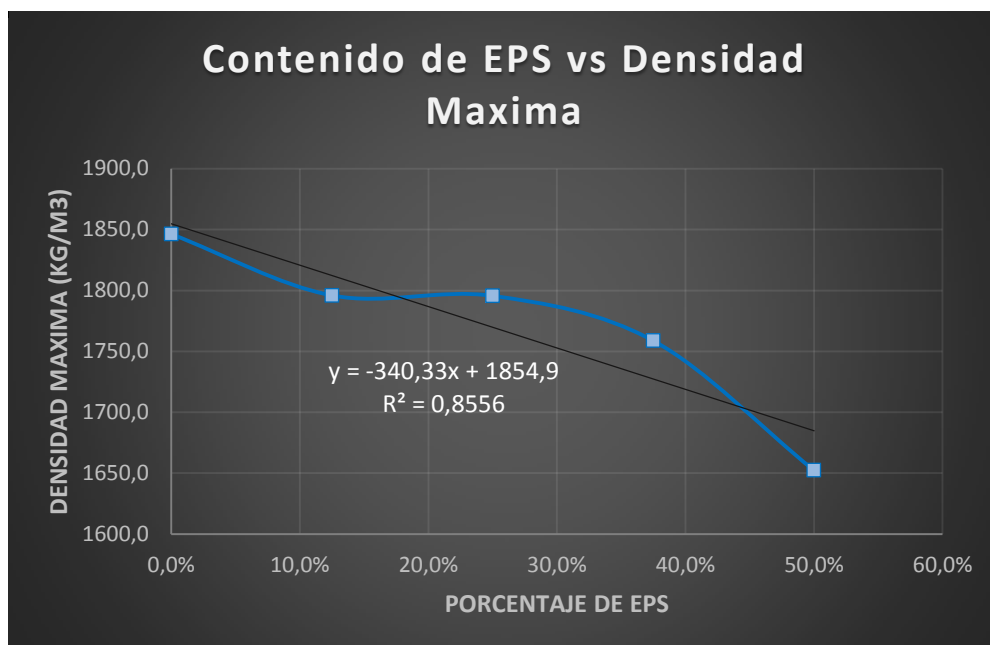


Ilustración 56: Densidad Máxima Vs. Contenido de Poliestireno.

Fuente: Elaboración Autores.

- Como tercer aspecto tenido en cuenta en el proyecto se tiene el contenido de cemento óptimo para lograr una resistencia de 2,1 MPa. este porcentaje se encuentra en un rango de valores entre 30% y 36%, siendo un porcentaje bastante considerable, ya que generalmente la estabilización de suelos con cemento maneja porcentajes de cemento entre el 7% y el 15% de acuerdo al tipo de suelo a estabilizar (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2008), esto se debe a que el suelo estudiado en el proyecto presenta propiedades mecánicas no

competentes, es especial su componente fino, ya que los limos encontrados en la muestra presentan bajas resistencias al corte y compresibilidades bastante elevadas (Institute Interlocking Concrete Pavement, 2007). Además de esto se observa que porcentaje de cemento presenta una relación directamente proporcional al contenido de poliestireno sustituido, ya que con lo observado durante el desarrollo de los ensayos se apreció que la adherencia del poliestireno a la mezcla es bastante baja (ver ilustración 57).

