

**Evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para
uso en vías terciarias**

Valentina Ramírez Triviño

Julio Cesar Hincapié Olano

Asesor:

Ing. Adán Silvestre Gutiérrez

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Pereira

2018

Agradecimientos

Queremos agradecer a Dios, a nuestros padres por
estar presentes y apoyándonos.

A la Ingeniera y especialista en suelos, Gloria
Milena

Al Ingeniero y especialista en materiales Adán
Silvestre G.

Cristian Amariles L.

Por todo el apoyo brindado en la ejecución de los
laboratorios.

A las canteras:

Agregados de Occidente
Combia

Al Programa de Ingeniería Civil de la Universidad

Libre seccional Pereira, por brindarnos calidad
humana y profesional y por influenciar
positivamente en nuestra formación profesional

Tabla de contenido

Agradecimientos	1
1. Resumen	8
1. Abstract	10
2. Aspectos generales del proyecto	11
2.1 Descripción del problema	11
2.2 Formulación del problema	12
2.3 Justificación	12
2.4 Delimitaciones	14
3. Objetivos	15
3.1 Objetivo general	15
3.2 Objetivos específicos	15
4. Hipótesis	16
5. Antecedentes	17
5.1 Antecedente 1	17
5.2 Antecedente 2	17
5.3 Antecedente 3	19
5.4 Antecedente 4	20
6. Metodología	21
7. Marco referencial	23
7.1 Marco teórico	23
7.1.1 Esfuerzo en materiales.	23
7.1.2 Comportamiento mecánico de los materiales granulares.	24
7.1.3 Deformación permanente en materiales granulares.	25
7.1.3.1 Influencia del esfuerzo.	26
7.1.3.2 Deformación permanente en función del número de ciclos.	27
7.1.3.3 Deformación permanente en función del esfuerzo.	27
7.1.4 Comportamiento resiliente de materiales granulares.	28
7.1.4.1 Módulo resiliente.	28
7.1.5 Valor del índice de rodamientos de California (CBR).	29
7.2 Marco conceptual	31
7.3 Marco geográfico	36
7.4 Marco normativo	38
7.4.1 Requisitos generales del material a utilizar como sub-base.	41
7.4.2 Requisitos para el material PET.	42

7.4.3 Plan de ensayos.	42
8. Caracterización de materiales.....	43
8.1 Sub base granular:	43
8.1.1 Granulometría E-213.	44
8.1.2 Desgaste de máquina de los ángeles E-218.	46
8.1.3 Equivalente de arena E-133	49
8.1.4 Ensayo de Límites de Consistencia.	53
8.1.5 Sulfatos.	57
8.1.6 Proctor modificado.	61
8.1.7 CBR.....	63
9. Procedimientos de análisis de datos y resultados	65
9.1 Ensayo Granulométrico por Tamizado - E-213 - Cantera Combia – Agregados de Occidente.....	66
9.2 Ensayos de Límites de Consistencia E-125 / E-126	70
9.3 Ensayo Equivalente de Arena E-133	77
9.4 Resistencia a la Degradación a la Abrasión de los Agregados – Máquina de los Ángeles E-218.....	79
9.5 Resistencia a la Degradación a la Abrasión de los Agregados –Micro Deval E-238.....	81
9.6 Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato E-220.....	83
9.7 Relación humedad - peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación o proctor modificado) E -142.....	84
9.8 CBR de suelos compactados en el laboratorio E-148.....	88
10.Conclusiones.....	102
11.Recomendaciones.....	104
12. Bibliografía	105

Tabla de tablas

Tabla 1. <i>Descripción de laboratorios</i>	38
Tabla 2. <i>Ensayos para Caracterización y Selección del material Granular Sub-Base</i>	40
Tabla 3. <i>Requisitos de los agregados para sub-bases granulares</i>	41
Tabla 4. <i>Franjas granulométricas del material sub-base granular</i>	42
Tabla 5. <i>Número de Ensayos en paralelo con los porcentajes de adición PET reciclado en la Sub-base</i>	43
Tabla 6. <i>Tamices para granulometría</i>	46
Tabla 7. <i>Resultados de la granulometría</i>	46
Tabla 8. <i>Granulometría de las muestras de ensayo</i>	47
Tabla 9. <i>Tamices para sulfatos</i>	57
Tabla 10. <i>Especificaciones para CBR</i>	64
Tabla 11. <i>Especificaciones para adición del material PET</i>	65
Tabla 12. <i>Porcentajes retenidos acumulados Cantera Combia</i>	66
Tabla 13. <i>Porcentajes retenidos acumulados Agregados de Occidente</i>	67
Tabla 14. <i>Límites granulométricos Agregados de Occidente</i>	68
Tabla 15. <i>Limites granulométricos Cantera Combia</i>	69
Tabla 16. <i>Pesos obtenidos en función # de golpes Agregados de Occidente</i>	71
Tabla 17. <i>Pesos obtenidos en función # de golpes Cantera Combia</i>	71
Tabla 18. <i>Limite liquido Agregados de Occidente</i>	74
Tabla 19. <i>Índice plástico Agregados Occidente</i>	75
Tabla 20. <i>Limite liquido Cantera Combia</i>	75
Tabla 21. <i>Índice plástico Cantera Combia</i>	76
Tabla 22. <i>Equivalente de arena Agregados Occidente</i>	78
Tabla 23. <i>Equivalente de arena Cantera Combia</i>	78
Tabla 24. <i>Resistencia a la abrasión-Maquina Ángeles- Cantera Combia</i>	80
Tabla 25. <i>Resistencia a la abrasión-Maquina Ángeles Agregados Occidente</i>	80
Tabla 26. <i>Resistencia a la abrasión-Micro-Deval Cantera Combia</i>	81
Tabla 27. <i>Resistencia a la abrasión-Micro-Deval Agregados Occidente</i>	82
Tabla 28. <i>Especificaciones del N° de tamiz y peso para el laboratorio de sulfatos</i>	83
Tabla 29. <i>Peso final laboratorio de sulfatos</i>	834
Tabla 30. <i>Densidad húmeda de subbase Agregados de Occidente</i>	85
Tabla 31. <i>Densidad seca de subbase Agregados de Occidente</i>	85
Tabla 32. <i>Resumen de resultados iniciales</i>	86
Tabla 33. <i>Registros esfuerzo-penetración-Muestra Natural</i>	88

Tabla 34. <i>Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 1.5% de PET</i>	89
Tabla 35. <i>Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 3% de PET</i>	89
Tabla 36. <i>Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 6% de PET</i>	90
Tabla 37. <i>Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 9% de PET</i>	91
Tabla 38. <i>Resultado final de CBR de cada muestra Sub-base</i>	92
Tabla 39. <i>Resumen de resultados</i>	103

Tabla de Figuras

<i>Figura 1. Efectos y causas del problema de investigación.</i>	12
<i>Figura 2. Granulometría por tamizado Agregados de Occidente.</i>	69
<i>Figura 3. Granulometría por tamizado Cantera Combia.</i>	70
<i>Figura 4. Limite líquido 1 C.A. Occidente.</i>	72
<i>Figura 5. Limite líquido 2 C.A. Occidente.</i>	72
<i>Figura 6. Limite líquido 3 C.A. Occidente.</i>	73
<i>Figura 7. Limite líquido 1 C. Combia.</i>	73
<i>Figura 8. Limite líquido 2 C. Combia.</i>	73
<i>Figura 9. Limite líquido 3 C. Combia.</i>	74
<i>Figura 10. Ensayo proctor modificado.</i>	87
<i>Figura 11. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural-10 Golpes.</i>	93
<i>Figura 12. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural-25 Golpes.</i>	93
<i>Figura 13. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural-56 Golpes.</i>	94
<i>Figura 14. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 1.5% PET-10 Golpes</i>	94
<i>Figura 15. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 1.5% PET-25 Golpes.</i>	95
<i>Figura 16. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 1.5% PET-56 Golpes.</i>	95
<i>Figura 17. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 3% PET-10 Golpes.</i>	97
<i>Figura 18. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 3% PET-25 Golpes.</i>	97
<i>Figura 19. Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 3% PET-56 Golpes.</i>	98

<i>Figura 20.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 6% PET-10 Golpes.....	98
<i>Figura 21.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 6% PET-25 Golpes.....	99
<i>Figura 22.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 6% PET-56 Golpes.....	99
<i>Figura 23.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 9% PET-10 Golpes.....	100
<i>Figura 24.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 9% PET-25 Golpes.....	100
<i>Figura 25.</i> Gráfico esfuerzo (MPa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 9% PET-56 Golpes.....	101
<i>Figura 26..</i> Gráfico %PET Vs CBR.....	101

Tabla de Imágenes

<i>Imagen 1:</i> Representación gráfica de esfuerzos en distintos planos.....	24
<i>Imagen 2:</i> Curva típica esfuerzo – deformación en un ciclo de carga y descarga.....	26
<i>Imagen 3:</i> Estructura de un pavimento flexible.....	33
<i>Imagen 4:</i> Estructura de un pavimento rígido	33
<i>Imagen 7:</i> Localización de Excedentes	38
<i>Imagen 8:</i> Toma de muestras de Sub-base	44
<i>Imagen 9:</i> División de muestras	44
<i>Imagen 10:</i> Muestras al horno	45
<i>Imagen 11:</i> Tamices para granulometría.....	51
<i>Imagen 12:</i> Procedimiento máquina de los ángeles	47
<i>Imagen 13:</i> Lavado y secado de las muestras.....	48
<i>Imagen 14:</i> Peso muestra máquina de los ángeles.....	49
<i>Imagen 15:</i> Cuarteo de muestra equivalente de arena	49
<i>Imagen 16:</i> Tubo irrigador	50
<i>Imagen 17:</i> Matraz Erlenmeyer	51
<i>Imagen 18:</i> Muestras equivalentes de arena reposando	51
<i>Imagen 19:</i> Toma de lecturas equivalente de arena.....	52
<i>Imagen 20:</i> Nivel superior de la arena.....	52
<i>Imagen 21:</i> Equipo de casa grande con muestra	54
<i>Imagen 22:</i> División de la muestra en equipo de casa grande.....	54

<i>Imagen 23:</i> Peso húmedo muestra de límite líquido	55
<i>Imagen 24:</i> Peso seco muestra de límite líquido	55
<i>Imagen 25:</i> Muestra limite plástico	56
<i>Imagen 26:</i> Muestra de límite plástico en el horno	56
<i>Imagen 27:</i> Peso seco limite plástico	57
<i>Imagen 28:</i> Sal anhidra.....	58
<i>Imagen 29:</i> Separación de muestras de sulfatos	58
<i>Imagen 30:</i> Tamices para sulfatos	59
<i>Imagen 31:</i> Recipiente de acero con la carga abrasiva.....	60
<i>Imagen 32:</i> Equipo Micro-Deval	60
<i>Imagen 33:</i> Muestra Proctor Modificado	61
<i>Imagen 34:</i> Compactación de muestras.....	62
<i>Imagen 35:</i> Peso muestra Proctor Modificado	62
<i>Imagen 36:</i> Muestra CBR.....	63
<i>Imagen 37:</i> Golpes para cada muestra.....	64
<i>Imagen 38:</i> Peso muestra CBR.....	64
<i>Imagen 39:</i> Toma de lecturas	65

1. Resumen

El presente tema de investigación intenta desarrollar y demostrar la influencia que tiene la adición del tereftalato de polietileno al material granular de sub-base para vías terciarias; de tal manera que actúe en conjunto con el material plástico, contribuyendo a disipar las cargas impuestas por el tráfico y contribuyendo al objetivo de implementar el uso de los materiales PET reciclados en la modificación de la sub base en las vías.

Existen varias razones por las cuales se opta a utilizar este material, como sus propiedades físicas y químicas, saber cómo actúa este material con respecto a la resistencia debido a la creciente contaminación causada por el plástico, su uso puede favorecer tanto a la economía en construcción como al medio ambiente. Es muy probable que en el futuro tengamos muchos desechos de este material, y por eso se busca reutilizar los mismos.

1. Abstract

The present research topic seeks to develop and demonstrate the influence that the addition of PET to the granular of sub base for tertiary roads; In such a way that it acts in conjunction with the plastic material, contributing with a dissipation of the loads imposed by the traffic and contributing to the main objective is to implement the use of recycled PET materials in the modification of the sub base for its use in the roads. There are several reasons why this material can be used, such as its physical and chemical properties, to know how to act this material with respect to its resistance due to the growing of the contamination caused by this material. Using this material not only the cost in construction but also the environment can be improved. It is very likely that in the future we will have many wastes of this material, it is because we are looking to reuse them.

2. Aspectos generales del proyecto

2.1 Descripción del problema

Se puede observar que en la actualidad se generan una serie de procesos y grupos ecológicos para el cuidado del medio ambiente y todo lo que conlleva su entorno. La idea es; tomar conciencia y preservar el medio en que vivimos, debido a la alta contaminación por residuos PET que se generan en las grandes empresas, centros comerciales, constructoras y hasta las mismas viviendas familiares. El coordinador de Gestión Ambiental de la empresa de aseo de Pereira, comparte que en Pereira solo se recicla el 3% del total de los residuos y lo complementa agregando que:

Es urgente que en la ciudad se genere la necesidad de reciclar ya que hasta el momento se está en saldo rojo, porque sólo el 3 % de habitantes implementan esta práctica y la cifra a nivel nacional no supera el 18 %. En Pereira solo se recicla el 3% del total de los residuos. PET es la abreviatura de polietileno tereftalato, una resina plástica y una forma de poliéster (Pineda, 2016, p.1).

Es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, muy utilizado en envases de bebidas y textiles. La siguiente figura nos ilustrara los efectos y causas del problema de investigación.

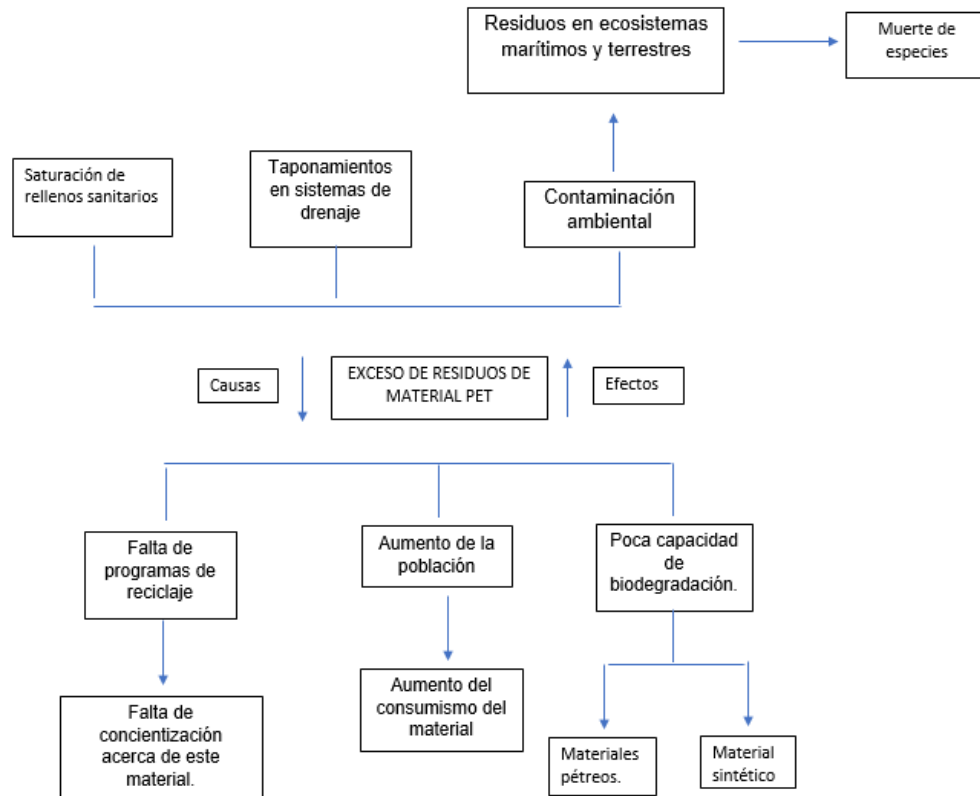


Figura 1. Efectos y causas del problema de investigación. Elaboración propia.

2.2 Formulación del problema

¿Es posible alcanzar la resistencia y durabilidad óptima al mezclar sub-base con material PET reciclado para su uso en vías terciarias?

2.3 Justificación

El presente trabajo de investigación, busca disminuir la contaminación causada por el PET en nuestro ecosistema, creando una alternativa ecológica; fomentando el reciclaje, la reutilización de este material no biodegradable y aprovechamiento de sus características físicas y químicas para su uso e implementación en una mezcla con la sub-base lo cual puede generar un aporte significativo para la conservación de los recursos naturales y el medio ambiente. Por otra parte, se busca disminuir el impacto ambiental que se genera en la construcción de obras civiles, en este

trabajo se opta por la reutilización de un material no biodegradable, que se mezcle en un porcentaje determinado con la sub-base.

Es conveniente estar informados respecto a la contaminación y desechos que ocasiona el ser humano con la producción de material PET; se busca dar una solución a este problema de gestión de residuos de un mal diseño y planeación. Según Estévez (2013): “cada día se producen miles de producto plásticos que terminan contaminando el planeta tierra, afectando desde los ecosistemas más pequeños hasta los más grandes, que se pueden dar en mares, océanos, fauna y flora” (p. 2). Cabe resaltar que a pesar de que el ser humano es el generador de esta contaminación no está exento al perjuicio causado por el PET. El plástico se convirtió en un material casi imposible de sobrellevar, el planeta no está en condiciones óptimas de educación y cultura ciudadana para mejorar la calidad del entorno, debido a que es un problema de carácter global que según Estévez (2013) tarda una cifra representativa de hasta: “1000 años en descomponerse según el tipo de plástico” (p. 3), lo cual ha llevado al planeta a una situación nefasta; por la utilización masiva de este material nos vemos en la tarea de buscar soluciones óptimas.

Son varias las opciones que tiene la sociedad para mejorar, se tiene la certeza del cambio que se genera al implementar esta mezcla de material en obras de ingeniería civil, utilizando esta problemática como una oportunidad de cambio y aprovechando el material contaminante en el desarrollo de vías. Se han realizado los ensayos correspondientes para dar justificación a la mezcla de ambos materiales, analizando las posibles variables, reuniendo información importante y relevante sobre la resistencia que se genera al combinar el material PET con la sub-base. El beneficiado con este proyecto es la sociedad en general; observándose en diferentes contextos.

Según La Coordinación de Geotécnica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (2013):

Analiza la posibilidad de reutilizar las botellas de polietileno tereftalato (PET), empleadas en el envasado de agua y bebidas carbonatadas, en obras de geotecnia, como material de restitución en suelos de baja capacidad de carga, por su durabilidad, resistencia mecánica y química. El método empleado por los investigadores es caracterizando de manera individual y en grupo, las propiedades mecánicas de los envases más comunes en el mercado, las botellas PET pueden favorecer al mejoramiento de grandes extensiones de suelo de baja capacidad de carga (p.

3)

Es fundamental en esta investigación producir una mejora, en la que los desechos de la sociedad se tengan en cuenta para la creación de nuevos proyectos a partir del uso de las 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar) planteado por Borrás (2018), y así lograr la implementación de estos en procesos ingenieriles; dando un uso adecuado para el ambiente.

2.4 Delimitaciones

- El enfoque de la investigación fue netamente en condiciones ideales de laboratorio.
- Escasez del material PET reciclado en Pereira y fue necesario traerlo de Medellín.
- El desarrollo de esta investigación sólo comprende el análisis de resistencia de la sub-base granular mezclada con PET; cuyas características deben cumplir con las especificaciones

del artículo 320-13 de INVIA

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Implementar el uso del PET reciclado en la modificación de la sub-base para su uso en las vías.

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar diferentes mezclas de sub-base con adición de polímeros termoplásticos (PET) reciclados.
- Analizar la metodología escogida para la combinación del agregado sub-base y el material PET.
- Identificar las propiedades mecánicas de las diferentes mezclas por medio del laboratorio CBR.
- Aumentar la capacidad de resistencia mecánica del mismo, con su uso en vías o por lo menos mantener la capacidad de resistencia mínima.
- Identificar el % de PET máximo a utilizar sin exceder los parámetros de la norma INVIAS.

4. Hipótesis

- Al someter la mezcla de sub-base con material PET al frío se obtiene mayor resistencia.
- Los agregados de la cantera de Occidente para sub-base son más efectivos que los agregados de la cantera de Combia, para su posterior mezcla con el material PET.
- Adicionar más del 6% de material PET a la sub base no aumenta la resistencia mecánica adecuada.
- Adicionar hasta 3% de material PET a la sub base se cumple con la resistencia mínima establecida en la norma INVIAS para Sub base granular.

5. Antecedentes

5.1 Antecedente 1

Título: Influencia de la inclusión del reciclaje de botellas plásticas como uno de los componentes en la conformación de materiales granulares pétreos para pavimentos. Disponible en (Eduardo Pinzón Cortés, 2016) (6).

Resumen

En la investigación, se utilizó desecho de botellas plásticas como material de adición, para modificar el comportamiento de una base y una sub base granular. A partir de ensayos de Proctor y CBR se comparó el comportamiento del material natural y el mezclado. Los resultados de la investigación muestran que el CBR de una mezcla de materiales granulares, base y sub base, con material de desecho, presenta un incremento notable. Además, la mezcla modificada, cambia el peso unitario del material, obteniéndose una mezcla con mayor resistencia y menor peso. El estudio se centró en la propiedad de resistencia del material granular, con muestras en estado natural y muestras estabilizadas. Los resultados permiten demostrar una influencia positiva en la resistencia del material por parte del desecho de botellas plásticas, esto genera un buen antecedente para desarrollar más investigaciones, con el objetivo de comprobar la factibilidad de este producto como aditivo estabilizante, beneficiando paralelamente al ambiente, al reducir el impacto generado por la disposición de botellas plásticas en rellenos sanitarios.

