

**MEJORAMIENTO DE UNA SUBRASANTE DE UN SUELO ARENO-ARCILLOSO
EMPLEANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) TRITURADO
MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO.**

**LUIS GILBERTO ANGARITA PERPIÑÁN
SILVIA NATHALY URIBE RIOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**MEJORAMIENTO DE UNA SUBRASANTE DE UN SUELO ARENO-ARCILLOSO
EMPLEANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) TRITURADO
MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO.**

**LUIS GILBERTO ANGARITA PERPIÑÁN
SILVIA NATHALY URIBE RIOS**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Civiles

**DIRECTOR
LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
Magister en Ingeniería y Ciencias de la Información**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por el conocimiento impartido a través de los profesores y diversas actividades ofrecidas, a los laboratoristas del Edificio Álvaro Beltrán Pinzón por su apoyo y disposición durante el desarrollo de este proyecto de investigación y a todas aquellas personas que con un consejo o aliento nos motivaron a seguir. A nuestro director de proyecto, el ingeniero Luis Alberto Capacho Silva por su dedicación, confianza y disposición para guiarnos en este proceso y culminarlo con éxito.

DEDICATORIA

“A Dios que es mi guía y mi gran amigo fiel, porque me regala la vida y la salud para disfrutarla.

A mis padres, Manuel Darío Uribe García y Carmen Elisa Ríos Dueñas, por ser la representación de Él en este mundo, por todo su amor, comprensión y apoyo infinito. Por ellos, soy la gran persona de hoy, llena de valores, virtudes y muchas habilidades que me caracterizan.

A mi hermano, Darío José Uribe Ríos, que, con su ejemplo, consejos y cariño, me motiva a lograr todos mis sueños y llena siempre mi corazón de muchísima esperanza.

A mi familia y amigos que, día a día me enseñan cosas maravillosas en este viaje llamado vida.”

Silvia Nathaly Uribe Ríos

Primero a mi padre todo poderoso Dios que siempre me dijo que hacer en los momentos difíciles, a mi padre GILBERTO ANGARITA que a pesar de todas las caídas que tuve, siempre estuvo apoyándome con todo para que siguiera a delante, mi querida y hermosa madre LIBIA PERPIÑAN por todo el amor y comprensión que me ha brindado toda vida y ser una de mis rocas para poder edificar en un futuro; y que en ningún momento estos pilares de mi vida dejaron de creer en mí. Gracias padre y madre por todo lo que me dan.

A mis tres hermanas mayores AZUCENA ANGARITA, LIZ ANGARITA, ISABEL ANGARITA. Cada una de ellas con un granito de arena y con su plena confianza en mí, siempre diciéndome que lo iba a lograr, esta meta es para ellas, que a pesar de todo siempre fueron mi apoyo, en momentos que los necesité.

A un personita que me acompañó en momentos difíciles, felices, buenos, malos, exitosos, etc... a esa mujer llamada PAULA GONZALEZ, que siempre me acompañó durante el proceso y fue un gran cimiento para lograr esta meta. Gracias a ella por estar ahí muchas veces, cuando más necesitaba, en las buenas, en las malas y en las peores, observando todo este proceso, y gracias también a su familia por el apoyo.

Luis Gilberto Angarita Perpiñán

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO DE REFERENCIA.....	21
1.1 SUELO COMPUESTO.....	21
1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO	21
1.2.1 Ensayo de Compresión Inconfinada.	21
1.2.2 Ensayo Triaxial Estático.....	21
1.2.2.1 Ensayo Triaxial estático con consolidación y con drenaje.	22
2. METODOLOGÍA	24
2.1 SUELO ARENO ARCILLOSO.....	24
2.1.1 Análisis granulométrico	25
2.1.2 Límites de Atterberg.....	26
2.1.3 Peso específico.....	27
2.1.4 Ensayo Modificado de Compactación o Proctor Modificado.	27
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TRITURADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	28
2.2.1 Análisis Granulométrico.	29
2.2.2 Peso Específico.	29
2.3 MOLDE EMPLEADO	30
2.3.1 Características.	30
2.3.2 Determinación de las condiciones de compactación para el molde empleado.	30
2.4 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE SUELO ARENO-ARCILLO Y PET TRITURADO TRATADAS TÉRMICAMENTE	31
2.4.1 Probetas de suelo areno arcilloso con adición de 5 % de PET triturado.....	34