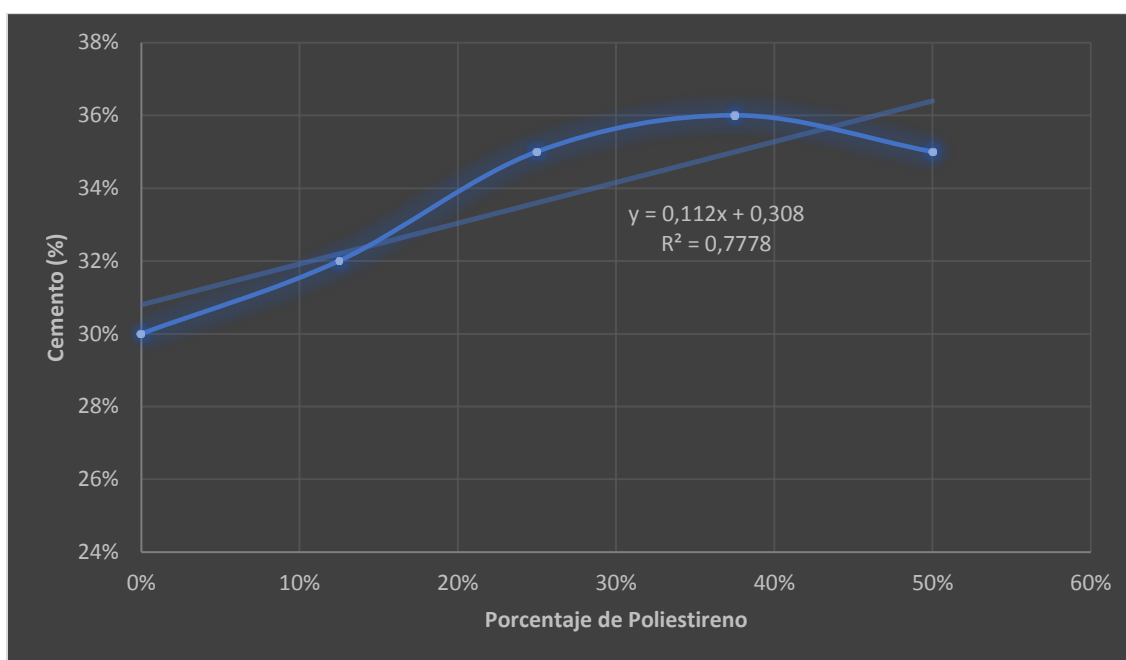


Ilustración 57: Contenido de Cemento Vs. Contenido de Poliestireno.

Fuente: Elaboración Autores.

- Un cuarto aspecto tenido en cuenta en el proyecto son las pérdidas de la mezcla de suelo-cemento luego del raspado de las briquetas con las cerdas de alambre, simulando el uso del suelo. Se observó una relación directamente proporcional entre la cantidad de poliestireno expandido y el desgaste de las briquetas compactadas, donde los dos últimos porcentajes de sustitución (37,5% y 50%) exceden el límite permitido de pérdidas del 10% (ver ilustración 58). Con lo evidenciado en el

desarrollo de la prueba se logra observar que con una cantidad considerable de poliestireno dentro de la muestra, la adherencia del material disminuye, los que ocasiona que ante la simulación de uso se pierda una cantidad de material mayor.