5.2 Antecedente 2

Universidad Central de Venezuela

Título: Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento, disponible en: (Alesmar Luis, 2008) (7)

Resumen

Corresponde a este trabajo experimental, la tarea de elaborar, ensayar y caracterizar Mezclas de Tereftalato de Polietileno (PET) – Cemento. Para ello se estableció una metodología basada en una investigación teórico-práctica que ayudase a determinar de manera preliminar el posible comportamiento del plástico proveniente de las botellas de gaseosas al utilizarlo como agregado en una mezcla. Las mezclas de PET – Cemento realizadas están conformadas por 5%, 10% y 15% de PET además de arena y piedra, en proporciones que dependen del tipo de mezcla, es decir, si es para mortero o para concreto. Se utilizaron tres diseños de mezclas en donde se sustituyó parte de la arena por el plástico. Para determinar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas realizadas se elaboraron una serie de probetas que tuvieran las características ideales para los respectivos ensayos tanto de compresión simple, como de absorción, erosión e impacto. Las mismas se curaron por 7 días, luego se almacenaron hasta los 28 días para realizar los ensayos anteriormente mencionados exceptuando los de absorción y erosión que se debían hacer a los siete días. Desde el punto de vista de resistencia y durabilidad; a compresión simple, la mezcla B (concreto con un 15% de PET) es la que se considera la más apropiada ya que resultó ser en promedio la más resistente aun cuando no sea la mezcla más homogénea. Por otro lado, su capacidad de absorción es baja al igual que su comportamiento ante la erosión e impacto, lo que la hace la mezcla más idónea para ser utilizada como material de construcción. Cabe destacar que no es la más costosa dentro de las tres mezclas que contienen PET. La mezcla de PET - Cemento ayuda a reducir las cantidades de PET que no poseen una disposición final adecuada, disminuyendo así su impacto ambiental, ya que se necesita una gran cantidad de botellas de gaseosas para obtener el material para elaborar la mezcla, por lo que dichas botellas se estarían eliminando del ambiente.

5.3 Antecedente 3

Título: La evaluación del valor de la resistencia mecánica CBR de las canteras Anahuarque y Patapatade la ciudad de Cusco con la adición de filamentos de tereftalato de polietileno (PET) para mejoramiento de sub-base (Zapana Saavedra, 2016) (8).

Demuestra el comportamiento favorable que puede tener el Tereftalato de polietileno (PET) al usarlo como aditivo para estabilizar y mejorar los suelos frente a las solicitaciones de carga presentes en la estructura del pavimento como es la sub-base, que es la capa en la que se enfocó la investigación, realizando diferentes ensayos a los suelos de muestra de las canteras de Anahuarque y Patapata en Cusco.

El ensayo de laboratorio en el cual se centra la investigación es el CBR para obtener la capacidad de soporte de los suelos el cual brinda un índice de resistencia en relación a la carga y penetración a la que es sometida después.

La sub base sirve como drenaje al pavimento, controla o elimina en lo posible los cambios de volumen de elasticidad y plasticidad que sean perjudiciales para la sub rasante; también controla la ascensión capilar del agua proveniente de las capas freáticas cercanas o de otras fuentes protegiendo así el pavimento contra hinchamientos, el material de la sub base debe ser seleccionado y tener mayor capacidad de soporte que el terreno de fundación compactado. Este material puede ser arena, grava, escoria de altos hornos o residuos de material de cantera. Si la función principal de la sub base es de servir de capa de drenaje, el material a emplearse debe ser granular, y la cantidad de material fino (limo y arcilla) que pase el tamiz N° 200 no será mayor del 8 %.

5.4 Antecedente 4

Barcelona

Título: Estudio de mezclas de áridos reciclados de hormigón y asfáltico estabilizados con cemento para su aplicación en bases y sub bases de carreteras (Estévez R. N., 2013) (9)

Resumen

Numerosas carreteras en el mundo son reparadas, se corrige su trazado o se renuevan sus capas. Ello genera una importante cantidad de mezcla asfáltica fresada, que constituye un material que tratado adecuadamente es reciclable. La valorización de materiales reciclados en la construcción es beneficiosa tanto para el medio ambiente como para la economía. Diferentes departamentos de transporte estatales de EE. UU., así como varias administraciones europeas permiten el uso de áridos reciclados asfálticos como materiales para las capas de firme en distintos porcentajes mezclado con áridos naturales.

El estudio de suelo-cemento se llevó a cabo en muestras de 100% áridos reciclados de hormigón y con mezclas de áridos reciclados de hormigón y áridos reciclados asfálticos, las cuales contienen 10%, 25% y 50% áridos reciclados asfálticos. Las muestras fueron ensayadas en el laboratorio para caracterizar el material y clasificar el uso del mismo como material granular estabilizado con cemento, según establece el artículo 513 del PG-3 vigente, también se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas: Proctor modificado, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad y capacidad de soporte CBR. Los resultados obtenidos en las diferentes muestras cumplen las exigencias de la norma española para un material granular tratado con cemento SC40 y también sin cemento. Debido a que el estudio fue realizado con un árido de baja calidad, intentado tener unas condiciones adversas, el por ciento de cemento requerido para alcanzar la resistencia exigida es un tanto superior al por ciento comúnmente utilizado en el suelo cemento, pero aún por debajo del máximo recomendado. Algo

interesante en el estudio es que a medida que aumenta la incorporación de árido reciclado asfáltico aumenta la resistencia a compresión y disminuye la capacidad soporte CBR, a pesar de esto el menor valor de CBR obtenido en la muestra que contiene el 50% de árido reciclado asfáltico es considerado bueno y está por encima del mínimo exigido por el PG-3.

6. Metodología

Investigación experimental, en la cual se varía el porcentaje de material PET mezclado con sub-base (se escoge la sub-base de cantera que presente mejores características mecánicas), donde el valor California Bearing Ratio CBR debe cumplir con los rangos establecidos por el INVIAS para su funcionamiento.

Etapas 1. Se realiza recolección de información relacionada con la investigación a realizar, fuentes de apoyo y asesorías constantes que se utilizan para garantizar el seguimiento pertinente de la información encontrada; así generando una base clara de conocimiento del proyecto.

Etapas 2. Se realizan todos los ensayos necesarios para identificar las características y condiciones de la sub-base, ensayos como granulometría (I.N.V.E – 213 – 13), Limite liquido (I.N.V.E – 125 - 13), índice de plasticidad (I.N.V.E – 125,126 – 13), Desgaste en máquina de los ángeles (I.N.V.E – 218 - 13), Resistencia a los sulfatos – sodio – magnesio (I.N.V.E – 220 - 13), Micro Deval (I.N.V.E – 238 – 13), equivalente de arena (I.N.V.E – 133 – 13) y por último el ensayo Proctor modificado (I.N.V.E – 142 - 13) para poder realizar el ensayo de CBR (I.N.V.E – 148 – 13) .

Etapas 3. De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de la etapa 2, se elige una sola cantera como origen de material granular para mezclar con el material PET, optimizando el procedimiento.

En esta etapa es de vital importancia que se comparen meticulosamente los resultados para poder identificar el agregado de mejor calidad, empezando por las gráficas que arroja la granulometría, estas deben estar dentro de los límites, entre más centrada a estos mucho mejor es la gradación del material; garantizando mejores resultados.

Etapa 4. Ajuste de granulometría del material granular (sub-base) seleccionado, si es necesario o pertinente.

Hay que identificar en que parte de la curva granulométrica está fallando, teniendo esto en cuenta se procede a ajustar el material agregando los tamaños respectivos. Si no presenta problemas se continúa.

Etapa 5. Se efectúa el ensayo de granulometría al material PET conseguido para identificar los tamaños nominales del mismo. Se hace pasar el material PET triturado por los tamices para identificar sus tamaños.

Etapa 6. Corroborar la granulometría final del material PET mezclado con el material granular, garantizando que sus tamaños ocupen espacios vacíos.

Etapa 7. Realizar las respectivas mezclas de sub-base con material PET a diferentes porcentajes. Las mezclas se realizan con la humedad óptima de la respectiva sub-base elegida.

Anteriormente en la etapa dos se realizan una serie de ensayos; y para poder continuar con la etapa actual es muy importante haber identificado la humedad optima exacta del material granular por medio del ensayo Proctor modificado (I.N.V.E. E – 142 - 13). Antes de continuar con la adición de agua para obtener la humedad optima, hay que tener el material granular totalmente seco (secar el material al horno 24 horas antes de la mezcla) así se garantiza la humedad del material. Se procede a realizar las mezclas con el 3%, 6% y 9% del peso seco del material granular. Es importante aclarar que los porcentajes de PET son adiciones y no porcentajes de reducción de material granular por el material plástico.

Etapla 8. Nuevamente es necesario ejecutar los ensayos de CBR (I.N.V.E – 148 – 13) con los materiales ya mezclados; tres ensayos por cada porcentaje de PET.

Importante conservar la humedad optima al momento del ensayo.

Etapla 9. Organización de datos obtenidos. Se procede a realizar una serie de tablas en donde se pueda manejar de la mejor manera la información suministrada por lo ensayos. Con esto se busca poder utilizar las formulas dadas por la Norma INVIAS para conocer los resultados finales que posteriormente son comparados con la misma.

Etapla 10. Realizar una conclusión del análisis de los resultados y comportamientos finales de la investigación, donde se logra establecer el porcentaje ideal de material PET máximo para que cumpla la Norma INVIAS.

7. Marco referencial

7.1 Marco teórico

Los materiales granulares juegan un papel importante en las vías ya que estos son los encargados de transmitir todas las cargas o esfuerzos producidos por la capa de rodadura vial al suelo, esto implica que esta se vea sometida a unas deformaciones permanentes y comportamientos resilientes, por tal motivo es de vital importancia identificar y analizar las características mecánicas del material granular. A continuación, se encuentran bases de conocimiento necesarios y una serie de modelos predictores para la comprensión del proyecto de investigación.

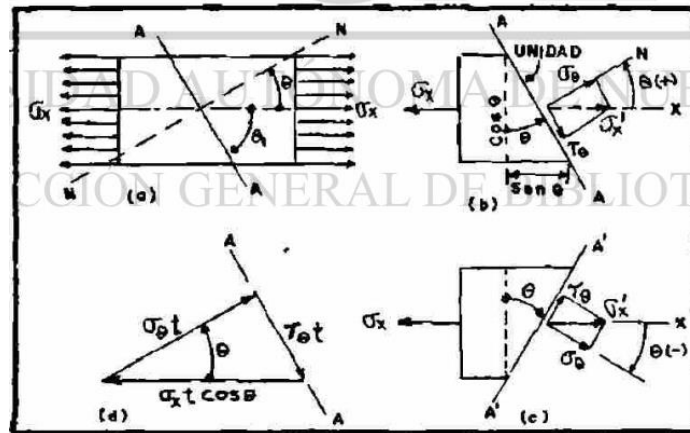
7.1.1 Esfuerzo en materiales.

Según Estrada (1984): “Se entiende por esfuerzo, la fuerza por unidad de área en donde se está aplicando la misma, y se representa de la siguiente manera” (p. 10):

$$\sigma = \lim_{\substack{\Delta A \\ \rightarrow 0}} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde ΔF representa el incremento de fuerza sobre el área ΔA del punto dado. Y Sigma el esfuerzo del que se menciona, este es importante descomponer en esfuerzo normal y cortante, los cuales son respectivamente normal y paralelo al área ΔA . La componente normal puede ser por tanto esfuerzo de tensión o de compresión.

Imagen 1: Representación gráfica de esfuerzos en distintos planos.



Fuente: Rodolfo Ayala Estrada. (1984). *Esfuerzo y deformación en dos direcciones*.

7.1.2 Comportamiento mecánico de los materiales granulares.

Determinar cómo se comportan los materiales granulares es un trabajo complejo debido a que cada partícula, cada pedazo de roca o sedimento se comporta o actúa diferente con respecto a una carga que someta a estos. Al hablar de capas de base y sub base encontramos una serie de cuerpos totalmente no uniformes lo cual nos genera desplazamientos, deformaciones y rotaciones distintas debido al aplastamiento y desgaste de estas. Rondón y Reyes dicen “Entre los principales factores que producen las deformaciones están el historial de esfuerzos, el contenido de agua de los materiales y la densidad.” (Martínez, 2016, p. 11).

Al hablar de las capas (base, sub base) que sostiene a la vía (capa de rodadura), se sabe según Martínez (2016): “que estas deben distribuir todas las cargas cíclicas provocadas por el tránsito constante en la capa de rodadura; es por tal motivo que es correcto hablar de deformaciones elásticas y deformaciones plásticas en el material granular” (p. 12). Nos dicen que, después de cada ciclo recuperan parte de su estado inicial, pero van acumulando cierto grado de deformación a medida que se incrementa el número de repeticiones. Las deformaciones producidas por el deslizamiento entre partículas o por su ruptura, son irreversibles, entonces la recuperación que se produce entre cada ciclo se puede atribuir a la energía elástica de las partículas, aunque puede haber cierto desplazamiento (deslizamiento) inverso entre partículas al descargar. El deslizamiento entre partículas no comienza hasta que el incremento de presiones no supere un valor crítico, para valores de presión inferiores a éste, las deformaciones se atribuyen a distorsiones elásticas de las partículas individuales. Este deslizamiento se inicia con presiones iniciales crecientes y relaciones de vacíos decrecientes.

Cabe resaltar que a pesar de que el material está presentando deformaciones acumulativas, Martínez (2016): “nos habla de que el material sufre al mismo tiempo un proceso de densificación lo cual convierte al pavimento fallado paradójicamente es más resistente” (p. 13)

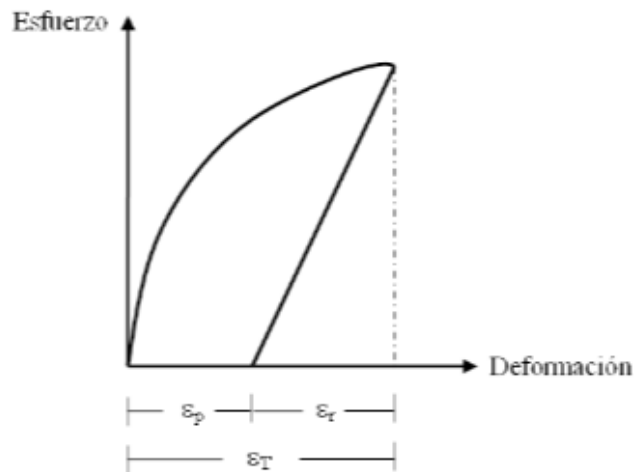
7.1.3 Deformación permanente en materiales granulares.

Métodos de diseño tales como AASHTO (14), IDU y Universidad de Los Andes (15), INVIAS (16) suponen que la deformación permanente se genera principalmente en la subrasante. La anterior suposición se basa en que la subrasante es la capa más susceptible a la deformación, debido a su menor rigidez en comparación con las otras capas del pavimento, y a una mayor probabilidad de presentar altos contenidos de agua lo cual disminuiría su capacidad portante. Sin

embargo, en una estructura de pavimento flexible todas las capas contribuyen en la generación de este tipo de deformación. Como nos dicen Erlingsson e Ingason citados por Reyes (2009): “estudios han demostrado que gran parte de la acumulación de la deformación vertical en estas estructuras se genera en las capas compuestas por materiales granulares no tratados (base y sub-base)” (p. 17)

Se dice de deformación permanente según Reyes (2009): “Cuando a un material granular se inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total (ϵ_T) que se genera es recuperada (deformación resiliente, ϵ_r). Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente (ϵ_p) (imagen 2). En un pavimento estas deformaciones generan hundimientos o desplazamientos que, en exceso, pueden generar fallas funcionales y/o estructurales.” (p. 18).

Imagen 2: Curva típica esfuerzo – deformación en un ciclo de carga y descarga



Fuente: Hugo Alexander Rondón y Fredy Reyes. (2009)

7.1.3.1 Influencia del esfuerzo.

“La acumulación de la deformación vertical en un material granular incrementa proporcionalmente con la magnitud del esfuerzo desviador y disminuye con el aumento de la presión de confinamiento (σ_3)” (Reyes, 2009, p.19).

7.1.3.2 Deformación permanente en función del número de ciclos.

De acuerdo a Pérez (2008): “investigó la relación existente entre el logaritmo de la deformación unitaria permanente axial acumulada y el logaritmo de las repeticiones de carga. En sus investigaciones encontró una buena relación lineal entre ambos factores” (p. 20).

Sin embargo, concluyó que resultaba más exacto un modelo no lineal de dos parámetros que predice directamente la deformación permanente en función del número de ciclos:

$$\epsilon_{1P} = A \cdot N^B \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo ϵ_{1P} la deformación unitaria permanente axial acumulada después de N ciclos de carga realizados mediante un ensayo triaxial dinámico. A y B son parámetros de regresión no lineal. Como puede apreciarse, la ecuación 1 predice una deformación infinita para un número de ciclos infinito.

7.1.3.3 Deformación permanente en función del esfuerzo.

El modelo que relaciona la deformación permanente con el nivel de esfuerzos es el propuesto por el propio Lekarp citado en Pérez (2008):

$$\frac{\epsilon_{1P}(N_{ref})}{(L/p_o)} = a \cdot \left(\frac{q}{p}\right)_{max}^b \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

- $\frac{\epsilon_{1P}(N_{ref})}{(L/p_o)}$: Deformación unitaria axial permanente acumulada para un número dado de ciclos N_{ref} ($N_{ref} > 100$) dividida entre la longitud de la trayectoria de tensiones.

- $L: (q^2 + p^2)^{0.5}$ = Longitud de la trayectoria de tensiones.
- $\left(\frac{q}{p}\right)_{max}^b$: Relación de esfuerzos máxima.
- a, b : Parámetros de regresión.
- P_0 : Esfuerzo de referencia igual a 1 kPa

Utilizó como deformación permanente acumulada de referencia la correspondiente a 20000 ciclos, obteniendo buenos coeficientes de determinación. Este investigador argumentó que la pérdida de exactitud en la predicción debido a la reducción del número de ciclos es de muy poca importancia práctica (p. 21)

7.1.4 Comportamiento resiliente de materiales granulares.

Todas las cargas que reciben la capa de rodadura de la vía son transmitidas a la base y subbase (capas de material granular); estas sufren un fenómeno de deformación el cual si es recuperable se le llama deformación resiliente.

7.1.4.1 Módulo resiliente.

Según Rondón (2015): “El módulo resiliente es uno de los principales parámetros mecánicos de entrada para caracterizar materiales granulares finos y gruesos y para dimensionar pavimentos por métodos de diseño mecánico-empíricos” (p. 22).

Más adelante el mismo autor en su obra comenta: “Introdujeron el término módulo resiliente (M_r), como la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (elástica) o resiliente (E_r)” (p. 23).

$$M_r = \frac{q}{\varepsilon_{tr}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\varepsilon_{tr}} \text{ (Ecuación 4)}$$

En la misma obra: “Sigma 1 es el esfuerzo cíclico axial, sigma 3 es la presión de confinamiento, y E_{tr} es la deformación vertical resiliente. La ecuación anterior es aplicable cuando la presión de confinamiento se mantiene constante. Si esta presión varía, se usa la ecuación elástica generalizada de Hooke” (Rondón, 2015, p. 24).

7.1.5 Valor del índice de rodamientos de California (CBR).

Es el parámetro de suelo importante para el diseño de pavimentos flexibles. También se puede usar para determinación de la reacción de suelo de grado inferior mediante el uso correlación. Es una de las ingenierías más importantes propiedades del suelo para el diseño del sub grado de caminos rurales. Según Rondón (2015):

El valor CBR del suelo puede depender de muchos factores como densidad seca máxima (MDD), contenido de humedad óptimo (OMC), límite líquido (LL), límite plástico (PL), índice de plasticidad (PI), tipo de suelo, permeabilidad del suelo, etc. Además, empapado o la condición sin remover del suelo también afecta el valor. La determinación de CBR es muy larga y el tiempo proceso de consumo (p. 25).

Los métodos de diseño de pavimentos relacionan el valor de la capacidad de soporte del suelo o CBR con el módulo resiliente del material. El módulo resiliente es el parámetro que se utiliza en el diseño del pavimento.

El módulo resiliente se obtiene de ensayos triaxiales mediante ciclos de carga y descarga; sin embargo, AASHTO (2002) presenta una ecuación que permite correlacionar el valor del módulo resiliente con el del CBR. De aquí la importancia de evaluar adecuadamente el CBR del material.

El ensayo de “California Bearing Ratio” o CBR, es un ensayo relativamente simple, comúnmente usado para obtener un índice de la resistencia del suelo de subrasantes, material de base, sub base o afirmado.

Para materiales de base, sub base y afirmado, así como subrasantes granulares, el CBR puede estar asociado a la máxima densidad seca del próctor modificado; sin embargo, para subrasantes finas (subrasantes arenosas, arcillosas o limosas) el valor del CBR debe estar asociado a su densidad de campo. Investigaciones han demostrado que el CBR de suelos finos en muestras compactadas al OCH y MDS, arrojan valores de CBR muy por encima de su valor real.

Tranquilamente una arcilla compactada al OCH y MDS puede tener un CBR de 15%, pero ensayada en su condición natural el CBR puede ser menor a 2 ó 3%.

Los especímenes pueden ensayarse en su condición natural o saturada, luego de un período de inmersión en agua, la condición saturada es la más desfavorable.

El CBR es la relación (expresada en porcentaje) entre la resistencia a la penetración requerida para que un pistón de 3 pulg² de área penetre 0.1 pulg dentro de un suelo entre 1000 psi que es la resistencia a la penetración de una muestra patrón. La muestra patrón es una piedra chancada. El CBR se expresa como:

$$CBR = \frac{\text{Resistencia a la penetración (psi) requerida para penetrar 0,1 pulg}}{1,000^{lb}/pulg^2} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

En ocasiones: “el CBR calculado para una penetración de 0.2 pulg con su correspondiente resistencia a la penetración estándar de 1500 psi, puede ser mayor que el obtenido para una

penetración de 0.1 pulg. Cuando esto ocurre, se debe realizar un nuevo ensayo, si los resultados son similares, el valor del CBR para 0.2 pulg de penetración, se reporta como el CBR representativo de la muestra” (AASHTO, 2006, p. 26).