2.4.2 Dosificación para probetas de suelo areno arcilloso con adición de PET triturado en diferentes porcentajes (10%,15%, 20%, 25% y 30%).	35
2.5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS SIN ADICIÓN DE PET	36
3. ENSAYOS DE LABORATORIO	38
3.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA	38
3.1.1 Velocidad de carga.	38
3.2 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO	39
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA	40
4.1.1 Probetas sin adición de PET.	40
4.1.2 Probetas con adición de PET	41
4.1.2.1 Probetas con 5% de PET.	41
4.1.2.2 Probetas con 10% de PET.	42
4.1.2.3 Probetas con 15% de PET.	43
4.1.2.4 Probetas con 20% de PET.	45
4.1.2.5 Probetas con 25% de PET.	46
4.1.2.6 Probetas con 30% de PET.	47
4.2 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO	50
4.2.1 Probetas con el porcentaje óptimo de PET.	50
4.2.1.1 Probeta con contenido del 25% PET con presión de confinamiento de 50 KPa.	50
4.2.1.2 Probeta con contenido del 25% PET con presión de confinamiento de 100 KPa.	51
4.2.2 Probetas de suelo areno arcilloso no modificado.	51
4.2.2.1 Probetas de suelo areno arcilloso con presión de confinamiento de 50 KPa.	52
4.2.2.2 Probetas de suelo areno arcilloso con presión de confinamiento de 100 KPa.	52

4.2.3 Comparación de resultados según el criterio de falla de Mohr Coulomb.	53
4.2.3.1 Criterio de falla de Mohr Coulomb del suelo areno arcilloso.	53
4.2.3.2 Criterio de falla de Mohr Coulomb del suelo modificado con PET.	54
 5. IMPLEMENTACIÓN EN LAS SUBRASANTES	55
5.1 CAMIÓN CISTERNA DE RIEGO	55
5.2 ADOQUINES	55
 6. CONCLUSIONES	57
 7. OBSERVACIONES.....	58
 BIBLIOGRAFIA	59
 ANEXOS	60

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Grafica 1. Curva granulométrica del suelo	26
Grafica 2. Determinación limite líquido.	27
Gráfica 3. Curva de Compactación del ensayo Proctor modificado del suelo areno arcilloso.....	28
Gráfica 4. Dimensiones en centímetros, del molde empleado para la elaboración de las probetas.	30
Gráfica 5. Valor de carga máxima de las probetas sin PET.....	40
Gráfica 6. Valores de resistencia promedio para las probetas con 5% de adición de PET tratadas térmicamente.	42
Gráfica 7. Valores de resistencia promedio para las probetas con 10% de adición de PET tratadas térmicamente.	43
Grafica 8. Valores de resistencia promedio para las probetas con 15% de adición de PET tratadas térmicamente.	44
Gráfica 9. Valores de resistencia promedio para las probetas con 20% de adición de PET tratadas térmicamente.	45
Gráfica 10. Valores de resistencia promedio para las probetas con 25% de adición de PET tratadas térmicamente.	46
Gráfica 11. Valores de resistencia promedio para las probetas con 30% de adición de PET tratadas térmicamente.	47
Gráfica 12. Carga Axial Vs. Tiempo en el horno de todos los porcentajes	48
Gráfica 13. Carga Axial Máxima Vs. Porcentaje de PET	49
Gráfica 14. Incremento de la carga axial del suelo con adición de PET respecto al suelo sin adición del mismo	49
Gráfica 15. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta con contenido de porcentaje de PET óptimo para presión de confinamiento de 50 KPa.....	50

Grafica 16. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta con contenido de porcentaje de PET óptimo para presión de confinamiento de 100 KPa.....	51
Grafica 17. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta sin adición de PET para una presión de confinamiento de 50 KPa	52
Grafica 18. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta sin adición de PET para una presión de confinamiento de 100 KPa	52
Grafica 19. Determinación del ángulo de fricción y cohesión por el criterio de falla de Mohr Coulomb para suelo sin adición de PET.....	53
Grafica 20. Determinación del ángulo de fricción y cohesión por falla de Mohr Coulomb suelo con 25% de PET.....	54