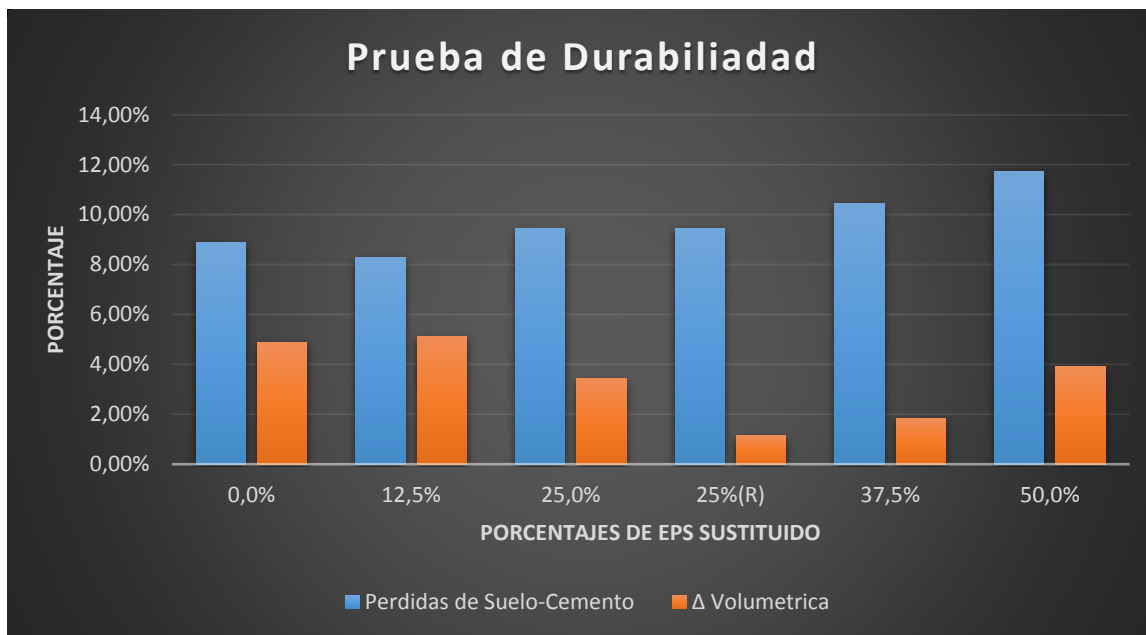


Ilustración 58: Valores Máximos Variación Volumétrica y Perdidas de Mezcla Compactada.

Fuente: Elaboración Autores.

- Con respecto a los cambios volumétricos y de humedad (contracción y expansión) registrados en las briquetas de ensayo encontramos niveles aceptables de los mismos; para el caso de la expansión de los suelos, teniendo en cuenta la humedad del mismo se tiene que la mezcla se encuentra en un rango bajo a medio, presentando los valores más altos en los porcentajes de sustitución mayores (37,5% y 50%)(Osorio, 2010), con respecto a los cambios volumétricos, para todas las sustituciones realizadas, no exceden el 5% con respecto al punto de muestra inicial (antes de iniciar el proceso de curado).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se elaboró un suelo estabilizado con cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido en una fracción granular correspondiente al 10 %, encontrando el porcentaje de sustitución del 25 % es el que mayor cantidad de poliestireno nos permite usar dentro de la mezcla de suelo cemento, cumpliendo con las especificaciones dispuestas en el artículo 350-13 INVIAS.
- Se evaluó las características mecánicas de un suelo estabilizado con cemento, mezclado con poliestireno expandido, encontrando que la humedad óptima se hace mayor a medida que se agrega la cantidad de poliestireno expandido. En cambio la densidad seca máxima disminuye a medida que se aumenta la cantidad de poliestireno.
- Se identificó como se ve afectada la durabilidad de un suelo cemento mezclado con poliestireno expandido; encontrando que la cantidad de cemento requerido, aumenta a medida que se agrega poliestireno expandido.
- Con base a las conclusiones analizadas anteriormente se realizan las siguientes recomendaciones en cuanto al uso de mezclas de suelo-cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido: Sabiendo que el material sustituido (poliestireno expandido) es reemplazado en una fracción granular equivalente al 10% del total de suelo se desestiman las sustituciones con el porcentaje de poliestireno de 37,5% y 50%, ya que aunque estos porcentajes cumplen con la resistencia requerida de 2,1 MPa. sus porcentajes de pérdidas sobrepasan el límite de 10% dispuesto por el artículo 350 – 13 del INVIAS.
- Se demuestra la viabilidad del uso del poliestireno expandido en mezclas de suelo cemento, ya que al observar la diferencia en la cantidad de cemento para las diferentes sustituciones de poliestireno expandido, se aprecia un aumento muy mínimo de dicho material.
- Como primera recomendación, se sugiere el empleo de un material granular con mejores características mecánicas, ya que como se evidencia en el proyecto se

arranca con una cantidad de cemento del 30% para la sustitución de 0% de poliestireno expandido, siendo un material granular de muy mal calidad.

- Como segunda recomendación, se propone el uso de poliestireno expandido con diferentes densidades para la sustitución, con el fin de determinar la viabilidad en las diferentes clases del material.
- Con los cambios anteriormente mencionados, se recomienda revisar la cantidad de cemento que utilizaría la muestra, pues de esta también depende la viabilidad a futuro de su uso. Como se observa en nuestro proyecto, aunque la variación de cemento es muy baja, el porcentaje de cemento es muy alto (35%), aunque desde el punto de vista ambiental se hace viable, desde el punto de vista económico no sería viable porque la cantidad de cemento a utilizar sería muy alto para estabilizar sustituyendo partículas de poliestireno expandido.