Los valores de índice de CBR oscilan entre 0 y 100. Cuando mayor es su valor, mejor es la capacidad portante del suelo. Valores por debajo de 6, deben descartarse

7.2 Marco conceptual

A continuación, se presentan los términos y definiciones que se utilizan en el proyecto, los cuales son las bases de conocimiento necesario para la comprensión del mismo.

a. Pavimentos: los pavimentos para carreteras y vías urbanas son estructuras viales multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales compuestas por materiales seleccionados. Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Asimismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado periodo de tiempo (objetivo funcional). Según Lizcano (2011):

Las cargas dinámicas de los vehiculos que transitan sobre estas estructuras producen las interfaces de las capas esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte. El pavimento soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser la subrasante mejorada, estabilizada, o un terraplén, que se denomina capa de conformación. (p. 27)

Según el Ministerio de Economía y Finanzas (2015):

El pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la sub rasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de

seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general, está conformada por capa de rodadura, base y sub base (p. 28).

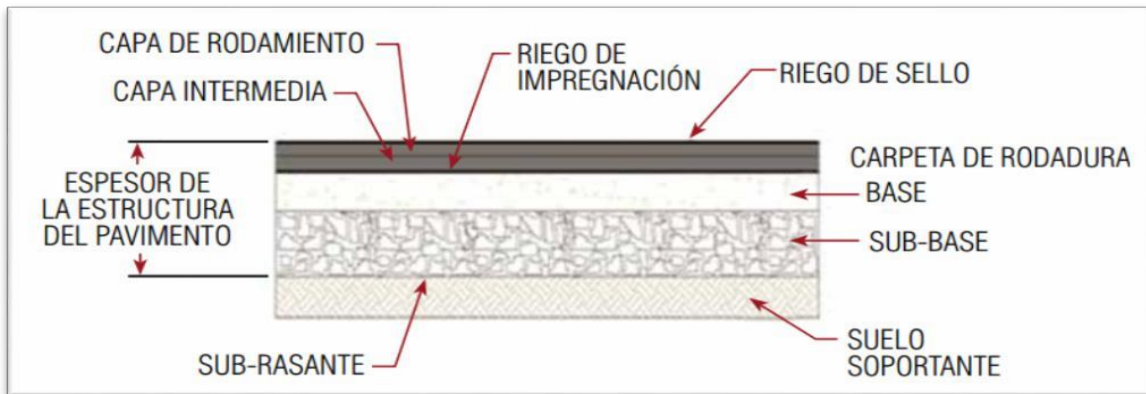
Capa de rodadura: Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito.

- Base: Es la capa inferior a la capa de rodadura, que sostiene, distribuye y trasmite las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ($\text{CBR} > 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento.
- Sub base: Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además, se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} > 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento.

Tipos de Pavimentos

- Pavimentos Flexibles: Es una estructura compuesta por capas granulares (sub base, base) y como capa de rodadura una carpeta constituida con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y, de ser el caso, aditivos. Principalmente se considera como capa de rodadura asfáltica sobre capas granulares: mortero asfáltico, tratamiento superficial bicapa, micro pavimentos, macadam asfáltico, mezclas asfálticas en frío y mezclas asfálticas en caliente.

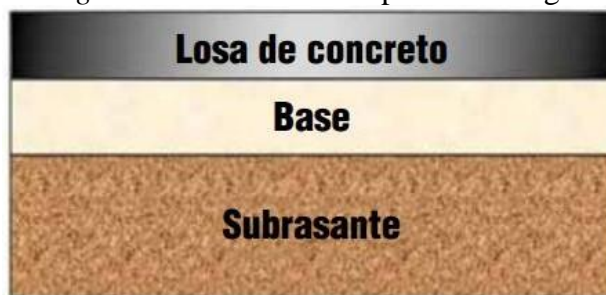
Imagen 3: Estructura de un pavimento flexible
Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas. (2015)Perú.



Pavimentos Semi-rígidos: Es una estructura de pavimento compuesta básicamente por capas asfálticas con un espesor total bituminoso (carpeta asfáltica en caliente sobre base tratada con asfalto); también se considera como pavimento semirrígido la estructura compuesta por carpeta asfáltica sobre base tratada con cemento o sobre base tratada con cal. Dentro del tipo de pavimento semirrígido se ha incluido los pavimentos adoquinados.

- Pavimentos rígidos: Es una estructura de pavimento compuesta específicamente por una capa de Sub base granular, no obstante, esta capa puede ser de base granular, o puede ser estabilizada con cemento, asfalto o cal, y una capa de rodadura de losa de concreto de cemento hidráulico como aglomerante, agregados y de ser el caso, aditivos. Dentro de los pavimentos rígidos existen tres categorías:

Imagen 4: Estructura de un pavimento rígido



Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas. (2015)Perú.

b. Capacidad portante: capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él, Los cálculos de la presión vertical que produce el hundimiento de una cimentación sobre un terreno poco permeable deben realizarse en la hipótesis de que no se produzcan ninguna consolidación del terreno. En esta situación extrema de “corto plazo”, según Rodríguez (2009):

La resistencia del terreno puede simularse con un ángulo de rozamiento nulo y una cohesión igual a la resistencia al corte obtenido mediante ensayos de corte sin drenaje (Shear Undreined), ya sean de campo (Vane test, por ejemplo), bien sean de laboratorio (ensayos triaxiales tipo UU, por ejemplo), bien sean mediante estimación indirecta a través de correlaciones (penetrómetro estático, por ejemplo) u otros ensayos (p. 29).

c. Estabilización: la estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general realizan en los suelos de sub rasante inadecuado o pobre en este caso son conocidas como estabilización suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. En cambio, cuando se estabiliza una sub base granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como sub base o base granular tratada.

La estabilización de suelos consiste en dotar al mismo, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación.

Manual de carreteras, suelos y pavimentos “suelos, geología, geotecnia y pavimentos” documento normativo de carácter técnico y de cumplimiento obligatorio para la gestión de la infraestructura vial.

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

Actualmente, una deficiencia importante en los estudios de las estabilizaciones es la carencia de pruebas adecuadas para estudiar la durabilidad. Las pruebas de intemperismo a veces no son adecuadas para el estudio de agregados para pavimentos por no reproducir en forma eficiente el ataque a que estarán sujetos. Según Fonseca (2006):

En las pruebas con aplicación de efectos cíclicos, no se tiene aún una correlación precisa entre el tránsito y las pruebas en que se somete a los especímenes a efectos de secado y humedecimiento que son más bien de orden cualitativo que cuantitativo. La durabilidad es, pues, uno de los aspectos más difíciles de cuantificar y la reacción común ha sido la de sobre-diseñar, lo cual a veces puede no ser lo más adecuado (p. 31)

e. Sub base granular: es la capa de la estructura de pavimento que subyace a la base granular, compuesta por materiales granulares no tratados colocados generalmente sobre la sub rasante, la sub rasante mejorada, el afirmado o el terraplén. Al igual que la capa de base, la sub

base presenta como función principal, en pavimentos flexibles, transmitir a la sub rasante los esfuerzos que el tránsito impone en magnitudes moderadas y tolerables por esta. También contribuye al drenaje y facilita los procesos constructivos. Citando a Rondón (2011): “En algunas ocasiones sirve para contrarrestar los cambios volumétricos producidos por sub rasantes de material expansivo. Por estar conformada por agregados pétreos de menor costo que aquellos utilizados para base granular, cumple una función económica” (p. 32)

f. Material PET: El tereftalato de polietileno, politereftalato de etileno, es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Algunas compañías manufacturan el PET y otros poliésteres bajo diferentes marcas comerciales, Por otra parte se comparte que: “Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.” (Wikipedia, 2010, p. 33).

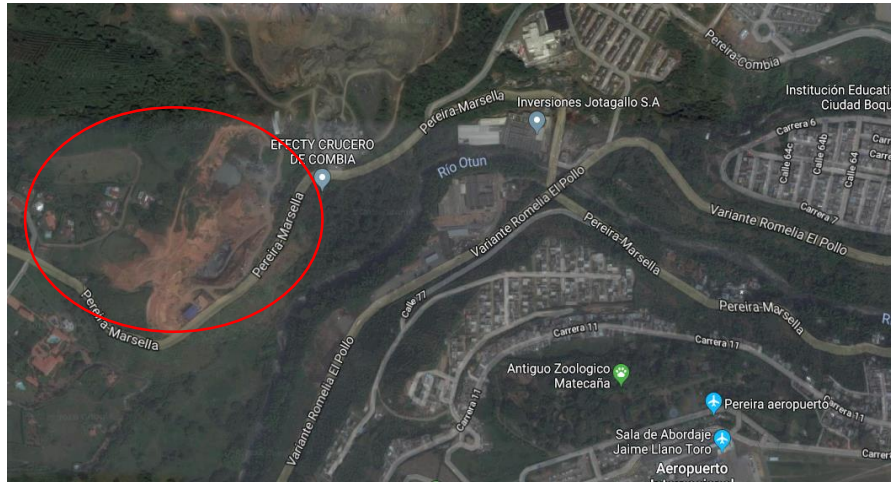
7.3 Marco geográfico

Las muestras de sub-base que se utilizan son de canteras representativas de la ciudad de Pereira, de las cuales se extrajeron 65Kg de cada una, para poder realizar los respectivos laboratorios y análisis independientes del mismo; de igual manera se consiguió 20 Kg de material PET.

- **Cantera Combia**

La planta de producción se encuentra ubicada en el kilómetro 3 vía Pereira – Marsella.

Imagen 5: Imagen satelital de Combia



Fuente: Google Earth. (2018)

- **Agregados de Occidente**

La planta de producción se encuentra ubicada en el kilómetro 15 vía la Virginia – Apia, Santuario, Risaralda.

Imagen 6: Localización de Agregados de Occidente



Fuente: Google Maps. (2018)

- **Excedentes Meliplast**

La bodega de acopio y proceso de triturado del material PET se encuentra en la Carrera. 52

Numero 104-31, Medellín, Antioquia.

Imagen 7: Localización de Excedentes



Fuente: Google Maps. (2018)

7.4 Marco normativo

Tabla 1. Descripción de laboratorios

	Titulo	Descripción
E-123	Análisis Granulométrico	<i>Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Para obtener la distribución de tamaño, se emplean tamices normalizados y numerados.</i>
E-128	Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A)	<i>Se pretende conocer el coeficiente de desgaste de los agregados gruesos con la máquina de los ángeles Determinando la resistencia a la trituración de los materiales pétreos empleados en mezclas asfálticas</i>
E-238	Degradación por abrasión en el equipo Micro -Deval	<i>Es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua.</i>

E-220	<i>Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos</i>	<i>Este método describe el procedimiento para determinar la resistencia a la desintegración de los agregados por la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.</i>
E-125	<i>Limite liquido</i>	<i>Cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. Para la determinación de este límite se utiliza la cuchara de Casagrande.</i>
E-125-126	<i>Índice de plasticidad</i>	<i>Consiste en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 mm.</i>
E-133	<i>Equivalente de arena mínimo</i>	<i>Indica la proporción entre los elementos granulares y arcillosos de un árido. Es particularmente útil para analizar áridos que contienen alto contenido de tamaños inferior a 0,080 mm.</i>
E-148	<i>CBR</i>	<i>El CBR mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada para poder evaluar la calidad del terreno que será usado como sub rasante, sub base y base de pavimentos.</i>

La tabla 1 muestra detalladamente cada uno de los laboratorios realizados

Este se refiere a las bases legales en las cuales se apoya el presente proyecto de investigación, haciendo referencia a las normas exigidas que orientan el estudio en todos sus aspectos legales y de investigación determinando la validez y el análisis del proyecto.

El proyecto se encuentra regido por la Normatividad Colombiana INVIAS (Instituto Nacional de Vías) del año 2013; el cual presenta una serie de ensayos y especificaciones que se deben seguir al pie de la letra para poder satisfacerlas y así poder hacer uso de los materiales evaluados. En el capítulo 3 (afirmados, sub bases y bases) más específicamente en el artículo 320 (Sub-Base Granular); encontramos con claridad los ensayos a elaborar adicionalmente se anuncia el plan a ejecutar de los respectivos laboratorios.

Los ensayos de caracterización a cumplir con los requisitos para un correcto material de Sub-Base establecidos por el Instituto Nacional de Vías en el artículo 320 del 2013, son los siguientes.

Tabla 2. Ensayos para Caracterización y Selección del material Granular Sub-Base

Normatividad Inv.-e	Titulo
E-123	<i>Análisis Granulométrico</i>
E-218	<i>Desgaste en la máquina de los Ángeles</i>
E-238	<i>Degradación por abrasión en el equipo Micro -Deval</i>
E-220	<i>Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos</i>
E-125-126	<i>Índice de plasticidad</i>
E-133	<i>Equivalente de arena mínimo</i>
E-148	<i>CBR</i>

La tabla 2 expone los ensayos realizados. Fuente: Norma Inv. E-123

7.4.1 Requisitos generales del material a utilizar como sub-base.

El material puede ser de cantera o rio siempre y cuando cumpla con las especificaciones de la normatividad propuesta por el INVIAS en el art 320-13. El material debe estar libre de contenido orgánico y cualquier otra cosa que impida su buena compactación y resistencia como lo indica la siguiente tabla:

Tabla 3. *Requisitos de los agregados para sub-bases granulares*

Característica	Norma de ensayo INV	Sub-base granular		
		Clase C	Clase B	Clase A
Dureza (o)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles (Gradación A), Máximo (%)	E-218	50	50	50
500 revoluciones (%)				
Degradación por abrasión en el equipo Micro Deval Máximo (%)	E-238	-	35	30
Durabilidad (0)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato, máximo (%)	E-220	12	12	12
Sulfato de sodio		18	18	18
Sulfato de magnesio				
Limpieza (F)				
Limite líquido, máximo (%)	E-125	25	25	25
Índice de plasticidad, mínimo (%)	E-125 y E-126	6	6	6
Equivalente de arena, mínimo (%)	E -133	25	25	25
Contenido de terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	E-211	2	2	2
Resistencia del material (F)				
CBR (%) Porcentaje asociado al valor mínimo especificado de la densidad seca, medido en una muestra sometida a cuatro días de inmersión.	E-148	30	30	40

La tabla 3 delimita los requisitos agregados para sub-bases granulares. Fuente: tabla 320-2 Inv.

No olvidar que la gradación granulométrica del material granular debe estar entre los rangos o límites que exige la norma, sin saltos bruscos en ninguna de las continuidades de los tamices; para así prevenir segregaciones y garantizar la compactación óptima deseada y exigida por la normativa INVIAS. La especificación dada por el Art 320-13 se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4. *Franjas granulométricas del material sub-base granular*

Tipo de gradación	Tamiz (mm/US. Standard)								
	50.0	37.5	25.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
	2"	1 ½	1"	½ "	3/8 "	Nº 4	Nº 10	Nº 40	Nº 200
SBG- 50	100	70-95	60-90	45-75	40-70	25-55	15-40	6-25.	2-15.
SBG- 38		100	75-95	55-85	45-75	30-60	20-45	8-30	2-15
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)	0%	7%				6%			

La tabla 4 ilustra la totalidad de franjas granulométricas. Fuente: tabla 320-3 Inv.

7.4.2 Requisitos para el material PET.

Los requisitos para el material son meramente cualitativos, físicos. El material debe encontrarse en buenas condiciones, limpio, no haber tenido procesos en donde se haya expuesto al calor, de ser un material el cual este pasando por un primer proceso de reciclaje para garantizar las mejores propiedades.

7.4.3 Plan de ensayos.

Los cuadros anteriores muestran los ensayos a realizar mencionados por la Norma Colombiana; Art 320-13 del INVIAS. Posteriormente a esto también es importante indicar cuál

Va a ser la cantidad de repeticiones del ensayo; para mayor claridad se realiza en la siguiente Tabla 4 con los parámetros y especificación de la norma ya mencionados.

En esta investigación se evaluarán tres muestras de la cantera Combia y tres muestras de la cantera Agregados de occidente.

Tabla 5. *Número de ensayos en paralelo con los porcentajes de adición PET reciclado en la Sub-base*

Normatividad Inv.-e	Titulo	Cantidad de ensayos de sub-base, material Pet reciclado							
		En frio							
		0% Kg	3% Kg	6% Kg	9% Kg				
	<i>Análisis granulométrico</i>								
E-123		3	250						
	<i>Desgaste en la máquina de los ángeles</i>	3	20						
E-128	<i>Degradación por abrasión en el equipo micro -deval</i>								
E-238		3	15						
	<i>Perdidas en ensayo de solidez en sulfatos</i>	3	10						
E-220									
E-125-126	<i>Limite liquido</i>								
E-125-126	<i>Índice de plasticidad</i>	3	0.2						
E-133	<i>Equivalente de arena</i>	3	0.2						
E-148	<i>CBR</i>	3	135	3	135	3	135	3	135

La tabla 5 evidencia el número de ensayos. Elaboración propia⁸. Caracterización de materiales

8.1 Sub base granular:

A continuación, se muestran los ensayos pertinentes para este proyecto según la Norma INVIA

Art. 320-13, para posterior análisis de resultados y así poder conocer su resistencia y CBR, para

sub-base granular. Se toman muestras de 60kg de dos canteras: Combia y Agregados de

Occidente, para comparar cual tiene mejores características mecánicas del material granular.

La extracción del material se debe realizar desde distintos puntos del acopio del mismo, dado que

esto garantiza que el muestreo sea estadísticamente representativo de la cantera y brinde

resultados reales.

Imagen 8: Toma de muestras de Sub-base



Elaboración propia

8.1.1 Granulometría E-213.

El análisis granulométrico de los agregados, se realiza de la siguiente manera:

1. Se extraen 3 muestras de cada cantera

Imagen 9: División de muestras



Elaboración propia

2. Cada muestra se seca en el horno a 110° C durante 24 horas.

Imagen 10: Muestras al horno



Elaboración propia

3. Cada muestra tiene 15 kg los cuales, y para realizar un correcto tamizado se divide cada muestra en 5 partes de 3kg, esto con el fin de no saturar los tamices y obtener una correcta granulometría.

Imagen 11: Tamices para granulometría



Elaboración propia

4. Se utilizan los siguientes tamices:

Tabla 6. *Tamices para granulometría*

Abertura (mm)	Tamiz (in)
37,5	1 1/2"
25	1"
12,5	3/4"
12,5	1/2"
9,5	3/8"
4,75	N°4
2	N°10
0,425	N°40
0,075	N°200

La tabla 6 recopila los tamices para la granulometría. Elaboración propia.

5. Se registran los datos en la siguiente tabla:

Tabla 7. *Resultados de la granulometría*

Tamaño máximo no Tamices con aberturas cuadradas (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 1/2)	15 (33)
50.0 (2)	20 (44)
63.0 (2 1/2)	35 (77)
75.0 (3)	60 (130)
90.0 (3 1/2)	100 (220)
100.0 (4)	150 (330)
125.0 (5)	300 (660)

La tabla 7 expone los resultados de la granulometría. Elaboración propia

8.1.2 Desgaste de máquina de los ángeles E-218.

1. De acuerdo a la Tabla 7 se elige la granulometría más parecida a la d

2. el agregado que se va a usar con sus respectivos pesos.

Tabla 8. *Granulometría de las muestras de ensayo*

Tamaños de tamiz		Masas de las diferentes fracciones Granulometrías			
Pasa Tamiz	Retenido en tamiz	A	B	C	D
37.5 (1 1/2")	25.0 (1")				
25.0 (1")	19.0 (3/4")	1250 ± 25			
19.0 (3/4")	12.5 (1/2")	1251 ± 25			
12.5 (1/2")	9.5 (3/8")	1252 ± 10	2500 ± 10		
905 (3/8")	6.3 (1/4")	1253 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6.3 (1/4")	4.75 (N°4)			2500 ± 10	
4.75 (N°4)	2.36 (N° 8)				5000 ± 10
Total			5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

La tabla 8 enseña la granulometría de las muestras de ensayo. Fuente: tabla 218-13 Inv. De acuerdo con esto, se elige la granulometría A.

3. Luego de comprobar que el tambor este limpio, la muestra y la carga abrasiva correspondiente (12 esferas de acero) se colocan en la máquina de los ángeles.
4. Se hace girar el tambor a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rev/minuto hasta completar 500 revoluciones.
5. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se extrae las carbas abrasivas y se descarga el material del tambor y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada empleando un tamiz superior al N° 12 (1.70 mm).

Imagen 12: Procedimiento máquina de los ángeles



Elaboración propia.

6. El material que pasa se tamiza con el tamiz N° 12, se bota el retenido y se procede a recolectar el pasante.
7. Se lava y se seca al horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.

Imagen 13: Lavado y secado de las muestras



Elaboración propia

8. Después se registra el peso de la muestra seca.

Imagen 14: Peso muestra máquina de los ángeles

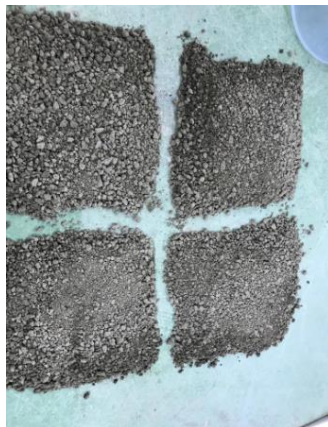


Elaboración propia

8.1.3 Equivalente de arena E-133

1. Si la muestra está saturada, se seca, disgrega y cuartea hasta obtener aproximadamente 1500g. del material que pase el tamiz N° 4.