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Detalle del diseño del molde empleado para la elaboración de las probetas.....	30
Imagen 2. Procedimiento para elaborar las probetas previo al tratamiento en el horno.....	32
Imagen 3. Probeta de suelo areno arcilloso con 45% de PET triturado.....	33
Imagen 4. Probetas con diferentes porcentajes de contenido de PET sometidas a 2 horas en el horno.....	33
Imagen 5. Probetas de diferentes horas para el 5% de porcentaje de PET	34
Imagen 6. Probetas con diferentes variaciones de porcentaje de PET.....	36
Imagen 7. Probetas de suelo areno arcilloso sin PET	37
Imagen 8. Ensayo de compresión inconfiada a una probeta con adición de 5% de PET en la MTS 810.....	38
Imagen 9. Ensayo Triaxial Estático a una de las probetas con porcentaje óptimo de PET	39
Imagen 10. Probeta fallada de suelo areno arcilloso sin adición de PET triturado	41
Imagen 11. Probeta con contenido de PET después del ensayo de compresión inconfiada	48
Imagen 12. Primera alternativa de disposición en campo de la mezcla de suelo y PET triturado.....	55
Imagen 13. Segunda alternativa de disposición en campo de la mezcla de suelo y PET triturado.....	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción del tipo de suelo por el Sistema de clasificación de suelos unificado (S.U.C.S.)	26
Tabla 2. Peso específico del suelo areno arcilloso	27
Tabla 3. Condiciones del método A para el ensayo modificado de compactación.	28
Tabla 4. Granulometría del material PET triturado.....	29
Tabla 5. Peso específico del material PET triturado	29
Tabla 6. Parámetros de compactación para la elaboración de las probetas en el molde empleado.	31
Tabla 7. Dosificación de suelo areno arcilloso para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado.....	34
Tabla 8. Dosificación de PET triturado para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado.....	34
Tabla 9. Dosificación de agua para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado	34
Tablas 10. Temperaturas promedio de las probetas al finalizar el tiempo en el horno	35
Tabla 11. Dosificación de suelo areno arcilloso para elaborar una (1) probeta de PET triturado.....	35
Tabla 12. Dosificación de PET triturado para elaborar una (1) probeta de PET triturado.....	35
Tabla 13. Dosificación de agua para elaborar una (1) probeta de PET triturado .	36
Tabla 14. Temperaturas promedio de las probetas al final del tiempo en el horno	36
Tabla 15. Valores de resistencia para las probetas sin adición de PET.	40
Tabla 16. Valores de resistencia para las probetas con 5% de adición de PET tratadas térmicamente.	41

Tabla 17. Valores de resistencia para las probetas con 10% de adición de PET tratadas térmicamente.	43
Tabla 18. Valores de resistencia para las probetas con 15% de adición de PET tratadas térmicamente.	44
Tabla 19. Valores de resistencia para las probetas con 20% de adición de PET tratadas térmicamente.	45
Tabla 20. Valores de resistencia para las probetas con 25% de adición de PET tratadas térmicamente	46
Tabla 21. Valores de resistencia para las probetas con 30% de adición de PET tratadas térmicamente	47
Tabla 22. Valores óptimos de contenido de PET a adicionar a los diferentes tipos de suelos para incrementar su resistencia.....	58

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Detalle del análisis granulométrico del material areno arcilloso	60
Anexo B. Detalle de la determinación de límites de Atterberg para el suelo areno arcilloso.....	61
Anexo C. Detalle de la determinación del Peso Específico de la arena arcillosa. .	62
Anexo D. Detalle del Ensayo Modificado de Compactación o Proctor Modificado.	63
Anexo E. Detalle de la determinación del Peso Específico del Tereftalato de Polietileno, PET, triturado.	67
Anexo F. Cálculo tipo del método empleado para determinar el porcentaje (%) de PET en la masa de suelo (5% de PET).	68
Anexo G. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para para el suelo areno arcilloso sin contenido de PET a una presión de confinamiento de 50 KPa	70
Anexo H. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso sin contenido de PET a una presión de confinamiento de 100 KPa	71
Anexo I. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso con contenido de PET del 25% a una presión de confinamiento de 100 KPa	72
Anexo J. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso con contenido de PET del 25% a una presión de confinamiento de 100 KPa	73

RESUMEN

TÍTULO: MEJORAMIENTO DE UNA SUBRASANTE DE UN SUELO ARENO-ARCILLOSO EMPLEANDO TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET) TRITURADO MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO.*

AUTORES: LUIS GILBERTO ANGARITA PERPIÑÁN, SILVIA NATHALY URIBE RIOS**

PALABRAS CLAVE: Tereftalato de Polietileno (PET), Arena Arcillosa, Suelo areno arcilloso.