BIBLIOGRAFIA

- ANAPE. (2011). El Uso del Poliestireno Expandido en Obras de Ingenieria Civil . *Arte y cemento* , 56-60.
- Andrade Moreno , L. F. (18 de Septiembre de 2012). *Agencia Nacional de Infraestructura*. Obtenido de Cuarta Generacion de Concesiones Viales en Colombia: http://www.ani.gov.co/sites/default/files/cuarta_generacion_de_concesiones_luis_fernando_andrade_moreno.pdf
- Cemex. (2014). *Cemex*. Obtenido de Soluciones para el Constructor: <http://www.cemexcolombia.com/SolucionesConstructor/UsosGeneral.aspx>
- Figuroa Infante , A. S., & Reyes Lizcano, F. A. (2007). Caracterizacion Fisica de un Asfalto Modificado con Poliestireno y Llantita Triturada . *Epsilon No. 9*, 41-55.
- Giraldo Ruiz , J. C., & Suarez Gamarra, A. F. (2004). El Caucho de Llantitas Usadas Como Material para Bases Granulares y Llenos Estructurales. *Ingenierias - Universidad de Medellin*, 109-122.
- Holcim. (2014). *Holcim*. Obtenido de Cemento Hidraulico para la Estabilizacion de Suelos: www.holcim.com.ec/fileadmin/templates/EC/doc/folletos/Cemento_Holcim_Base_Vial.pdf
- ICOFORMAS. (2014). *ICOFORMAS*. Obtenido de Materias Primas: <http://icoformas.com.co/materias-primas.html>
- Institute Interlocking Concrete Pavement. (2007). Construcción de Pavimentos de Adoquines de Concreto. *ICPI Tech Spec*.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (2008). Suelo-Cemento Primera Parte. *Construcción y Tecnología*.

Junca, I. (2014). El Icopor, Una Amenaza Creciente para Bogota. *El Espectador*.

Montejo Fonseca, A. (2002). *Ingenieria de Pavimentos para Carreteras*. Bogota: Ediciones y Publicaciones Universidad Catolica de Colombia.

Osorio, S. (25 de Noviembre de 2010). *Apuntes de Geotecnia con enfasis en laderas*. Obtenido de Apuntes de Geotecnia con enfasis en laderas: www.goetecnia-sor.blogspot.com

SoyECOLombiano. (s.f.). Reciclar, Una Nueva Costumbre. *SoyECOLombiano*, 129-136.

ANEXOS

- ARTICULO INVIAS INV E – 350 – 13 SUELO-CEMENTO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 121 – 13 DETERMINACION DEL CONTENIDO ORGANICO DE UN SUELO MEDIANTE EL ENSAYO DE PERDIDA POR IGNICION. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 123 – 13 DETERMINACION DE LAS TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS DE SUELO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 125 – 13 LÍMITELÍQUIDO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 126 – 13 LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 126 – 13 LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 611 – 13 RELACION HUMEDAD – DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 612 – 13 HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 613 – 13 PREPARACION Y CURADO DE SUELO-CEMENTO PARA PRUEBAS DE COMPRESION Y FLEXION EN EL LABORATORIO. *(Digital)*.
- NORMA DE ENSAYO INV E – 614 – 13 RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO CEMENTO. *(Digital)*.

- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 121 – 13 DETERMINACION DEL CONTENIDO ORGANICO DE UN SUELO MEDIANTE EL ENSAYO DE PERDIDA POR IGNICION. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 123 – 13 DETERMINACION DE LAS TAMAÑOS DE LAS PARTICULAS DE SUELO. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 125 – 13 LIMITE LIQUIDO. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 126 – 13 LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 126 – 13 LIMITE PLASTICO E INDICE DE PLASTICIDAD. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 611 – 13 RELACION HUMEDAD – DENSIDAD DE MEZCLAS DE SUELO CEMENTO. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 612 – 13 HUMEDECIMIENTO Y SECADO DE MEZCLAS COMPACTADAS DE SUELO-CEMENTO. *(Digital)*.
- ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 614 – 13 RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS MOLDEADOS DE SUELO CEMENTO. *(Digital)*.