Imagen 15: Cuarteo de muestra equivalente de arena



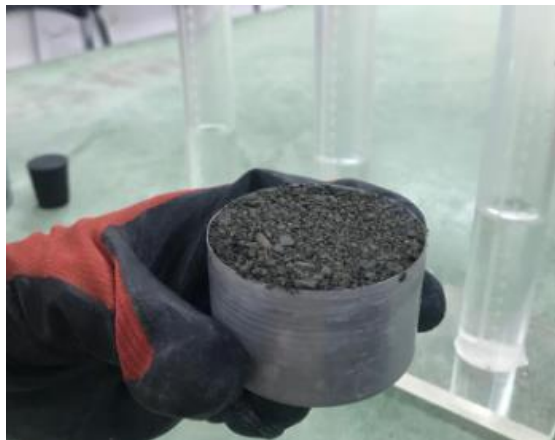
Elaboración propia

2. Se cuartea el material con ayuda de una espátula.

Nota: la experiencia muestra lo planteado por Invias (2002): “que a medida que disminuye la cantidad del material que está siendo reducido por división o cuarteo, también disminuye la exactitud en la provisión de porciones representativas. Por este motivo, es imperativo que l muestra sea dividida o cuarteada cuidadosamente.” (p. 35).

3. Se llena el tubo irrigador hasta enrasar con la superficie.

Imagen 16: Tubo irrigador



Elaboración propia.

4. Se llena el cilindro graduado de plástico transparente con solución.
5. Con ayuda de un embudo se vacía al cilindro la muestra de material contenida en el tubo irrigador, golpeando la base del matraz Erlenmeyer para q el material baje bien y para eliminar las burbujas de aire dentro del material.

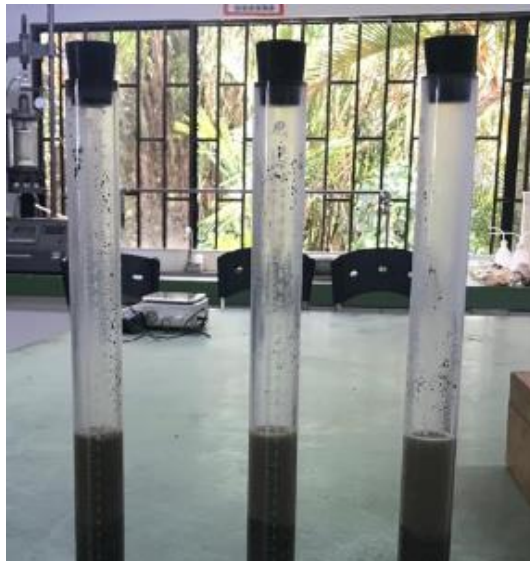
Imagen 17: Matraz Erlenmeyer



Elaboración propia

6. Se cierra el cilindro graduado con un tapón y se agita manualmente a velocidad constante.
7. Una vez terminada la agitación se deja reposar el cilindro durante 1 hora.

Imagen 18: Muestras equivalentes de arena reposando



Elaboración propia

8. Se toma la lectura conocida como nivel superior de finos (LNS finos) que es la parte en la que se encuentran los finos en suspensión.

Imagen 19: Toma de lecturas equivalente de arena

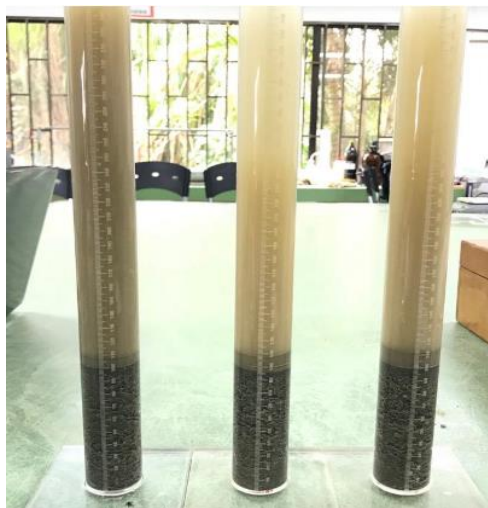


Elaboración propia

9. Se deja caer el pisón suavemente hasta que descansa sobre la arena, y se toman las lecturas.

10. A la lectura tomada se le conoce como nivel superior de la arena.

Imagen 20: Nivel superior de la arena



Elaboración propia

11. Teniendo las lecturas se obtiene el valor de equivalente de arenas (%EA) con la fórmula:

$$\%EA = \left(\frac{\text{Lectura de arena}}{\text{Lectura de finos}} * 100 \right) \text{ (Ecuación 6)}$$

12. Como el ensayo se le realizo a tres muestras, se procede a realizar un promedio.

8.1.4 Ensayo de Límites de Consistencia.

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al agregar agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico, y finalmente líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

• Ensayo Límite líquido E-125

1. Se utilizó una muestra de 1000gr, la cual se humedeció con agua potable.
2. Se deja reposar durante 30 minutos.
3. se mezcló en un recipiente para poder mezclarla.
4. Se mezcla cuidadosamente con una espátula, se debe procurar tener una distribución homogénea de la humedad, no deben quedar grumos.
5. Se utilizó el equipo de Casagrande, en el cual se pone la porción de suelo presionándola y esparciéndola en la copa hasta dejarla a ras del borde.

Imagen 21: Equipo de casa grande con muestra



Elaboración propia

6. Se divide en dos porciones por toda la mitad de la copa.

Imagen 22: División de la muestra en equipo de casa grande



Elaboración propia

7. Se gira la manivela a una velocidad constante hasta conseguir que se vuelvan a juntar las porciones de suelo, (se deben contar la cantidad de golpes).
8. Se toma la sección de suelo que se unió y se pesa en un vidrio de peso conocido.

Imagen 23: Peso húmedo muestra de límite líquido



Elaboración propia

9. Se seca la muestra y se pesa.

Imagen 24: Peso seco muestra de límite líquido



Elaboración propia

• **Ensayo Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos E-216-13**

1. Se utilizó una muestra de 250gr seca.
2. Se tritura la muestra y luego se humedece y se mezcla hasta dejarla homogénea.

Imagen 25: Muestra limite plástico.



Elaboración propia

1. Se hacen rollos o cilindros con las palmas de las manos de 3 mm de diámetro aproximadamente.
2. Al irse alargando los rollos se van notando grietas, cuando estas se vean pronunciadas no se alarga más y se procede a pesar.
3. Se repite el mismo procedimiento hasta obtener 6gr por muestra.
4. Se procede a llevar al horno por 24 horas.

Imagen 26: Muestra de límite plástico en el horno



Elaboración propia

1. Pesar la muestra seca.

Imagen 27: Peso seco limite plástico



Elaboración propia

8.1.5 Sulfatos.

1. Se utilizan aproximadamente 10 kg para pasar por los tamices de la tabla 9, y prepararlos en las taras de acuerdo a los gramos especificados.

Tabla 9. Tamices para sulfatos

Tamices	Gr
21/2"	
2"	
1 1/2"	
1"	1300
3/4"	1500
5/8"	
1/2"	
3/8"	1000
N°4	300

La tabla 9 recoge los tamices para sulfatos. Elaboración propia

1. Se sumergen 215gr de sal anhidra por litro.

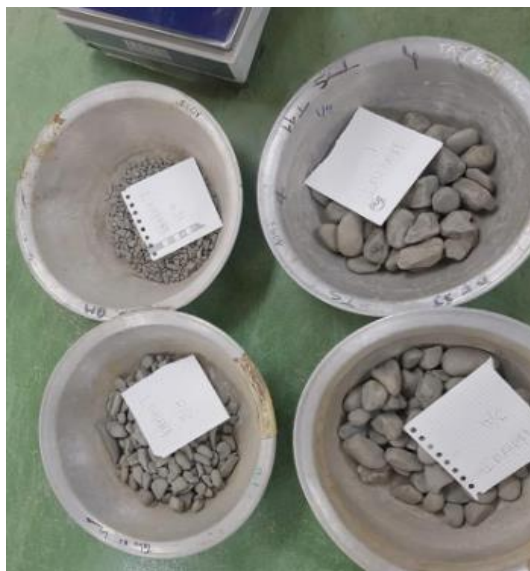
Imagen 28: Sal anhidra



Elaboración propia

1. Se preparan tres litros para sumergir bien todas las muestras.
2. Se dejan sumergidas las muestras durante 16 o 18 horas máximo.
3. Se saca cada muestra de la solución y se deja al horno.

Imagen 29: Separación de muestras de sulfatos



Elaboración propia.

2. Se repite este procedimiento 5 veces.
3. Al culminar el procedimiento se lavan las muestras y se dejan secar al horno.

4. Se pasa por el tamiz correspondiente de cada muestra, y se procede a pesar.

Imagen 30: Tamices para sulfatos



Elaboración propia

De acuerdo a los laboratorios anteriores se elige la cantera que presente los mejores resultados con respecto a la resistencia y calidad de material granular.

4.1.6 Micro-Deval.

1. En este ensayo se realiza una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de agregados pétreos.
2. Se realiza una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua.
3. Inicialmente se sumerge la muestra con granulometría en agua por una hora.
4. La muestra se coloca entonces en un recipiente de acero de 20cm de diámetro, con 2 litros de agua y una carga abrasiva.
5. La carga abrasiva es de 5000gr de esferas de acero de 9.5 mm de diámetro

Imagen 31: Recipiente de acero con la carga abrasiva



Elaboración propia.

6. Se pone el recipiente de acero en el equipo Micro-Deval, se rota a 100 rpm durante 2 horas.

Imagen 32: Equipo Micro-Deval



Fuente: Google Imágenes.

7. Posteriormente se lava la muestra y se seca en el horno.
8. La pérdida es la cantidad de material que para el tamiz de 1.18mm N°16, expresada como porcentaje (%) de la masa seca original de la muestra.

4.1.7 Proctor modificado.

1. Se escogen 20 kg por muestra los cuales se cuartean para separarlo en partes de 5 kg.

Imagen 33: Muestra Proctor Modificado



Elaboración propia

2. Cada muestra de 5 kg se le adiciona agua en diferentes cantidades para garantizar humedades distintas.
3. Cada muestra debe ser mezclada hasta obtener uniformidad.
4. Se introduce el material en cada cilindro; este debe ser compactado por 56 golpes, cada capa hasta llegar a las 5 capas, el material no debe sobrepasar el borde del cilindro.

Imagen 34: Compactación de muestras



Elaboración propia

5. Después se retira la tapa del cilindro y se procede a enrasar el material con el borde, dejando una capa uniforme.
6. Se procede a pesar el material.

Imagen 35: Peso muestra Proctor Modificado



Elaboración propia

7. Este procedimiento se repite con las demás muestras, hasta obtener 4 humedades y cuatro densidades respectivas de cada ensayo. Los valores se tabulan para posterior análisis.

8.1.7 CBR.

- a) Se seleccionan 15 kg de material seco, el cual es dividido en muestras de 5 kg.
- b) A cada muestra se le adiciona la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor
Modificado.
- c) Se mezcla hasta obtener una mezcla uniforme.

Imagen 36: Muestra CBR



Elaboración propia

- d) Se procede a llenar cada cilindro y a compactar el material realizando los golpes asignados para cada uno.

Imagen 37: Golpes para cada muestra



Elaboración propia

Tabla 10. Especificaciones para CBR

Numero de golpes	Cilindro	Humedad	Numero de capas compactadas
10	1	H optima	5
25	2	H optima	5
56	3	H optima	5

La Tabla 10 muestra el número de golpes y numero de cilindros por CBR. Fuente:
Elaboración propia

- e) Se enrasa el material al borde del cilindro y se pesa.

Imagen 38: Peso muestra CBR



Elaboración propia

- f) Se introduce el cilindro en la máquina de lecturas y se anotan los resultados (cargas y deformaciones).

Imagen 39: Toma de lecturas



Elaboración propia

- g) Se repite este procedimiento adicionando el material PET de acuerdo a la tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones para adición del material PET

Adición del material PET	3%	6%	9%
Humedad	H óptima	H óptima	H óptima
Numero de capas	5	5	5
Numero de golpes por capa	10	10	10
	25	25	25
	56	56	56

La Tabla 11 muestra las especificaciones para adición del material PET. Elaboración propia

- h) Nota: El porcentaje de adición del material PET es del total del peso de la muestra de Sub base.

9. Procedimientos de análisis de datos y resultados

9.1 Ensayo Granulométrico por Tamizado - E-213 - Cantera Combia – Agregados de Occidente

a) Procesamiento de datos o cálculos

Se procede a calcular la cantidad de material perdido por proceso de tamizado para garantizar que se pueda trabajar con la muestra para la toma de resultados. Se calcula este valor en porcentaje:

$$\% \text{ de Perdida} = \frac{100 * \text{Peso Perdida}}{\text{Peso Inicial}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Como el porcentaje que se pierde es 0.16 %, ósea menos a 1%, los valores obtenidos son aceptables y por consiguiente se procede a corregir proporcionalmente con el porcentaje obtenido los demás pesos retenidos en cada tamiz. Luego se calcula el % retenido mediante esta fórmula:

$$\% \text{ de Perdida} = \frac{\text{Peso del material retenido en tamiz} * 100}{\text{Peso de la Muestra Inicial}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En la tabla 12 se indican los porcentajes retenidos acumulados, para con estos lograr obtener los porcentajes que pasan por cada tamiz.

Tabla 12. *Porcentajes retenidos acumulados Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (pet); para uso en vías terciarias									
Ensayo Granulométrico por Tamizado - E-213 - Cantera Combia									
Abertura (mm)	Tamiz (in)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Total	Promedio	Retenido %	Retenido Acumulado %	% Pasa
50	2"	0	0	0	0	0,00	0	0	100,0 0

37,5	1 1/2"	0,943	1,168	0,149	2,26	0,75	5,02	5,02	94,98
25	1"	1,1465	0,988	1,12	3,2545	1,08	7,23	12,25	87,75
12,5	3/4"	1,332	1,422	1,089	3,843	1,28	8,54	20,79	79,21
12,5	1/2"	1,31	1,422	1,483	4,215	1,41	9,37	30,16	69,84
9,5	3/8"	1,159	1,098	1,178	3,435	1,15	7,63	37,79	62,21
4,75	Nº 4	3,152	3,1	3,805	10,057	3,35	22,35	60,14	39,86
2	Nº 10	3,74	3,171	3,471	10,382	3,46	23,07	83,21	16,79
0,425	Nº 40	1,7925	2,074	1,849	5,7155	1,91	12,70	95,92	4,08
0,075	Nº 200	0,304	0,442	0,645	1,391	0,46	3,09	99,01	0,99
	Fondo	0,121	0,115	0,211	0,447	0,15	0,99	100,00	0,00
	Total Kg	15	15	15	45	15	100,00		

La Tabla 12 indica los porcentajes retenidos acumulados. Elaboración propia

Tabla 13. *Porcentajes retenidos acumulados Agregados de Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias									
Ensayo Granulométrico por Tamizado - E-213 - Cantera Agregados de Occidente									
Abertura (mm)	Tamiz (in)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Total	Promedio	Retenido %	Retenido Acumulado %	% Pasa
37,5	1 1/2"	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	100,00
25	1"	0,791	0,68	0,832	2,303	0,77	5,12	5,12	94,88
12,5	3/4"	1,7	1,576	1,428	4,704	1,57	10,45	15,57	84,43
12,5	1/2"	1,434	1,397	1,591	4,422	1,47	9,83	25,40	74,60
9,5	3/8"	0,993	0,962	0,894	2,849	0,95	6,33	31,73	68,27
4,75	Nº 4	2,649	2,531	2,329	7,509	2,50	16,69	48,42	51,58
2	Nº 10	3,037	3,13	3,117	9,284	3,09	20,63	69,05	30,95
0,425	Nº 40	3,416	3,798	4,047	11,261	3,75	25,02	94,07	5,93
0,075	Nº 200	0,848	0,813	0,689	2,35	0,78	5,22	99,29	0,71
	Fondo	0,132	0,113	0,073	0,318	0,11	0,71	100,00	0,00
	Total Kg	15	15	15	45	15	100,00		

La tabla 13 muestra los porcentajes retenidos acumulados. Elaboración propia

b) Diagramas

Se consideran en las tablas 14, 15 y en las gráficas 2, 3 los porcentajes que pasan por los tamices vs el diámetro de abertura de los mismos; de la misma manera se muestran los límites superior e inferior indicados por las especificaciones del INVIAS Art. 320.

Tabla 14. *Límites granulométricos Agregados de Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias				
Ensayo Granulométrico E 213 - Límites Norma Invias - Cantera Agregados de Occidente				
Abertura (mm)	Tamiz (In)	Lim. Superior % Pasa	Lim. Inferior % Pasa	Promedio % Pasa
37,5	1 1/2"	100	100	100,00
25	1"	95	75	94,88
12,5	3/4"	85	55	74,60
12,5	1/2"	85	55	74,60
9,5	3/8"	75	45	68,27
4,75	Nº 4	60	30	51,58
2	Nº 10	45	20	30,95
0,425	Nº 40	30	8	5,93
0,075	Nº 200	15	2	0,71

La tabla 14 indica los porcentajes retenidos acumulados en los límites granulométricos.
Elaboración propia

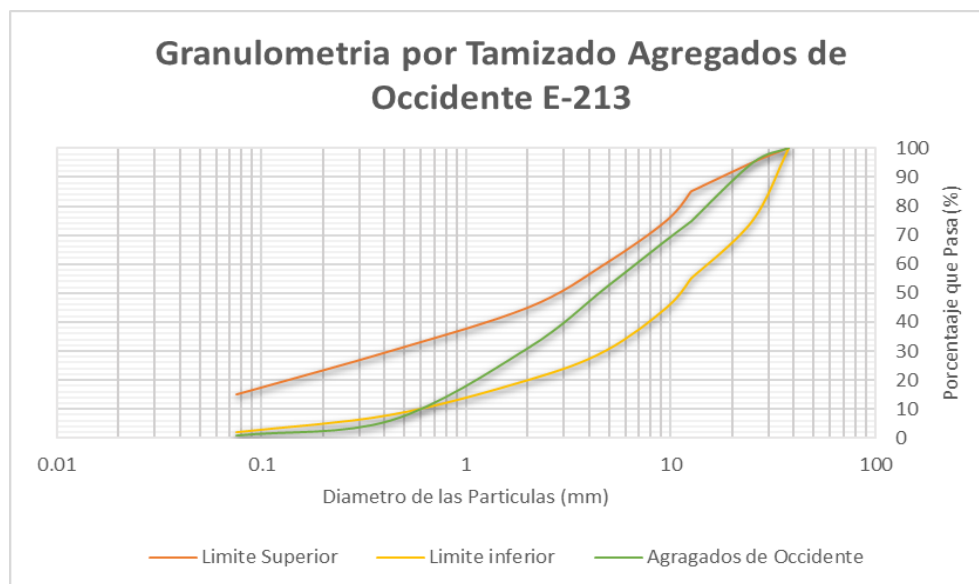


Figura 2. Granulometría por tamizado Agregados de Occidente. Elaboración propia.

Tabla 15. *Limites granulométricos Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias				
Ensayo Granulométrico - Limites Norma Invias - Cantera de Combia				
Abertura (mm)	Tamiz (In)	Lim. Superior % Pasa	Lim. Inferior % Pasa	Promedio % Pasa
50	2"	100	100	100,00
37,5	1 1/2"	95	75	94,98
25	1"	90	60	87,75
12,5	3/4"	75	45	69,84
12,5	1/2"	75	45	69,84
9,5	3/8"	70	40	62,21
4,75	Nº 4	55	25	39,86
2	Nº 10	40	15	16,79
0,425	Nº 40	25	6	4,08
0,075	Nº 200	15	2	0,99

La tabla 15 indica los porcentajes retenidos acumulados en los límites granulométricos.
Elaboración propia

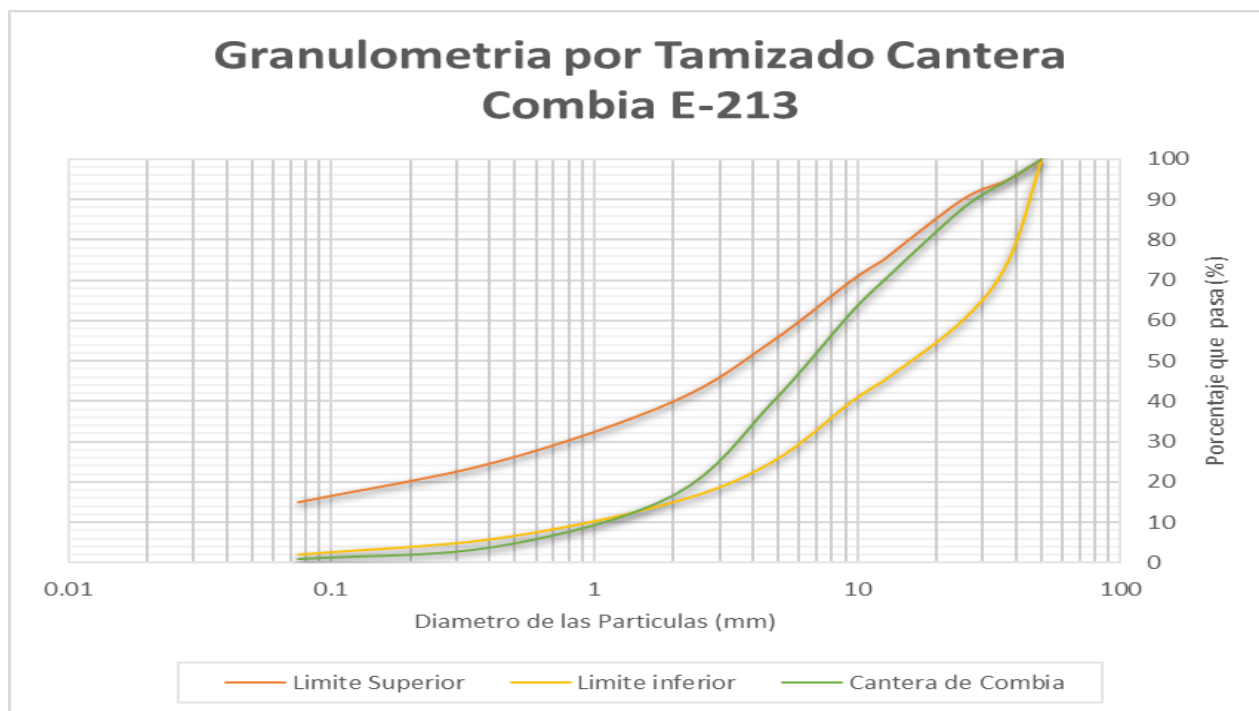


Figura 3. Granulometría por tamizado Cantera Combia. Elaboración propia.

c) Análisis de la Prueba

Se observa que ambas canteras presentan deficiencia de material fino en sus respectivas sub – bases, quedando así una parte de sus curvas por fuera de los límites de la norma INVIAS.