DESCRIPCIÓN:

Este artículo de investigación busca comparar el comportamiento de la resistencia axial y cortante de un suelo areno arcilloso alterado mediante la adición de Tereftalato de Polietileno (PET) triturado y sometido a un tratamiento térmico en el horno; y la de un suelo sin contenido del material plástico. A través de la realización de probetas, se modifica el porcentaje del contenido de PET volumétricamente y se varía el tiempo de las probetas en el horno. Los ensayos empleados para el análisis comparativo son el ensayo de compresión inconfiada y el ensayo triaxial estático consolidado y drenado que permiten dar respuesta si la modificación hecha del suelo beneficia la resistencia. Conforme a lo anterior, el porcentaje de PET triturado de 25% sometido a 4 horas de cocción en el horno, fue el que incrementó en un 169% la resistencia, comparado con el suelo natural y de acuerdo con los resultados del ensayo de compresión inconfiada. El suelo modificado resistió 3,01 kN y el suelo sin adición 1,12 kN de acuerdo a los ensayos de compresión inconfiada. Los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, también aumentaron comparados con los valores del suelo sin PET, en un 94% y 187%, respectivamente; conforme a los resultados generados del ensayo triaxial estático. La cohesión del suelo modificado fue de 103,32 KPa comparada con 51,55 KPa a la del suelo modificado; y el ángulo de fricción tuvo un valor de 16° para el suelo sin adición y 46° el suelo con adición del porcentaje óptimo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva, Magister en Ingeniería y Ciencias de la Información.

ABSTRACT

TITLE: IMPROVEMENT OF A SUBRASANT OF A CLAY SAND SOIL USING CRUSHED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) BY THERMAL TREATMENT. *

AUTHORS: LUIS GILBERTO ANGARITA PERPIÑÁN, SILVIA NATHALY URIBE RIOS**

KEYWORDS: Polyethylene Terephthalate (PET), Loamy Sand, Sandy-clayey soil

DESCRIPTION:

This research article seeks to compare the behavior of the axial and shear strength of an altered sandy clay soil by the addition of crushed polyethylene terephthalate (PET) and subjected to a heat treatment in the furnace; with the one of a soil without plastic material. Through the realization of specimens, the percentage of the PET content is modified volumetrically and the time of the specimens in the furnace is varied. The tests used for the comparative analysis are the unconfined compression test and the consolidated and drained static triaxial test that allow to answer if the modification made of the soil benefits the resistance. According to the above, the percentage of crushed PET of 25% subjected to 4 hours of cooking in the oven, was the one that increased by 169% the resistance, compared to natural soil and according to the results of the unconfined compression test. The modified soil resisted 3,01 kN and the soil without added 1,12 kN according to the unconfined compression tests. The parameters of cohesion and angle of friction, also increased compared with the values of the soil without PET, in 94% and 187%, respectively; according to the results generated from the static triaxial test. The cohesion of the modified soil was 103,32 KPa compared to 51,55 KPa to that of the modified soil; and the angle of friction had a value of 16 ° for the soil without addition and 46 ° the soil with addition of the optimum percentage.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Físico – Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva, Magister en Ingeniería y Ciencias de la Información

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la humanidad ha enfrentado un problema importante como lo es la contaminación ambiental. Uno de los principales inconvenientes, es el uso de materiales plásticos como el Tereftalato de polietileno (PET), pues su degradación dura casi medio siglo, y a pesar de ello, continúa creciendo su consumo y producción.

La existencia de diferentes tipos de suelos en estado natural a la hora de ejecutar obras de ingeniería, generan sobrecostos y tiempos adicionales, dependiendo de los procesos necesarios para que el suelo cumpla con los requisitos adecuados. En el área de vías, existen tres decisiones a tomar que son: diseñar de acuerdo a las condiciones del suelo natural, remover y desechar el suelo existente y reemplazarlo por uno con características adecuadas o alterar las propiedades del material existente al mezclarlo con otro material. Para el mejoramiento de subrasantes, se utilizan procesos físico-químicos en donde se adicionan materiales como cemento Portland, asfalto, cal, cenizas, entre otros que mejoran las condiciones de resistencia.

Actualmente hay algunas investigaciones que han dado lugar a la evolución de nuevos materiales compuestos que utilizan residuos de plástico reciclado para diversas aplicaciones en la ingeniería civil. El proceso común para preparar el material compuesto consiste en el calentamiento y la mezcla de los materiales de admisión de plástico a una temperatura especificada. La mezcla calentada se comprime en un molde específico para formar un producto final. Las propiedades del material compuesto dependen de la presión, el tipo de plástico y granulados del reciclado.¹

¹ Naji Khoury, A.M. ASCE, Charbel Khoury, S.M. ASCE y Younane Abousleiman3, M.ASCE ; Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various Geo-Engineering Applications; Geocongress 2008: Geotechnics Of Waste Management And Remediation.

A través de este proyecto de investigación se busca mejorar las propiedades de resistencia de una subrasante conformada de suelo areno arcilloso, empleando variaciones volumétricas de porcentajes de Tereftalato de polietileno (PET), reciclado y triturado. Además, los especímenes realizados tienen un tratamiento térmico en el horno y se hace una observación del tiempo de duración sometidos, a una temperatura de aproximada de 270 grados centígrados. La resistencia axial de los especímenes se obtiene a través del ensayo de Compresión inconfiada y la resistencia cortante se verifica, al espécimen con mejor comportamiento axial, por medio del ensayo triaxial estático.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 SUELO COMPUESTO

El proceso común para preparar el material compuesto consiste en el calentamiento y la mezcla de los materiales de admisión, de plástico, reciclado (no procesados, escamas o gránulos), granulados y subproductos, entre otros, a una temperatura especificada. La mezcla calentada se comprime en un molde específico para formar un producto final. Las propiedades del material compuesto dependen de la presión, el tipo de plástico y granulados reciclado.¹

1.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

1.2.1 Ensayo de Compresión Inconfinada. En el ensayo de compresión encofinado se aplica carga axial a la probeta cilíndrica de suelo hasta que alcance la falla. Como no presenta esfuerzo de confinamiento, este método es empleado solo para materiales cohesivos o aquellos que presenten cementación para lograr conformar la probeta.²

1.2.2 Ensayo Triaxial Estático. El ensayo triaxial estático su principal finalidad es obtener parámetros del suelo y la relación esfuerzo deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante.³

El ensayo triaxial es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de la resistencia al cortante.³

² I.N.V.E-152-13; Compresión Inconfinada en muestras de suelos; Normas y Especificaciones del Instituto Nacional de Vías; Colombia.

³ Ing. Oscar Valerio Salas; Ensayos Triaxiales para suelos; Métodos y Materiales; Volumen 1; Diciembre de 2011; Lanammer UCR.

En un ensayo triaxial, un espécimen cilíndrico de suelo es revestido con una membrana de látex dentro de una cámara a presión. La parte superior e inferior de la muestra tiene discos porosos, los cuales se conectan al sistema de drenaje para saturar o drenar el espécimen. En estas pruebas se pueden variar las presiones actuantes en tres direcciones ortogonales sobre el espécimen de suelo.⁴

El agua de la cámara puede adquirir cualquier presión deseada por la acción de un compresor comunicado con ella. La carga axial se transmite al espécimen por medio de un vástago que atraviesa la parte superior de la cámara. La presión que se ejerce con el agua que llena la cámara es hidrostática y produce, por lo tanto, esfuerzos principales sobre el espécimen, iguales en todas las direcciones, tanto lateral como axialmente. En las bases del espécimen actuará además de la presión del agua, el efecto transmitido por el vástago de la cámara desde el exterior.⁴

Es usual llamar σ_1 , σ_2 y σ_3 a los esfuerzos principales mayor, intermedio y mínimo, respectivamente. En una prueba de compresión, la presión axial siempre es el esfuerzo principal mayor, σ_1 ; los esfuerzos intermedios y menor son iguales ($\sigma_2 = \sigma_3$) y son iguales a la presión lateral. el Criterio de falla es el sistema de envolvente de Mohr-Coulomb.⁴

1.2.2.1 Ensayo Triaxial estático con consolidación y con drenaje. La característica fundamental de la prueba es que los esfuerzos aplicados al espécimen son efectivos. Primeramente, se aplica al suelo una presión hidrostática, manteniendo abierta la válvula de comunicación con la bureta y dejando transcurrir el tiempo necesario para que haya consolidación completa bajo la presión actuante. Cuando el equilibrio estático interno se haya restablecido, todas las fuerzas exteriores estarán actuando sobre la fase sólida del suelo, es decir, producen esfuerzos efectivos, en tanto que los esfuerzos neutrales en el agua corresponden a la