De las dos canteras la que mejor se comporta es la cantera de Agregados de Occidente, demostrando un comportamiento un poco menos uniforme comparado con la cantera de Combia.

9.2 Ensayos de Limites de Consistencia E-125 / E-126

a) Procesamiento de datos o cálculos

Se procede a calcular la humedad obtenida en cada ensayo, tanto para el límite líquido y límite plástico, con la siguiente formula y utilizando valores de la tabla #16:

$$\% \text{ Humedad: } \frac{W_w - W_s}{W_s} * 100 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Tabla 16. *Pesos obtenidos en función # de golpes Agregados de Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Liquido E-125 - Cantera Agregados de Occidente			
	#Golpes	Ww (gr)	Ws (gr)
Muestra 1	17	47,52	40,1
	35	14,76	12,6
	30	26,14	22
Muestra 2	22	26,1	21,2
	32	25,3	21,1
	27	38,3	32,1
Muestra 3	15	27,5	22,6
	27	29,3	24,4
	35	17,1	14,6

La tabla 16 indica los pesos del material húmedo y después del horno. Elaboración propia

Tabla 17. *Pesos obtenidos en función # de golpes Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Liquido E-125 - Cantera de Combia			
	#Golpes	Ww (gr)	Ws (gr)
Muestra 1	15	35,5	27,9
	23	45,6	36,1
	30	29,8	24
Muestra 2	16	28,3	22,4
	27	36,1	28,7
	35	30,3	24,3
Muestra 3	16	41,7	32,6
	27	48,2	38,6
	33	45,6	35,9

La tabla 17 Muestra los pesos del material húmedo y después del horno. Elaboración propia

b) Diagramas

Siendo así el límite líquido dado por la tendencia lineal de las humedades como ordenada sobre la escala aritmética y el número de golpes (n) como abscisa en escala logarítmica sobre una gráfica. Se ubica en la gráfica los 25 golpes y donde intercepte con la línea tendencia, ese es el valor de límite líquido del suelo. Como lo muestra las siguientes figuras 4, 5, 6, 7, 8,9.

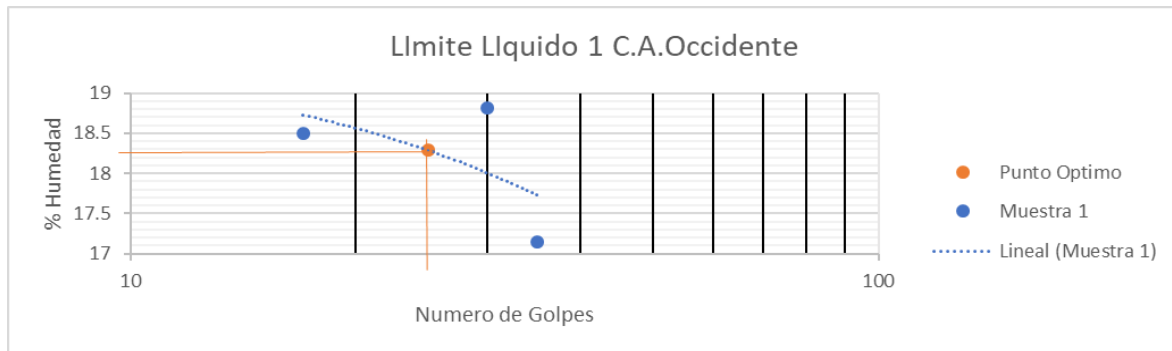


Figura 4. Límite líquido 1 C.A. Occidente. Elaboración propia.

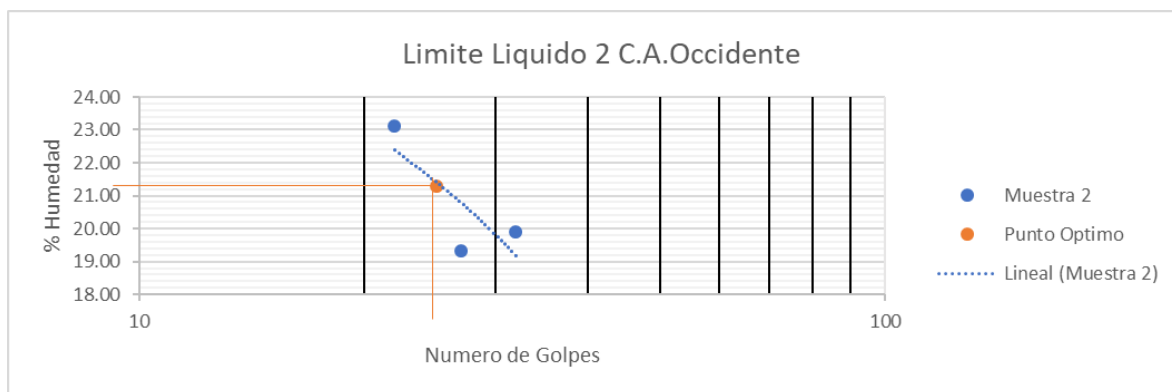


Figura 5. Límite líquido 2 C.A. Occidente. Elaboración propia.

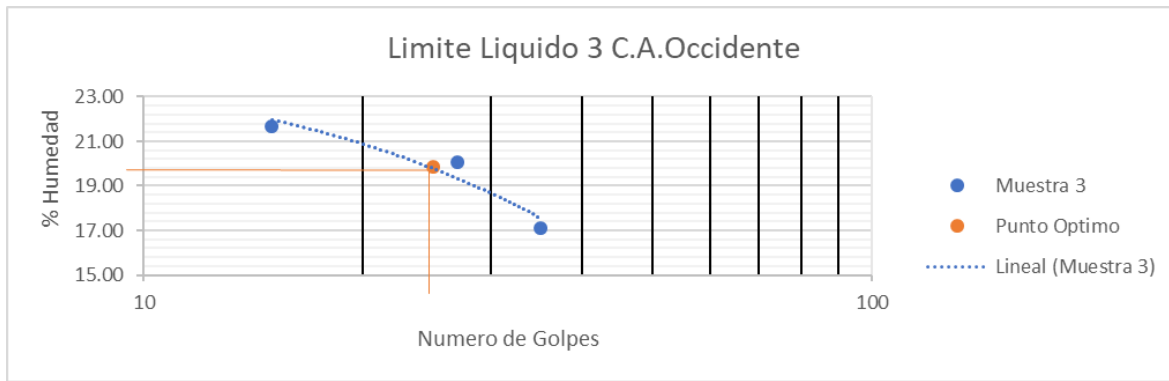


Figura 6. Límite líquido 3 C.A. Occidente. Elaboración propia.

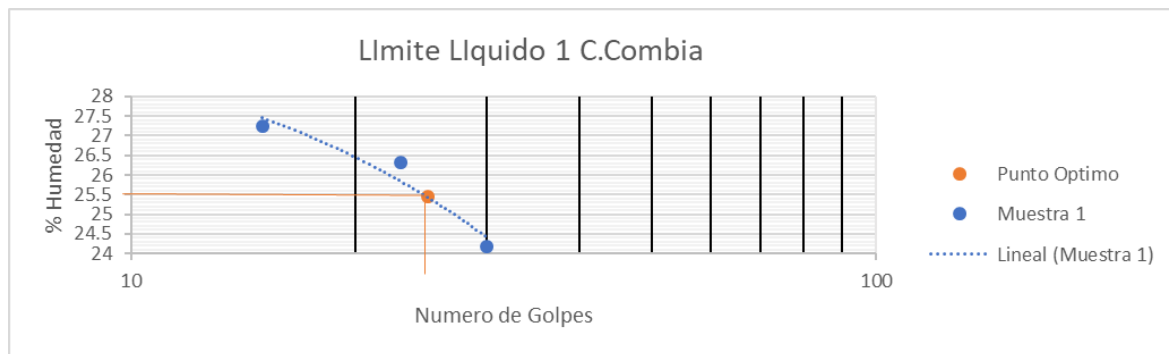


Figura 7. Límite líquido 1 C. Combia. Elaboración propia.

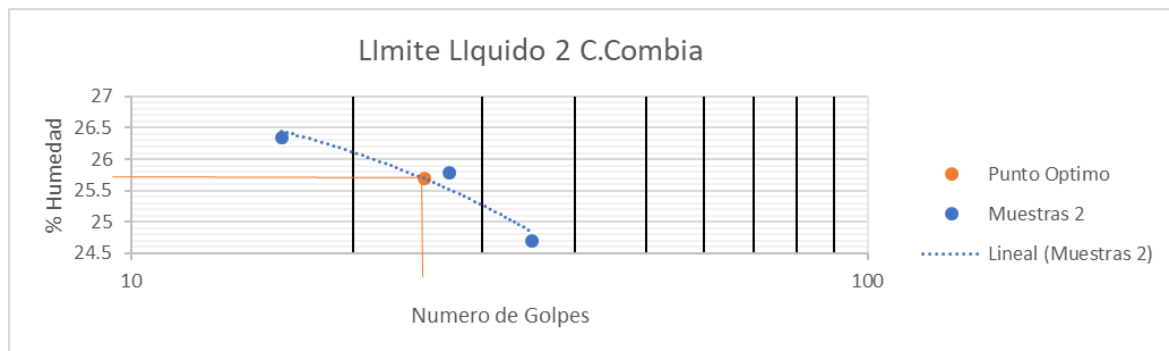


Figura 8. Límite líquido 2 C. Combia. Elaboración propia.

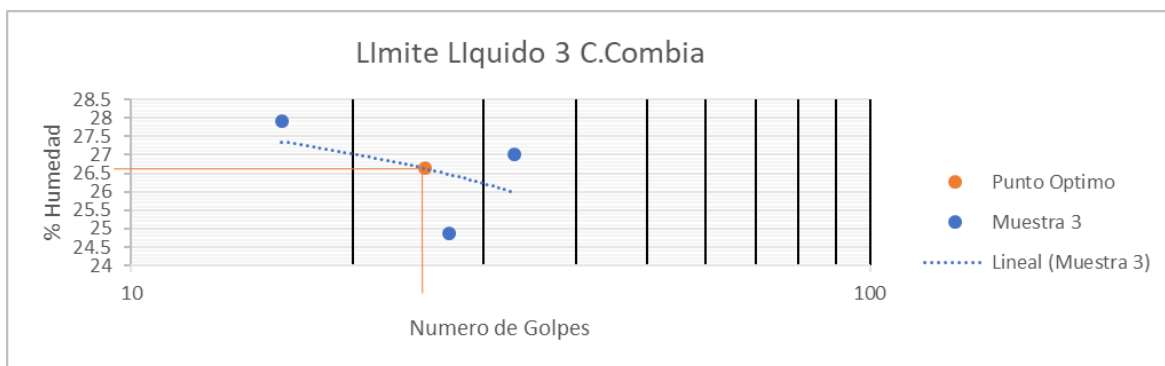


Figura 9. Limite líquido 3 C. Combia. Elaboración propia.

Tabla 18. Limite líquido Agregados de Occidente

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Liquido E-125 - Cantera Agregados de Occidente			
	#Golpes	Humedad	Lim. Liquido
Muestra 1	17	18,50	
	35	17,14	
	30	18,82	
	25		18,29
Muestra 2	22	23,11	
	32	19,91	
	27	19,31	
	25		21,3
Muestra 3	15	21,68	
	27	20,08	
	35	17,12	
	25		19,85
Promedio Limite Liquido			19,81

La tabla 18 evidencia el promedio de límite líquido de las tres muestras. Elaboración propia

Tabla 19. *Índice plástico Agregados Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Plástico e Índice de Plasticidad E-125 & E -126 - Cantera Agregados de Occidente			
	Ww (gr)	Ws (gr)	Humedad
Muestra 1	6	5,12	17,19
Muestra 2	6	5,2	15,38
Muestra 3	6	5,3	13,21
Promedio Limite Plástico			15,26
Índice de plasticidad			4,55

La tabla 19 ilustra el índice plástico en función del límite plástico y limite líquido. Elaboración propia.

Tabla 20. *Limite líquido Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Liquido E-125 - Cantera de Combia			
	#Golpes	Humedad	Lim. Liquido
Muestra 1	15	27,24	25,44
	23	26,32	
	30	24,17	
	25		
Muestra 2	16	26,34	25,69
	27	25,78	
	35	24,69	
	25		
Muestra 3	16	27,91	26,63
	27	24,87	
	33	27,02	
	25		
Promedio Limite Liquido			25,92

La tabla 20 evidencia el promedio de límite liquido de las tres muestras. Elaboración propia

Tabla 21. *Índice plástico Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Lim.Plástico E-125 & E -126 - Cantera de Combia			
	Ww (gr)	Ws (gr)	Humedad
Muestra 1	6	5	20,00
Muestra 2	6	5,1	17,65
Muestra 3	6	4,9	22,45
Promedio Limite Plástico			20,03
Índice de plasticidad			5,89

La tabla 21 resume el Índice plástico en función del límite plástico y limite líquido. Elaboración propia

Tanto para el límite líquido y limite plástico, su selección está basada en el promedio de sus respectivas humedades y el índice plástico está dado por la siguiente formula:

$$\text{Índice Plasticidad: } \text{Lim Liquido} - \text{Lim Plastico}$$

c) Análisis de la Prueba

- Limite liquido Cantera Agregados de Occidente: 19.81 %
- Limite plástico Cantera Agregados de Occidente: 15.26 %
- Índice de Plasticidad Cantera Agregados de Occidente: 4.55%

La Norma de INVIAS en las especificaciones técnicas para estos ensayos de sub-base, tiene como límite liquido máximo de 25 % y el índice de plasticidad mínimo de 6, esto indica que la sub-base de esta cantera solo está cumpliendo con la mitad de los requerimientos como lo indican los valores obtenidos y por lo tanto no es aceptable.

- Limite liquido Cantera de Combia: 25.92%
- Limite plástico Cantera de Combia: 20.03%
- Índice de Plasticidad Cantera de Combia: 5.89%

La Norma de INVIAS en las especificaciones técnicas para estos ensayos de sub-base, tiene como límite liquido máximo de 25 % y el índice de plasticidad mínimo de 6, esto indica que la sub-base de esta cantera no cumple con ninguno de los requerimientos como lo indican los valores obtenidos y por lo tanto no es aceptable.

Ninguna de las dos canteras cumple con los requerimientos y especificaciones de la Norma INVIAS, por esto ninguna de las dos es aceptable; pero la sub-base de la cantera de Agregados de Occidente tiene mejores cualidades ya que cumple uno de los dos requerimientos.

9.3 Ensayo Equivalente de Arena E-133

a) Procesamiento de datos o cálculos

Se procede a calcular el equivalente de arena de cada cantera a partir de la siguiente formula:

$$\% \text{ Equivalente Arena: } \frac{\text{Lectura Arena}}{\text{Lectura Arcilla}} * 100 \text{ (Ecuación 10)}$$

Los valores obtenidos si no son datos enteros estos se llevan al número entero superior como lo muestran las siguientes tablas:

Tabla 22. *Equivalente de arena Agregados Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Equivalente de Arena E-133 - Cantera Agregados de Occidente			
	Lectura Arena	Lectura Arcilla	%Equivalente Arena
Muestra 1	99	111	90,0
Muestra 2	95	107	89,0
Muestra 3	100	107	94,0
% Promedio de Equivalente de Arena			91,0

La tabla 22 muestra las lecturas del material y el respectivo porcentaje de arena equivalente.

Elaboración propia

Tabla 23. *Equivalente de arena Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Equivalente de Arena E-133 - Cantera de Combia			
	Lectura Arena	Lectura Arcilla	%Equivalente Arena
Muestra 1	74	116	64,0
Muestra 2	71	120	60,0
Muestra 3	60	115	53,0
% Promedio de Equivalente de Arena			59,0

La tabla 23 muestra las lecturas del material y el respectivo porcentaje de arena equivalente.

Elaboración propia

b) Análisis de la Prueba

Como el fin de esta prueba es reconocer la cantidad de arena y partículas granulares deseables y del mismo modo el contenido de polvo y finos arcillosos plásticos indeseables; se puede observar en los datos obtenidos que la cantera que posee más cantidad de material indeseable es la cantera de Combia con un valor de 41% del mismo y dejando de arena el porcentaje en 59%. Por otro lado, la cantera de Agregados de Occidente el porcentaje de material indeseable solo es 9% según el promedio obtenido de la suma de las tres muestras de campo y como resultado de esto se observa el dato de 91% de equivalente de arena en la muestra de esta cantera; lo cual es un resultado muy positivo ya que se garantiza el cumplimiento de la Normatividad INVIAS en la cual nos indica que el mínimo % de equivalencia de arena debe ser del 25 %. Cabe resaltar que ambas canteras cumplen con este ítem, pero claro está que las diferencias entre estas dos canteras son evidentes y la de mejores resultados es la Cantera Agregados de Occidente.

9.4 Resistencia a la Degradación a la Abrasión de los Agregados – Maquina de los Ángeles E-218

a) Procesamiento de datos o cálculos

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto % de la masa original. La Formula indica cómo y las tablas 24,25 muestran los resultados.

$$\% \text{ Desgaste: } \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

- P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo en gramos.
- P2: Masa de la muestra seca retenida en el tamiz de 1.70 mm (No. 12) después del ensayo previamente lavado; Valor en gramos.

Tabla 24. *Resistencia a la abrasión-Maquina Ángeles- Cantera Combia*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Maquina de los Ángeles E-218 - Cantera de Combia			
	Peso Inicial (g)	Ws (g)	% de Desgaste
Muestra 1	5000	3467	30,66
Muestra 2	5000	3373	32,54
Muestra 3	5000	3483	30,34
% Promedio de Desgaste			31,2

La tabla 24 indica el porcentaje de desgaste del material a la abrasión. Elaboración propia

Tabla 25. *Resistencia a la abrasión-Maquina Ángeles Agregados Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Maquina de los Ángeles E-218 - Cantera Agregados de Occidente			
	Peso Inicial (g)	Ws (g)	% de Desgaste
Muestra 1	5000	3748	25,04
Muestra 2	5000	3852	22,96
Muestra 3	5000	3987	20,26
% Promedio de Desgaste			22,8

La tabla 25 indica el porcentaje de desgaste del material a la abrasión. Elaboración propia.

b) Análisis de la Prueba

Como indicador de calidad relativa resistente del material la norma INVIAS indica que el porcentaje de desgaste por abrasión máximo es del 50%. De los datos obtenidos, las dos canteras

cumplen con el requisito de estar por debajo del porcentaje máximo; la cantera de Combia un porcentaje de desgaste 31.2% y la cantera Agregados de Occidente 22.8%. Siendo esta cantera la de mejores características en este ensayo.

9.5 Resistencia a la degradación a la abrasión de los agregados –Micro Deval E-238

a) Procesamiento de datos o cálculos

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto % de la masa original. La Formula indica cómo y las tablas 26-27 muestran los resultados.

$$\% \text{ Desgaste: } \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100 \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde:

- P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo en gramos.
- P2: Masa de la muestra seca retenida sobre los tamices de 4.75mm (No 4) y 1.18mm (No 16) después del ensayo; Valor en gramos.

Tabla 26. Resistencia a la abrasión-Micro-Deval Cantera Combia

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias

Ensayo Equipo Micro deval E-238 - Cantera Agregados de Occidente			
	Peso Inicial (g)	Ws (g)	% de Degradación
Muestra 1	1500	1156	22,93
Muestra 2	1501	1161	22,65
Muestra 3	1502	1149	23,50
% Promedio de Degradación por Abrasión			23,03

La tabla 26 indica el porcentaje de desgaste del material a la abrasión en contacto con el agua. Elaboración propia

Tabla 27. *Resistencia a la abrasión-Micro-Deval Agregados Occidente*

Tesis: evaluación CBR de sub-base granular mezclada con tereftalato de polietileno (PET); para uso en vías terciarias			
Ensayo Equipo Micro deval E-238 - Cantera de Combia			
	Peso Inicial (g)	Ws (g)	% de Degradación
Muestra 1	1500	843	43,80
Muestra 2	1500	885	41,00
Muestra 3	1500	839	44,07
% Promedio de Degradación por Abrasión			42,96

La tabla 27 indica el porcentaje de desgaste del material a la abrasión en contacto con el agua. Elaboración propia

b) Análisis de la prueba

Como indicador de calidad relativa resistente ante presencia de agua, la norma INVIAS indica que el porcentaje de desgaste por abrasión máximo no aplica, en nuestro caso al tratarse

una sub base tipo C. A pesar de lo anterior de los datos obtenidos, la cantera de Combia tiene mayor desgaste con un porcentaje de 42.96 % y la cantera Agregados de Occidente 23.03%.

Los resultados dan una idea de la capacidad de resistencia (Tenacidad/abrasión) a la que son expuestos en presencia de agua.

9.6 Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato E-220

Teniendo en cuenta los resultados anteriores y cumpliendo con lo mencionado en la metodología de esta tesis, es importante aclarar que los siguientes dos ensayos de laboratorio tienen como muestra única la cantera Agregados de Occidente debido a que muestra y evidencia ser el mejor material (Sub-base) entre las dos canteras mencionadas.

- a) Las muestras se deben sumergir en una solución de sal anhidra, se disuelve la solución en 3 litros de sal, cada litro debe contener 215 gr de solución.
- b) Al terminar el procedimiento de sulfatos se pesan las muestras que pasan por cada tamiz.

Tabla 28. *Especificaciones del N° de tamiz y peso para el laboratorio de sulfatos*

N° tamiz	Peso de la muestra
N4	300
3/8"	1000
3/4"	1500
1"	1300

La tabla 28 indica el N° del tamiz que se debe utilizar y el peso que debe contener cada uno.

- c) Al terminar todos los procedimientos se vuelve a pesar el material para determinar la pérdida que se tiene por sulfatos, como se muestra en la tabla 29.

Tabla 29. *Peso final laboratorio de sulfatos*

		Pasando por tamices
1"	1,204	1.042
3/4"	1,476	1.390

3/8"	0,972	0,937
N4	0,209	0,181

La tabla 29 indica los pesos finales obtenidos en el laboratorio de sulfatos, para calcular la pérdida del material.

- d) Esto determina la resistencia de los agregados a la acción de los agentes atmosféricos, en las condiciones climatológicas reales de servicio.

$$\%perdida = \frac{masa\ inicial - masa\ final}{masa\ inicial} * 100 \quad (Ecuación\ 13)$$

9.7 Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación o Proctor modificado) E-142

Es necesario conocer la densidad húmeda de las muestras compactadas y para eso se ejecuta la siguiente formula y como lo muestra la tabla 28.

$$\rho_H: k \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad (Ecuación\ 14)$$

Donde: ρ_H : Densidad húmeda de la sub-muestra compactada (punto de compactación), con 4 dígitos significativos/cm³ o Kg/m³.

M_T : Masa del suelo húmedo dentro del molde, aproximada a 1 g.

M_{MD} : Masa del molde, cm³ o m³

V : Constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen:

Usar 1, para g/cm³ volumen en cm³

Usar 1000 para g/cm³ y volumen en m³

Usar 0.001 para Kg/m³ y volumen en m³

Usar 1000 Kg/m³ y volumen en cm³

Tabla 30. *Densidad húmeda de subbase Agregados de Occidente*

Compactación	Ensayo proctor modificado			
	Pruebas			
Prueba N°	1	2	3	4
Numero de capas	5	5	5	5
Numero de golpes	56	56	56	56
Peso suelo + molde (gr.)	9735	10716	10574	10693
Peso molde (gr.)	4865	5792	5871	6002
Peso suelo compactado (gr.)	4870	4924	4703	4691
Volumen del molde (cm3)	2113,23	2113,23	2113,23	2113,23
Densidad húmeda (gr/cm3)	2,305	2,330	2,226	2,220

La tabla 30 indica pesos y volúmenes necesarios para la obtención de las densidades de cada muestra del material seleccionado.

Se procede hallar la densidad seca con la siguiente formula y como lo muestra la tabla 30.

$$\rho_d: \frac{\rho_H}{1 + \frac{W}{100}} \text{ (Ecuación 15)}$$

Donde: ρ_d : Densidad seca de la sub-muestra compactada.

ρ_H : Densidad húmeda de la sub-muestra compactada.

W : % Humedad.

Tabla 31. *Densidad seca de subbase Agregados de Occidente*

Pruebas				
Tara N°	1	2	3	4
Tara + suelo húmedo (gr.)	315,90			
Tara + suelo seco (gr.)	268,00			
Peso de agua (gr.)	47,90	Humedad 1 +	Humedad 2 +	Material seco
Peso de tara (gr.)	65,00	3%	4%	+ 3%
Peso de suelo seco (gr.)	203,00			
Humedad (%)	4,2	7,2	11,2	3,0
Densidad Seca (gr/cm3)	2,211	2,174	2,001	2,155

La tabla 31 indica las humedades necesarias para la obtención de las densidades de cada muestra del material seleccionado.

Tabla 32. *Resumen de resultados iniciales*

Máxima densidad seca (gr/cm ³) :	2,21
Promedio contenido de humedad (%) :	6,4
Máxima densidad húmeda (gr/cm ³) :	2,33

La tabla 32 indica los valores máximos y promedio del análisis inicial.

a) Diagramas

La obtención de la densidad seca óptima y humedad óptima del material está dada por la interpolación de la gráfica compuesta en las abscisas por % de humedad y en el eje ordenado por densidad seca. Entonces se toma el punto más alto de la tendencia dada en la gráfica por los valores obtenidos en las tablas 28 y tabla 29, y se proyecta ese punto a cada eje y siendo este el valor necesitado.

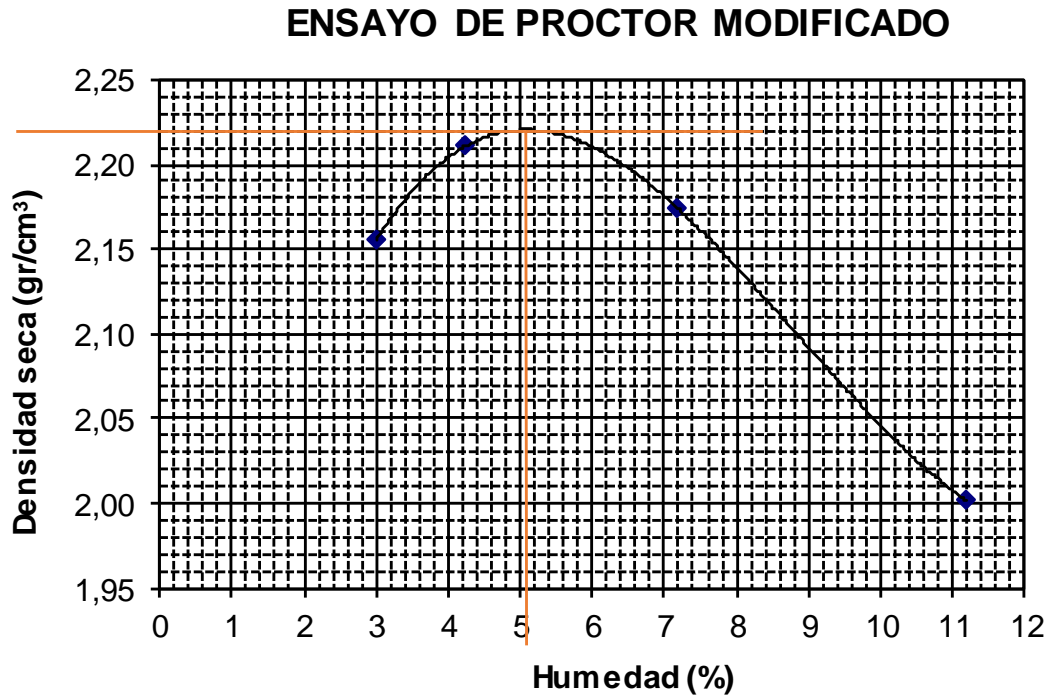


Figura 10. Ensayo proctor modificado.

b) Análisis de la Prueba

El objetivo de este ensayo es la obtención de la humedad óptima la cual por interpolación tiene un valor de 5.1%; por otro lado la densidad seca óptima con un valor de 2.22 gr/cm³, esta última muy importante para trabajos de campo.

El 5.1% de humedad óptima es el valor a utilizar para poder adicionar agua a la sub-base en el siguiente laboratorio (CBR) ya que este permite alcanzar los mayores resultados de resistencia a la compactación del material.

9.8 CBR de suelos compactados en el laboratorio E-148

a) Procesamiento de datos o cálculos

Después de obtener los valores de fuerza para poder realizar una determinada penetración en la máquina de CBR los cuales están dados en KN, se procede a hallar los esfuerzos en MPa

para poder graficar Esfuerzos vs Penetración. La conversión está dada por la siguiente formula y

los resultados se observan en las tablas 31, 32, 33, 34,35.

$$\sigma : \frac{F*100}{A_p} \text{ (Ecuación 16)}$$

Dónde: σ : Esfuerzo en MPa.

F: Fuerza dada por maquina CBR para generar una determinada penetración.

A_p : Área de contacto del pistón (maquina CBR).

Tabla 33. *Registros esfuerzo-penetración-Muestra Natural*

Área del pistón		1935,48 mm2					
Pul	Penetración	Fuerza (kN)			Esfuerzo (MPa.)		
	Mm	Promedio Muestra Natural			Promedio Muestra Natural		
		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes	10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0,00	0,00	0	0	0	0,000	0,000	0,000
0,03	0,64	0,575	0,525	0,305	0,297	0,271	0,158
0,05	1,27	1,21	1,205	0,825	0,625	0,623	0,426
0,08	1,91	1,945	2,075	1,73	1,005	1,072	0,894
0,10	2,54	2,725	3,25	3,015	1,408	1,679	1,558
0,13	3,18	3,53	4,775	4,865	1,824	2,467	2,514
0,15	3,81	4,24	6,33	7,2	2,191	3,271	3,720
0,18	4,45	4,91	7,84	10,005	2,537	4,051	5,169
0,20	5,08	5,535	9,35	13,21	2,860	4,831	6,825
0,23	5,72	6,135	10,9	16,705	3,170	5,632	8,631
0,25	6,35	6,71	12,435	20,32	3,467	6,425	10,499
0,28	6,99	7,26	13,825	24,585	3,751	7,143	12,702
0,30	7,62	7,765	15,37	28,31	4,012	7,941	14,627
0,33	8,26	8,325	16,625	32,19	4,301	8,590	16,632
0,35	8,89	8,88	17,995	36,06	4,588	9,297	18,631
0,38	9,53	9,38	19,41	39,59	4,846	10,029	20,455

La tabla 33 indica valores de fuerza obtenidos en maquina CBR, convertidos a esfuerzo.

Tabla 34. *Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 1.5% de PET*

Área del pistón		1935,48	mm2				
Penetración		Fuerza (kN)			Esfuerzo (MPa.)		
Pul	Mm	Muestra con 1.5% de PET			Muestra con 1.5% de PET		
		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes	10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0,00	0,00	0	0	0	0,000	0,000	0,000
0,03	0,64	0,27	0,21	0,54	0,140	0,109	0,279
0,05	1,27	0,51	0,49	1,82	0,264	0,253	0,940
0,08	1,91	0,83	0,93	3,63	0,429	0,481	1,876
0,10	2,54	1,2	1,5	6,11	0,620	0,775	3,157
0,13	3,18	1,64	2,43	9,08	0,847	1,256	4,691
0,15	3,81	2,14	3,6	11,67	1,106	1,860	6,030
0,18	4,45	2,61	5,1	14,21	1,349	2,635	7,342
0,20	5,08	3,04	6,65	16,93	1,571	3,436	8,747
0,23	5,72	3,51	8,38	19,44	1,814	4,330	10,044
0,25	6,35	3,94	9,83	21,84	2,036	5,079	11,284
0,28	6,99	4,39	11,43	23,96	2,268	5,906	12,379
0,30	7,62	4,83	13,02	25,95	2,496	6,727	13,408
0,33	8,26	5,33	14,43	27,46	2,754	7,456	14,188
0,35	8,89	5,8	16,2	29,14	2,997	8,370	15,056
0,38	9,53	6,26	17,46	30,58	3,234	9,021	15,800

La tabla 34 indica valores fuerza obtenidos en maquina CBR, convertidos a esfuerzos.

Tabla 35. *Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 3% de PET*

Área del pistón		1935,48	mm2				
Penetración		Fuerza (kN)			Esfuerzo (MPa.)		
Pul	mm	Promedio Muestra con 3% de PET			Promedio Muestra con 3% de PET		
		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes	10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,03	0,64	0,22	0,26	0,36	0,115	0,134	0,186

0,05	1,27	0,48	0,59	0,79	0,246	0,307	0,410
0,08	1,91	0,79	1,00	1,36	0,406	0,517	0,704
0,10	2,54	1,13	1,46	1,99	0,586	0,756	1,028
0,13	3,18	1,52	2,03	2,84	0,784	1,049	1,466
0,15	3,81	1,94	2,66	3,79	1,001	1,373	1,956
0,18	4,45	2,32	3,28	4,90	1,199	1,696	2,530
0,20	5,08	2,72	3,92	6,19	1,405	2,024	3,200
0,23	5,72	3,12	4,60	7,48	1,612	2,375	3,866
0,25	6,35	3,52	5,26	8,91	1,820	2,718	4,605
0,28	6,99	3,95	5,92	10,27	2,041	3,059	5,306
0,30	7,62	4,40	6,58	11,67	2,272	3,401	6,028
0,33	8,26	4,83	7,28	13,21	2,496	3,761	6,825
0,35	8,89	5,25	7,99	14,69	2,714	4,128	7,592
0,38	9,53	5,69	8,68	16,23	2,938	4,486	8,387

La tabla 35 indica valores de fuerza obtenidos en maquina CBR, convertidos a esfuerzos.

Tabla 36. *Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 6% de PET*

Área del pistón		1935,48 mm2					
Penetración		Fuerza (kN)			Esfuerzo (MPa.)		
Pul	mm	Promedio Muestra con 6% de PET			Promedio Muestra con 6% de PET		
		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes	10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,03	0,64	0,18	0,15	0,27	0,093	0,078	0,141
0,05	1,27	0,40	0,40	0,62	0,207	0,207	0,322
0,08	1,91	0,66	0,75	1,07	0,341	0,389	0,555
0,10	2,54	0,93	1,19	1,61	0,482	0,615	0,830
0,13	3,18	1,25	1,73	2,27	0,644	0,892	1,173
0,15	3,81	1,58	2,28	2,98	0,815	1,178	1,540
0,18	4,45	1,91	2,94	3,78	0,987	1,517	1,953
0,20	5,08	2,22	3,55	4,66	1,145	1,832	2,409
0,23	5,72	2,61	4,24	5,58	1,347	2,189	2,885
0,25	6,35	2,96	4,94	6,53	1,531	2,551	3,376
0,28	6,99	3,32	5,63	7,44	1,715	2,909	3,844
0,30	7,62	3,70	6,31	8,51	1,910	3,260	4,395

0,33	8,26	4,08	7,00	9,55	2,106	3,618	4,936
0,35	8,89	4,49	7,68	10,61	2,318	3,966	5,484
0,38	9,53	4,90	8,34	11,61	2,530	4,309	5,999

La tabla 36 indica valores de fuerza obtenidos en maquina CBR, convertidos a esfuerzos.

Tabla 37. *Registros esfuerzo-penetración-Muestra con 9% de PET*

		1935,48 mm2					
Penetración		Fuerza (kN)			Esfuerzo (MPa.)		
Pul	mm	Promedio Muestra con 9% de PET			Promedio Muestra con 9% de PET		
		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes	10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000
0,03	0,64	0,06	0,15	0,22	0,033	0,078	0,114
0,05	1,27	0,15	0,32	0,55	0,079	0,167	0,286
0,08	1,91	0,26	0,57	0,99	0,133	0,295	0,512
0,10	2,54	0,40	0,86	1,50	0,205	0,444	0,775
0,13	3,18	0,55	1,19	2,12	0,286	0,617	1,095
0,15	3,81	0,75	1,57	2,83	0,386	0,811	1,460
0,18	4,45	0,92	1,98	3,51	0,474	1,021	1,815
0,20	5,08	1,13	2,33	4,28	0,582	1,202	2,210
0,23	5,72	1,35	2,82	5,06	0,698	1,457	2,616
0,25	6,35	1,60	3,32	6,08	0,825	1,714	3,141
0,28	6,99	1,84	3,84	6,73	0,951	1,982	3,475
0,30	7,62	2,09	4,34	7,62	1,078	2,242	3,937
0,33	8,26	2,35	4,88	8,49	1,212	2,523	4,388
0,35	8,89	2,62	5,40	9,42	1,354	2,792	4,867
0,38	9,53	2,86	5,97	10,26	1,478	3,086	5,301

La tabla 37 indica valores de fuerza obtenidos en maquina CBR, convertidos a esfuerzos.

El siguiente paso es hallar el CBR a las 0.1 pulgadas, 0.2 pulgadas de penetración para cada muestra con las respectivas compactaciones diferentes (número de golpes distintos); con la ayuda de las siguientes formula:

$$CBR\ 0.1'' : \frac{\sigma(MPa)}{6.9} * 100 \quad (Ecuación\ 17)$$

$$CBR\ 0.2'' : \frac{\sigma(MPa)}{10.3} * 100 \quad (Ecuación\ 18)$$

Dónde: CBR 0.1'' o 0.2'': Valor CBR en porcentaje

σ : Esfuerzo a la penetración que se halla del CBR en MPa.

6.9 o 10.3: Valores de referencia de esfuerzo dados por el INVIAS.

Tabla 38. *Resultado final de CBR de cada muestra Sub-base*

Calculo de CBR				
Prueba		10 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
Muestra original		20,40%	24,34%	22,58%
Muestra con 1,5% PET		8,99%	11,23%	45,75%
Muestra con 3%PET	CBR 0,1''	8,49%	10,96%	14,90%
Muestra con 6%PET		6,99%	8,91%	12,03%
Muestra con 9%PET		2,97%	6,44%	11,23%
Muestra original		27,76%	46,90%	66,26%
Muestra con 1,5% PET		15,25%	33,36%	84,92%
Muestra con 3%PET	CBR 0,2''	13,64%	19,65%	31,07%
Muestra con 6%PET		11,12%	17,79%	23,39%
Muestra con 9%PET		5,65%	11,67%	21,45%

La tabla 38 indica todos los resultados de CBR para la muestra natural y sub-base con adición al 1.5%, 3%, 6%, 9%.

b) Diagramas

Para mejor comprensión de los resultados anteriores se presentan las siguientes figuras:

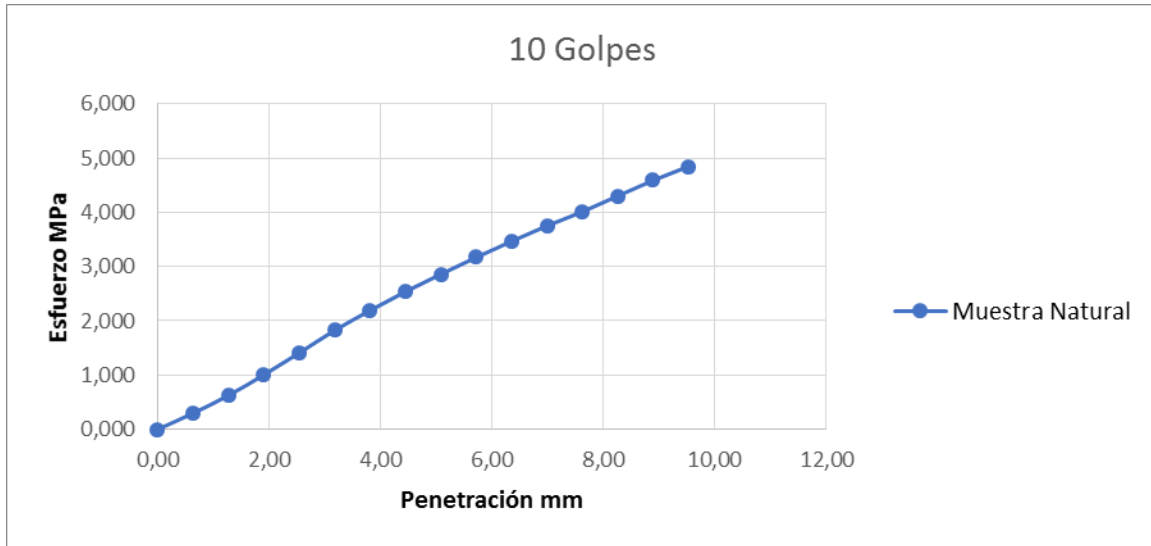


Figura 11. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural-10 Golpes.

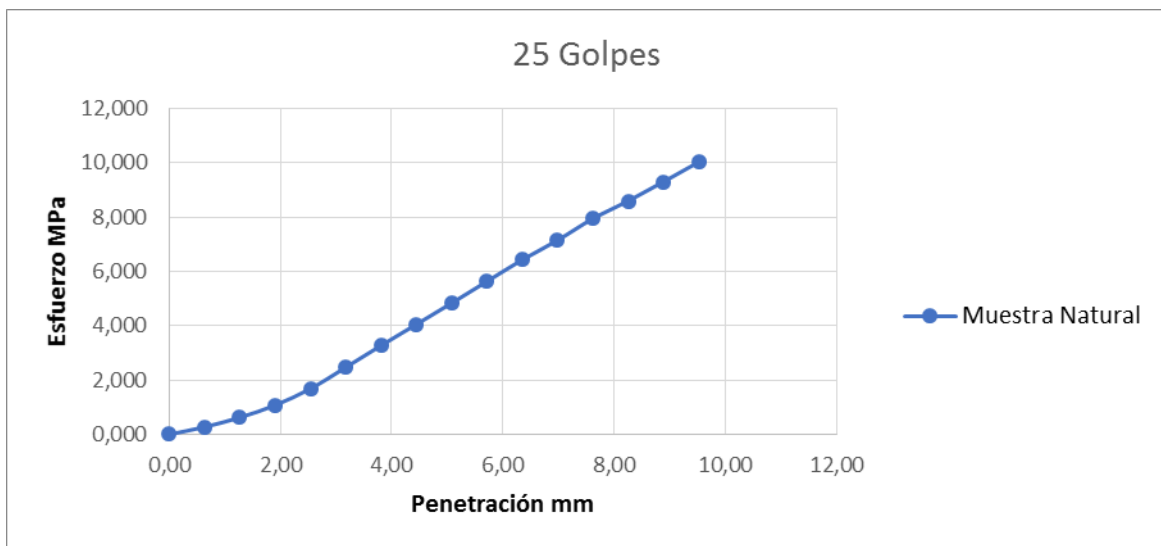


Figura 12. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural-25 Golpes.

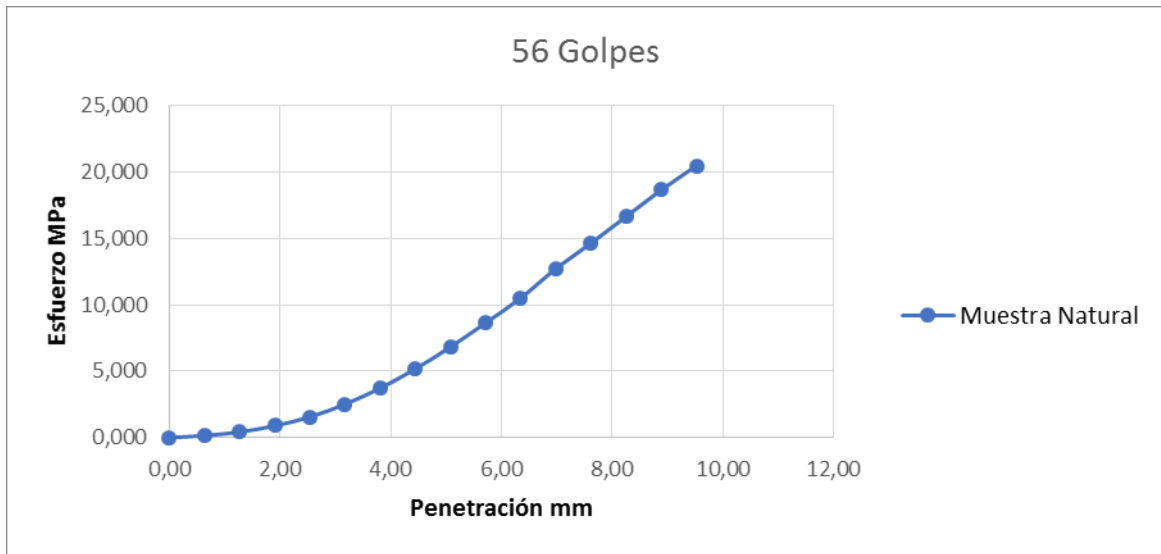


Figura 13. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural-56 Golpes.

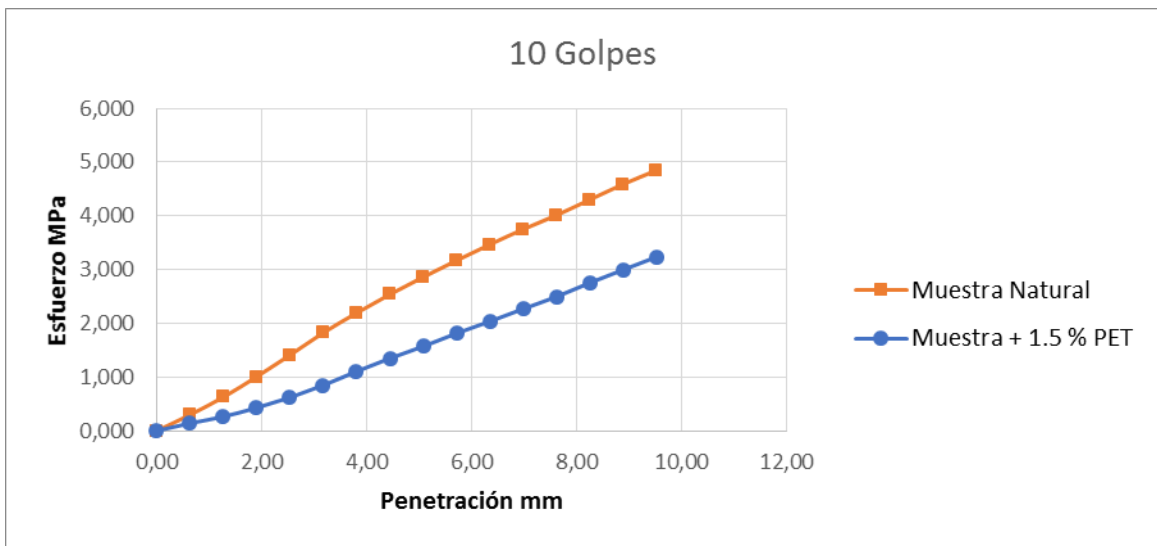


Figura 14. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 1.5% PET-10 Golpes.

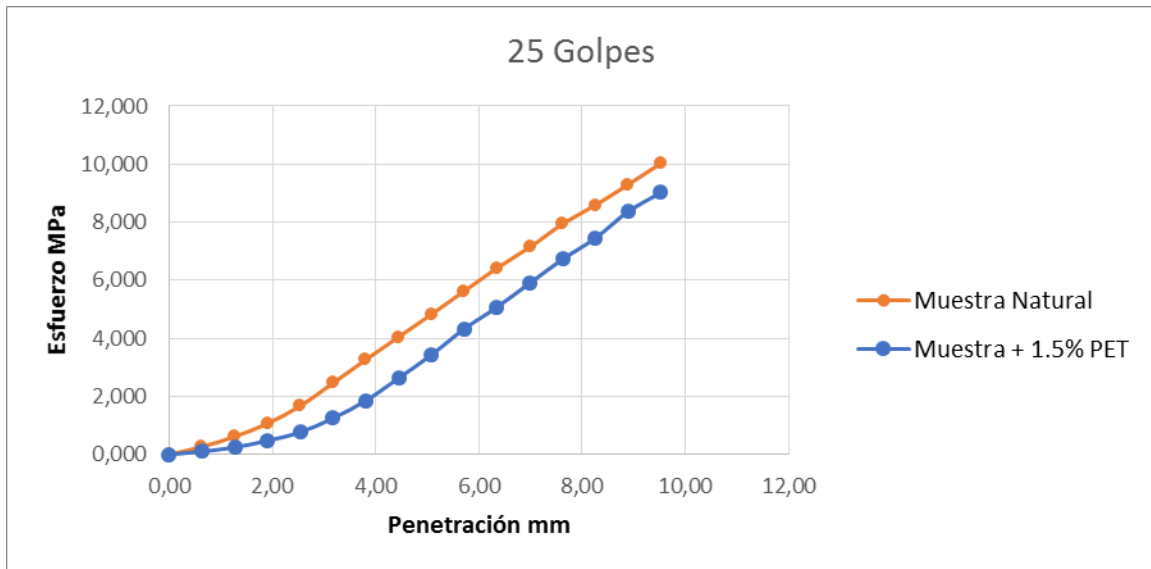


Figura 15. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 1.5% PET-25 Golpes.

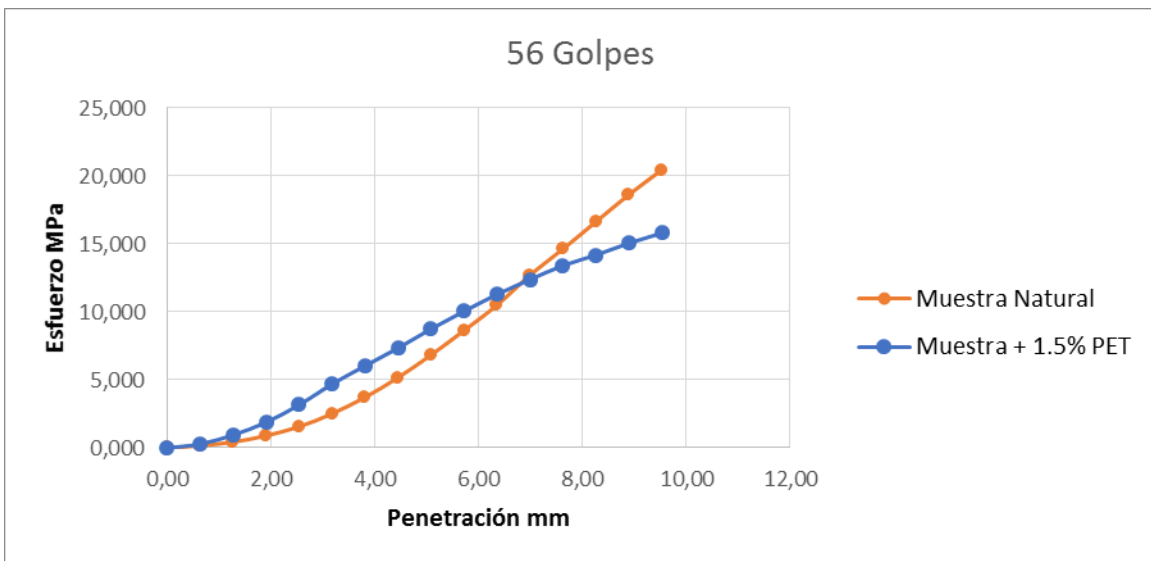


Figura 16. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 1.5% PET-56 Golpes.

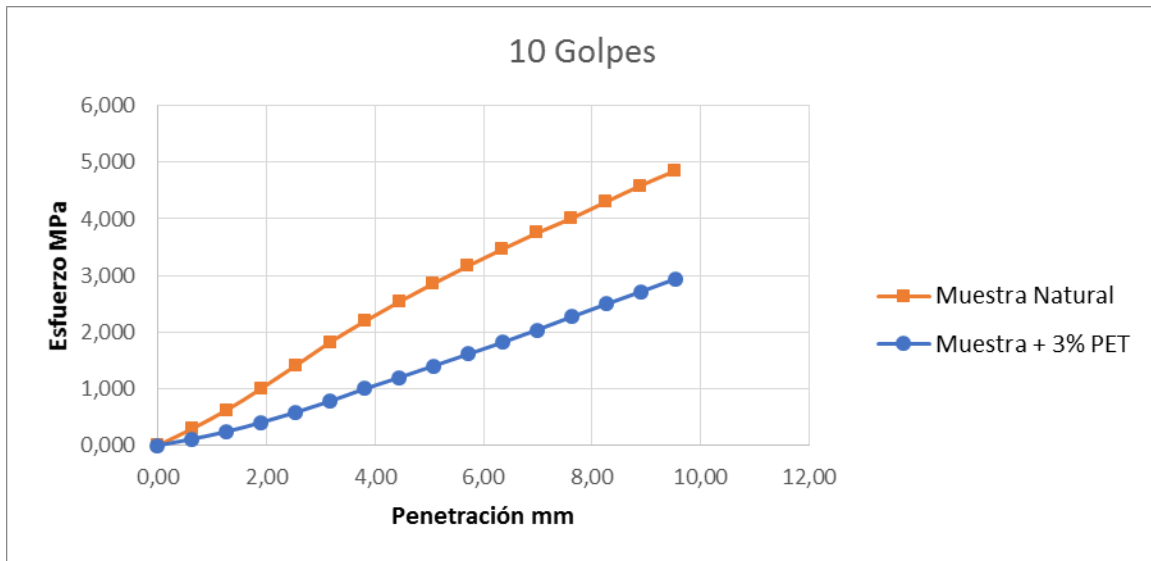


Figura 17. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 3% PET-10 Golpes.

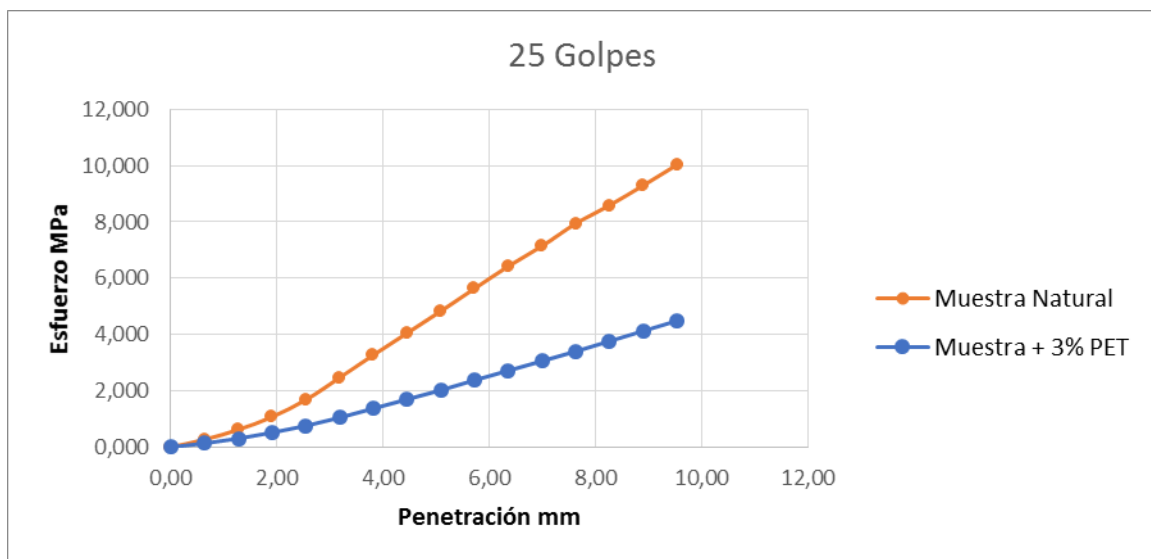


Figura 18. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 3% PET-25 Golpes.

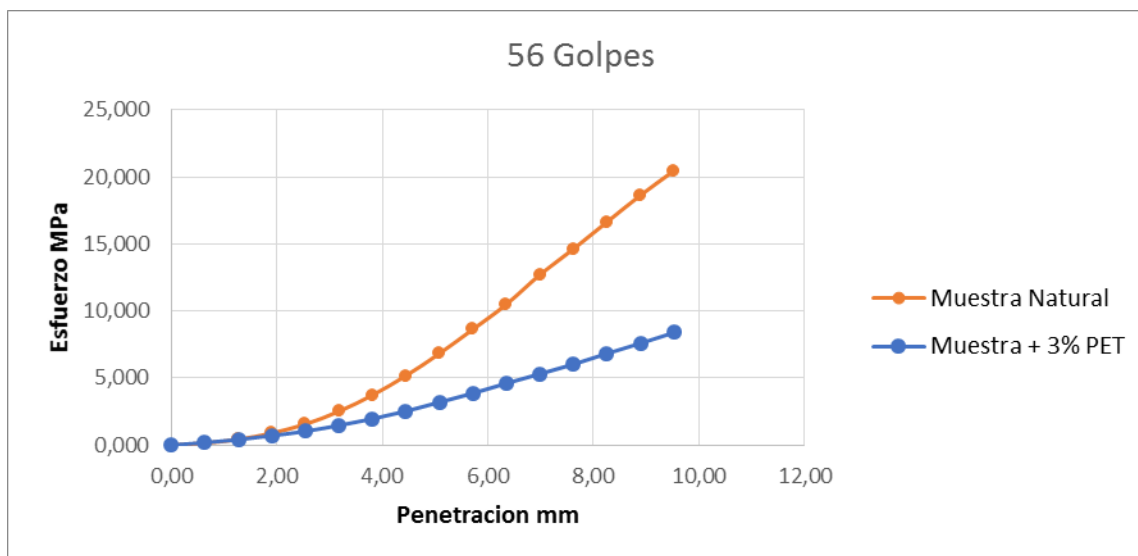


Figura 19. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 3% PET-56 Golpes.

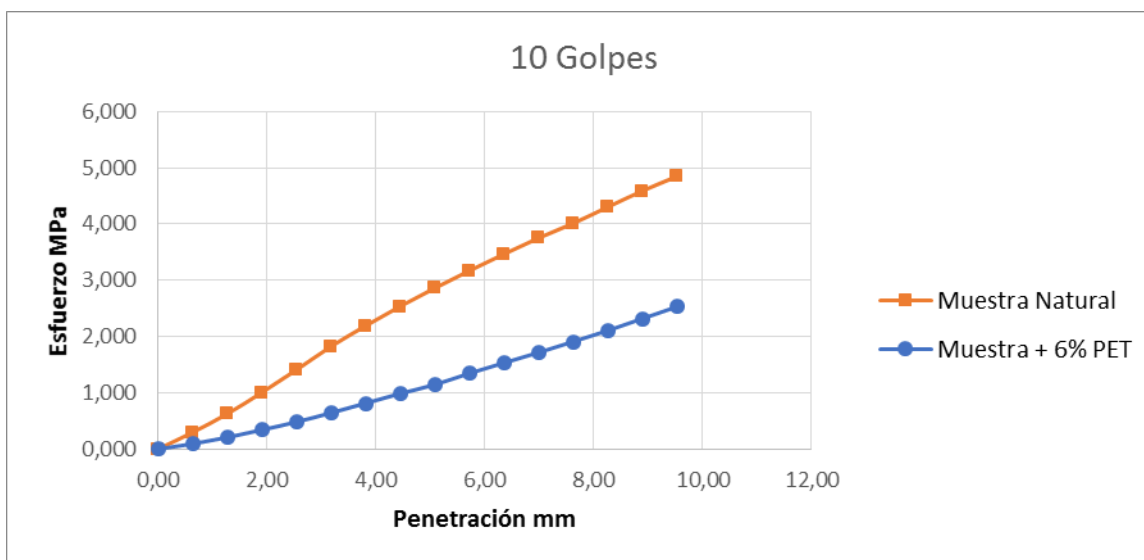


Figura 20. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 6% PET-10 Golpes.

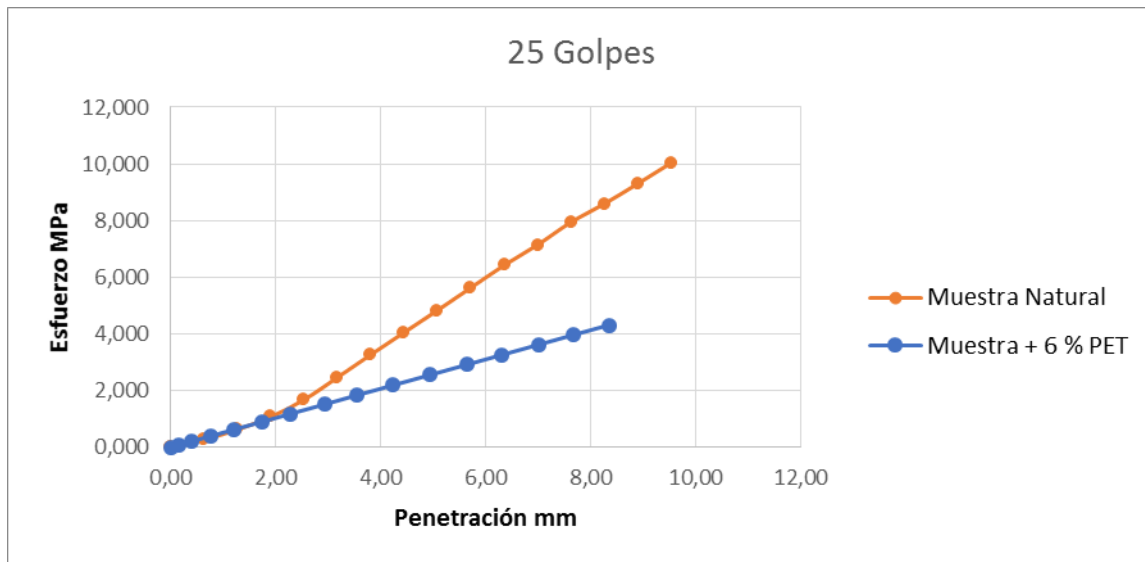


Figura 21. Gráfico esfuerzo (Mpa) Vs penetración (mm) de la muestra natural vs Muestra + 6% PET-25 Golpes.

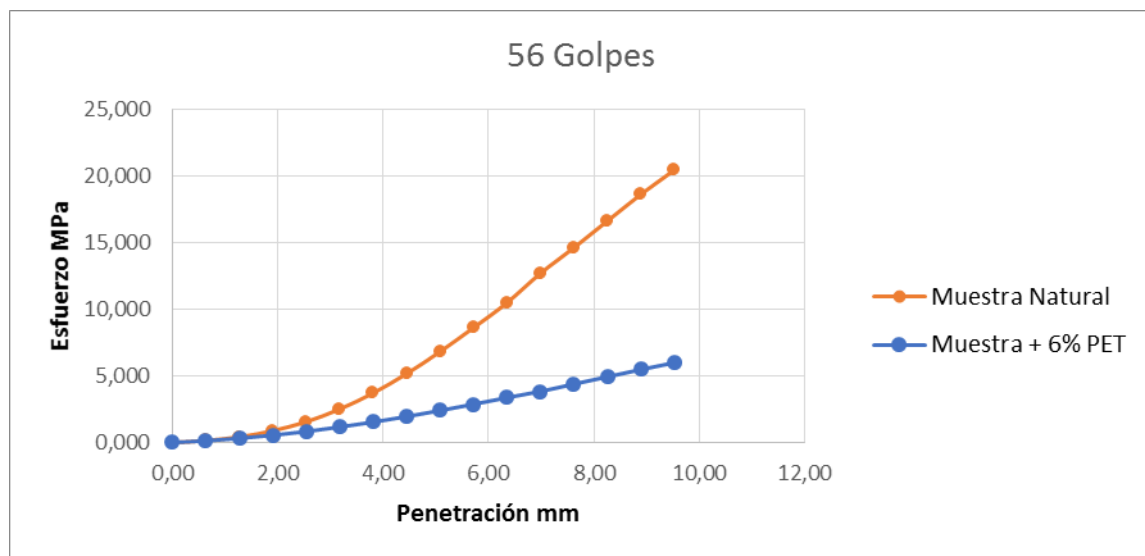


Figura 22. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 6% PET-56 Golpes.

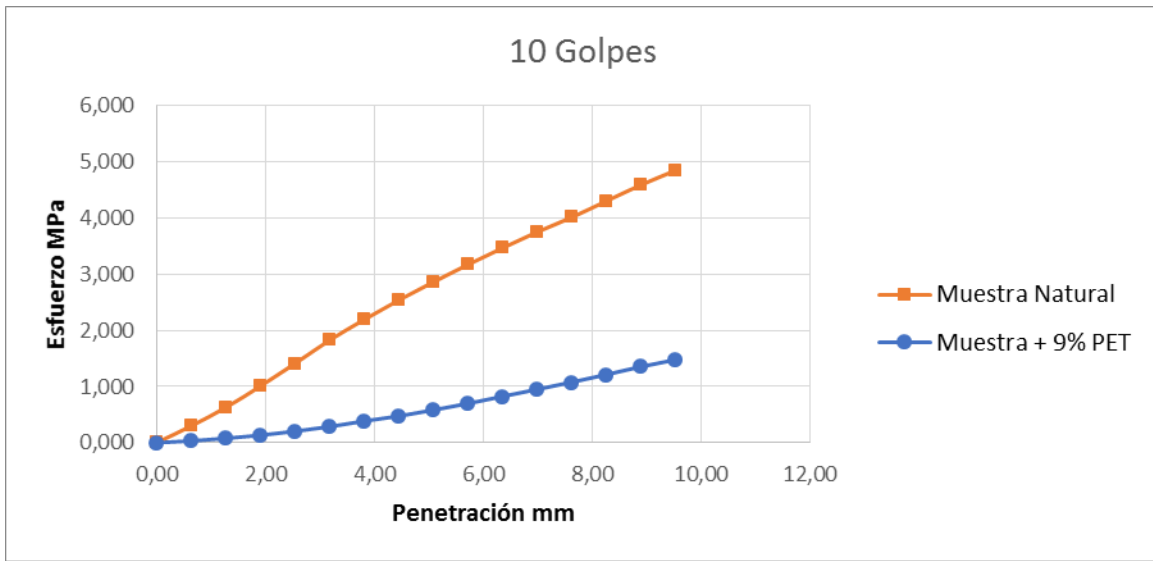


Figura 23. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 9% PET-10 Golpes.

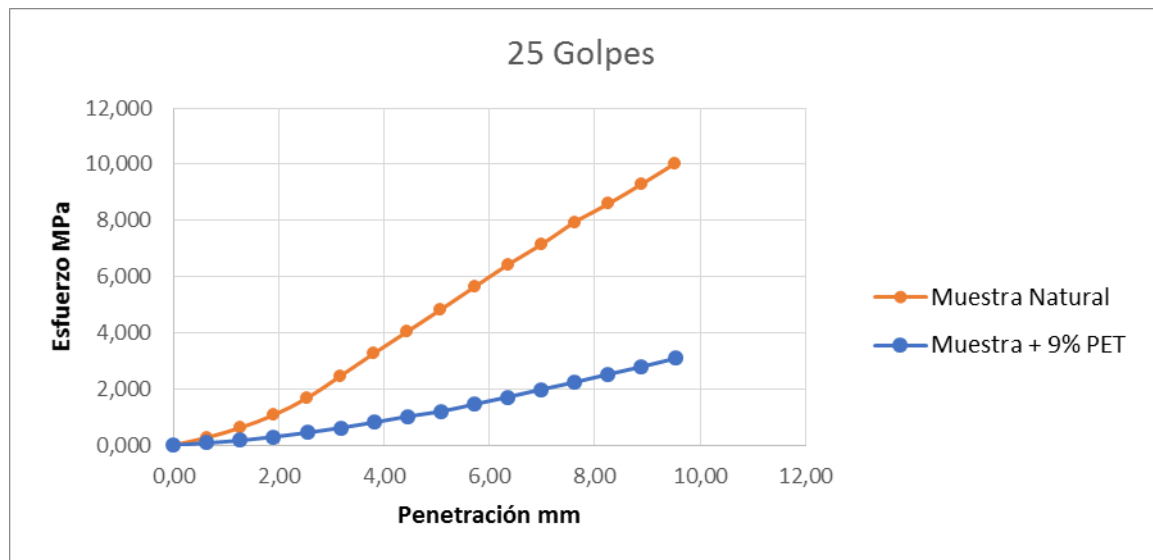


Figura 24. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 9% PET-25 Golpes.

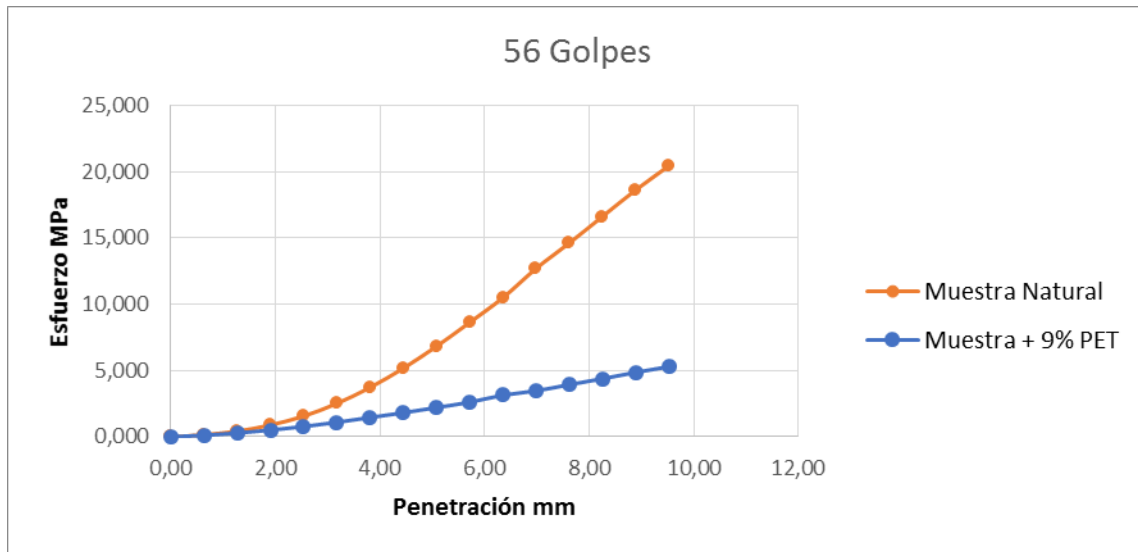


Figura 25. Gráfico esfuerzo (MPa) vs penetración (mm) de la muestra natural vs muestra + 9% PET-56 Golpes.

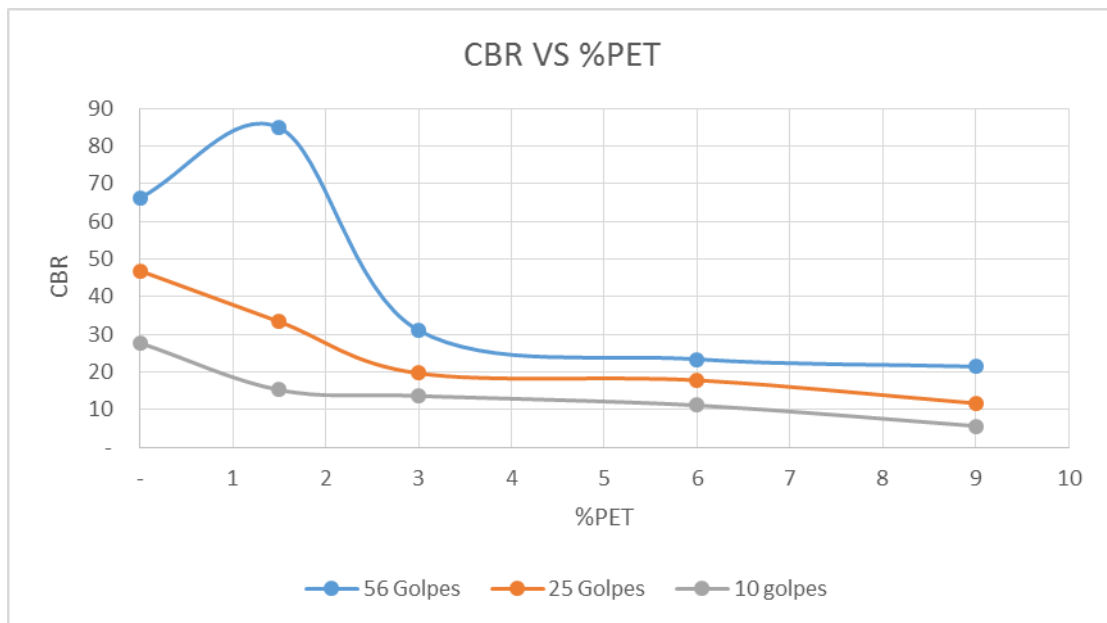


Figura 26.. Gráfico %PET Vs CBR.

10. Conclusiones

Es importante aclarar que el mejor material inicial sub-base granular es el proveniente de la cantera Agregados de Occidente comparado con el de la cantera Combia, siendo superior granulométricamente, por desgaste 22,8 % vs 31,2%, y por equivalencia de arena con 91% vs 59%.

La Norma INVIAS estipula el porcentaje mínimo de CBR que debe tener la sub-base para uso en vías, este no puede ser inferior al 30% y adicionalmente debe cumplir ciertos parámetros de control como las características físico-mecánicas y granulometría. Datos como 66.26 % de CBR para la Sub-base de cantera Agregados de Occidente que constituye más del 100% de cumplimiento para la muestra general y natural; garantizando que no se generen inconvenientes en los ensayos futuros.

Claro está, que la metodología elegida fue asertiva debido a que los datos esperados según las hipótesis planteadas; son ciertas. La mezcla en frío de los dos materiales, sub-base y PET funciona, lo que indica el valor CBR de 84.92% obtenido en la mezcla del material original en adición con 1.5% de PET, logrando así uno de los objetivos más relevantes de este proyecto. La compactación de los materiales, tanto de sub-base original como con adición de PET, para ambos es necesario trabajar a compactación máxima ya que los materiales arrojan mejores resultados, todos los CBR de mayor porcentaje se dan a 56 golpes.

Dentro de los objetivos de poder reciclar la mayor cantidad de material PET sin que afecte los parámetros de construcción y ejecución, se observa que después de 1.5% de adición en PET entre mayor sea la cantidad de PET menor es valor CBR (se observa en la ilustración número 26 valor

CBR vs % PET); concluyendo así que el mayor porcentaje que se puede adicionar a la sub-base es 3% del peso de este en PET. Los valores de CBR, en la transición de ir aumentando la cantidad de PET siempre al doble se observa que de 1.5% al 3%, cerca del 60% del valor de resistencia disminuye dejando como capacidad solo 31%, siendo este el límite; los valores de 6% con CBR de 23.39% y 9% de adición del PET el CBR disminuye a 21.45%, indica que después del 3% de adición del PET los valores de CBR disminuyen a razón 7% a 1% .

El peso aproximado promedio de una botella plástica de 500 ml es alrededor de 50 gr; partiendo de la base de que cualquier obra vial ya sea asfalto o pavimento, siempre va a necesitar el uso de sub-base y que por la densidad de este material los pesos mínimos de este superan una tonelada, se puede hablar de poder reciclar más 600 botellas plásticas por tonelada. A gran escala, en proyectos como las vías 4G donde se ejecutan kilómetros de vías se puede aumentar esta cifra a miles de botellas, generando impactos ambientales considerables.

Para concluir, este proyecto demuestra que las alternativas de materiales para el mejoramiento de procesos y capacidades del material granular, no solo está en la adición de productos procesados como cemento o hasta la misma adición de material granular de mayor calidad; hay que innovar y poner en uso las técnicas evaluadas fomentando el uso de materiales que en el ambiente están superando las capacidades mismas de procesamiento las cuales están generando un impacto ambiental negativo, este es el caso del PET. El uso en vías terciarias de este material es válido y efectivo desde los puntos de vista anteriormente tratados.

Tabla 39. *Resumen de resultados*

OBJETIVO	CONCLUSIÓN
Implementar el uso del PET reciclado en la modificación de la sub-base para su uso en las vías.	Este objetivo se puede cumplir debido a que según los estudios realizados y la metodología escogida se acertó, se puede utilizar la mezcla de los dos materiales mezclados en frío, teniendo como resultado un CBR de mayor resistencia al que puede presentar la sub base en su estado original.
Elaborar diferentes mezclas de sub-base con adición de polímeros termoplásticos (PET) reciclados	Se realizaron las mezclas de ambos materiales a diferentes porcentajes de PET, los cuales fueron de 1,5%, 3%, 6% y 9% . Se llega a la conclusión; la mayor resistencia en cada mezcla se obtiene a los 56 golpes, esto quiere decir, en su máxima compactación.
Analizar la metodología escogida para la combinación del agregado sub-base y el material PET.	La metodología escogida cumplió con las expectativas, los resultados fueron satisfactorios.
Aumentar la capacidad de resistencia mecánica del mismo, con su uso en vías o por lo menos mantener la capacidad de resistencia mínima	Se concluye que al mezclar el material granular con el PET, el porcentaje acertado es del 1,5% aumentado casi en un 30 % la resistencia, comparado con el material granular natural. Entre mayor sea la cantidad de PET menor es el valor de CBR.
Identificar el % de PET máximo a utilizar sin exceder los parámetros de la norma INVIAS.	Se obtienen los resultados necesarios para identificar el porcentaje máximo que se puede utilizar de PET al mezclarlo con sub-base, este no puede ser mayor al 3%.

La tabla 38 indica de manera comparativa los resultados obtenidos vs los objetivos propuestos.

11. Recomendaciones

Cabe resaltar que los datos anteriormente mostrados son tomados de laboratorio donde las condiciones son controladas y las variables como clima, humedad, compactación, densidades y secado del material son controladas.

Debido a que el enfoque del proyecto es buscar el mayor porcentaje de PET sin que el material granular deje de cumplir con los parámetros de normatividad INVIAS, es recomendable que si se requiere aumentar el valor de CBR, realice las adiciones de PET con respecto al peso del material granular con valores menores a 1.5%.

Antes de implementar este proyecto a un caso real, es recomendable que se realicen las pruebas respectivas en campo, debido a que en este proyecto no se realiza ningún análisis fuera del laboratorio.

El PET utilizado debe estar limpio y que sea la primera vez que lo reciclan.

El material granular a utilizar debe ser de material de arastre (rio), valga la redundancia, y con previo análisis de características mecánicas.

12. Bibliografía

Cita 1.

Arias Pineda, E. (2011). Crisis ambiental y sustentabilidad: emergencia de nuevos lenguajes en el escenario administrativo-organizacional. *Bdigital portalde revistas UN. 14* (1), 105-116.
Recuperado de: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/25449/39271>
[Citado el 17 de mayo de 2009]

Cita 2.

Estévez, R. (2013). La contaminación del plástico no entiende fronteras. *Eco Inteligencia. 100* (2), 2-33. Recuperado de: <https://www.ecointeligencia.com/2013/09/contaminacion-plastico-fronteras/> [Citado el 20 de septiembre de 2013]

Cita 3.

Ibíd

Estévez, R. (2013). La contaminación del plástico no entiende fronteras. *Eco Inteligencia. 100* (2), 2-33. Recuperado de: <https://www.ecointeligencia.com/2013/09/contaminacion-plastico-fronteras/> [Citado el 20 de septiembre de 2013]

Cita 4.

UNAM. (2013). Con botellas de PET, UNAM busca mejorar capacidad de carga en suelos. *Multimedios: Edición Monterrey. Monterrey, México.* Recuperado de: <http://www.multimedios.com/deportes/botellas-pet-unam-busca-mejorar.html> [Citado el 1 de enero de 2013]

Cita 5.

Borras, C. (2018). Las 3R de la ecología: Reducir, Reutilizar y Reciclar. *Ecología verde: Link to media.* Barcelona, España. Recuperado de: <https://www.ecologiaverde.com/las-3r-de-la-ecologia-reducir-reutilizar-y-reciclar-315.html> [Citado el 21 de septiembre de 2018]

Cita 6.

Pinzón, E., Mora, L. C. y Mendieta, Y. (2016). *Análisis del comportamiento de la base – cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado*. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia. Recuperado de:
<http://repository.ucatolica.edu.co:8080/bitstream/10983/16406/1/DOCUMENTO-ANALISIS%20DEL%20COMPORTAMIENTO%20DE%20LA%20BASE%20%20CEMENTO%20PARA%20PAVIMENTOS%20CON%20ADICION%20DE%20RESIDUOS%20PET%20RECICLADO.pdf>

Cita 7.

Alesmar, L., Rendón, N. y Korody, M. (2008). Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (pet) cemento. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*. 23 (1), 2-25. Recuperado de:
http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006

Cita 8.

Zapana, M. y Cahuina, C. (2016). La evaluación del valor de la resistencia mecánica CBR de las canteras Anahuarque y Patapatade la ciudad de Cusco con la adición de filamentos de tereftalato de polietileno (PET) para mejoramiento de sub-base. Recuperado de:
<http://media.utp.edu.co/vicerrectoria-de-investigaciones/archivos/PONENCIA%20%20EVALUACION%20DE%20LA%20RESISTENCIA%20DE%20LA%20SUB-BASE%20GRANULAR.pdf>

Cita 9.

Muñoz, R. (2013). *Estudio de mezclas de áridos reciclados de hormigón y asfáltico estabilizados con cemento para su aplicación en bases y sub-bases de carreteras* (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica de Cataluña-Escola de Camins, Cataluña, España. Recuperado de:

<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/26051/TFM%20Rafael%20Mu%C3%B1oz%20Est%C3%A9vez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cita 10.

Ayala, R. (1984). *Esfuerzo y deformación en dos direcciones* (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México. Recuperado de:
<http://eprints.uanl.mx/5996/1/1020070569.PDF>.

Cita 11.

Moll, R. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos*. La Habana, CU: Editorial Universitaria. (p. 14). Citado por Rondón, H.A. y Reyes, F.A. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista Ingenierías*, 8 (14), p. 24

Cita 12.

Vanegas, D Y Caicedo, B. (2015). Estudio de deformaciones permanentes de capas granulares de pavimentos. *Google Académico [Base de datos en línea]*, (1), p. 2-3 [Citado el 19 de mayo de 2015]

Cita 13.

Moll, R. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos*. La Habana, CU: Editorial Universitaria. (p. 14).

Cita 14

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1986). *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington, D. C.

Cita 15

Instituto de desarrollo urbano y Universidad de los Andes. (2002): *Manual de diseño de pavimentos para Bogotá*. Bogotá D.C, Colombia.

Cita 16

Instituto Nacional de Vías. (2002). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos, medios y altos volúmenes de Tránsito*. Bogotá D.C., Colombia.

Cita 17

Rondon, H. y Reyes, F. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista ingenierías universidad de Medellín*. (8).
Recuperado de: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75012454006>> issn 1692-3324.
Citado por erlingsson, s. e ingason, t., 2004. Performance of two thin pavement structures during accelerated pavement testing using a heavy vehicle simulator. 2nd international conferences on accelerated pavement testing, university of Minnesota.

Cita 18.

Rondón, H. y Reyes, F. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista ingenierías universidad de Medellín*. (8).
Recuperado de: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75012454006>> issn 1692-3324.
Citado por erlingsson, s. e ingason, t., 2004. Performance of two thin pavement structures during accelerated pavement testing using a heavy vehicle simulator. 2nd international conferences on accelerated pavement testing, university of Minnesota.

Cita 19.

Rondón, H. y Reyes, F. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista ingenierías universidad de Medellín*. (8).
Recuperado de: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75012454006>> issn 1692-3324.

Cita 20.

Pérez, I., Medina, L. y Romana, M. (2008). *Deformación permanente de un material granular empleado en firmes de carreteras*. Recuperado de:
<<http://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/18090>>

Cita 21.

Pérez, I., Medina, L. y Romana, M. (2008). *Deformación permanente de un material granular empleado en firmes de carreteras*. Recuperado de:
<<http://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/18090>>

Cita 22.

Quintana, H. y Rondón; A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá, CO: Ecoe Ediciones.

Cita 23.

Quintana, H. y Rondón; A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá, CO: Ecoe Ediciones.

Cita 24.

Quintana, H. y Rondón; A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá, CO: Ecoe Ediciones. 1-26

Cita 25.

Minaya, S., & Ordóñez, A. (Ed. 2). (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima, Perú. Universidad Nacional De Ingeniería.

Cita 26.

Minaya, S., & Ordóñez, A. (Ed. 2). (2006). *Diseño moderno de pavimentos asfálticos*. Lima, Perú. Universidad Nacional De Ingeniería.

Cita 27.

Rondón, H. y Reyes, F. (2011). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá, Colombia

Cita 28.

Ministerio de Economía y Finanzas. (2015). *Pautas metodológicas para el desarrollo de alternativas de pavimentos en la formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de carreteras*. Lima, Perú.

Cita 29.

Herrera, F. (2009). Calculo de la capacidad portante a corto plazo. En Herrera, F. (Ed. 1). *Cimentaciones superficiales*. (pp. 1-26). España: Madrid.

Cita 30.

Ugarte, O. (Ed. 1). (2014). *Diseño geométrico de carreteras con AutoCAD*. Lima, Perú: Editora Macro E.I.R.L.

Cita 31.

Montejo, A. (2006). Diseño de espesores de pavimentos rígidos para calles y carreteras. En Montejo, A. (Ed. 3). *Ingeniería de pavimentos: fundamentos, estudios básicos y diseño*. (pp. 1-496). Universidad católica de Colombia.

Cita 32.

Rondo, A. y Reyes, F. (2011). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Introducción XXIX.

Cita 33.

Crawford, R. (2013). Tereftalato de polietileno. *Wikipedia la enciclopedia libre* [versión electrónica]: Reino Unido, https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno

Cita 34.

Kumar, T. (2014). A study of correlation between California bearing Ratio (CBR) Value With Other Properties of Soil. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 1(4). Recuperado de: Website: www.ijetae.com.

11. REFERENCIAS

Ayala, R. (2013). *Esfuerzo y deformación en dos direcciones*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Monterrey, México. Recuperado de: <http://eprints.uanl.mx/5996/1/1020070569.PDF>.

Coordinación geotécnica del instituto de ingeniería. (2013). *Con botellas de PET, UNAM busca mejorar capacidad de carga en los suelos*. México. Recuperado de: <http://www.multimedios.com/deportes/botellas-pet-unam-busca-mejorar.html>

Instituto Nacional de vías. (2002). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con bajos, medios y altos volúmenes de Tránsito*. Bogotá D.C., Colombia.

Moll, R., Martínez, P. y Eduardo, D. *Bases del procedimiento para determinar la resistencia del conjunto subbase - subrasante, para el cálculo de los espesores de reciclado con asfalto espumado; a partir de la evaluación de la estructura existente, con el penetrometro dinámico de cono (pdc)*. (Tesis de Maestría). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría CUJAE, La Habana, Cuba.

Rodríguez, E., Rondon, H., Veléz, D. y Aguirre, L. (2006). Influencia de la inclusión de desecho de PVC sobre el CBR de un material granular tipo subbase. *Revista ingenierías universidad de Medellín*. 5 (9). Recuperado de: <https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/232>

Rondón, H. y Reyes, F. (2009). Deformación permanente de materiales granulares en pavimentos flexibles: estado del conocimiento. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. 1 (8).

Recuperado de: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75012454006>> ISSN 1692-3324

Tellez, A. (2012). *La complejidad de la problemática ambiental de los residuos plásticos: Una aproximación al análisis narrativo de política pública en Bogotá*. (Tesis de Maestría).

Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias Económicas. Bogotá, Colombia.