⁴ Ing. Oscar Valerio Salas; Ensayos Triaxiales para suelos; Métodos y Materiales; Volumen 1; Diciembre de 2011; Lanammer UCR.

condición hidrostática. La muestra se lleva a la falla a continuación aplicando la carga axial en pequeños incrementos, cada uno de los cuales se mantiene el tiempo necesario para que la presión en el agua, en exceso de la hidrostática, se reduzca a cero.⁴

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto de investigación se inició con la caracterización de los materiales principales, arena arcillosa y PET, a emplear para la mezcla. A continuación, se determinaron los parámetros de dosificación de los materiales, donde el intervalo de análisis de porcentaje de PET establecido varía entre el 5% y el 30% del volumen de la arena arcillosa a utilizar. Para finalizar, se realizaron ensayos con el fin de medir la variación de la resistencia de la mezcla suelo-PET tratada térmicamente.

Esta fase experimental, se hizo con base en las normas de Instituto Nacional de Vías (INVIAS 2013). Las normas que fueron empleadas son:

- I.N.V.E-123-13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos
- I.N.V.E-125-13 Determinación del Límite Líquido de los suelos
- I.N.V.E-126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
- I.N.V. E 142- 13 Relaciones de humedad- Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación)
- I.N.V. E 152 -13 Compresión inconfiada en muestras de suelos
- I.N.V.E-222-13 Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino.

2.1 SUELO ARENO ARCILLOSO

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. ⁵

⁵ Braja M. Das; Fundamentos de ingeniería geotécnica; Thomson Learning; California, Estados Unidos, 2001; Cap. 1; p. 1-2.

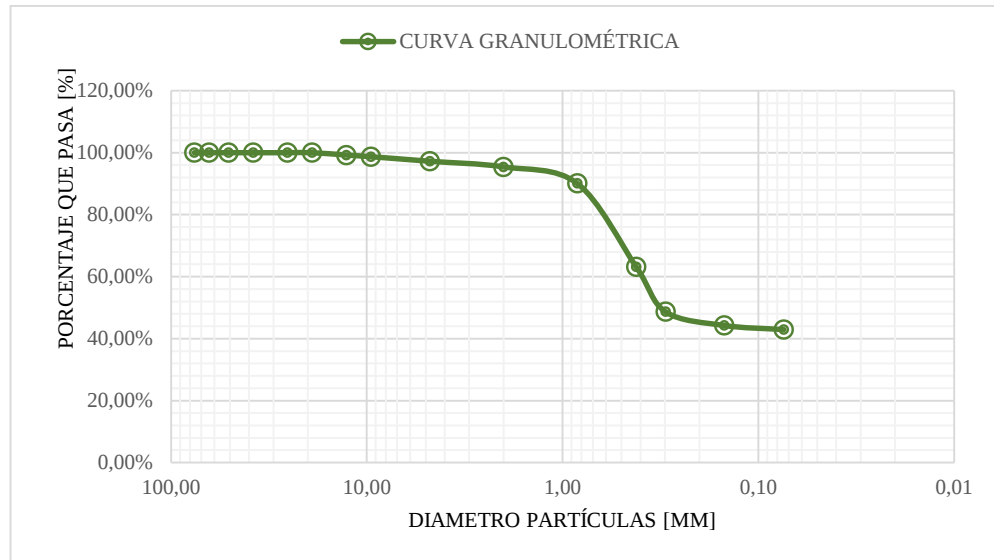
El suelo es producido por intemperismo, es decir, por la fractura y rompimiento de varios tipos de rocas en piezas más pequeñas mediante procesos mecánicos y químicos.⁵

El suelo areno arcilloso, como su nombre lo indica, está compuesto con una fracción de arena y una de arcilla, adquiriendo características propias como: baja permeabilidad y alta compresibilidad. Adicionalmente, tiene alta resistencia al corte y como ventaja, tiene una fácil manejabilidad en obra.⁶ El tipo de suelo empleado en la realización de las probetas con diferentes proporciones de PET triturado debe ser un suelo areno arcilloso. Posterior a la toma de la muestra alterada de suelo, se realizaron los siguientes ensayos:

2.1.1 Análisis granulométrico. En el ensayo de granulometría se empleó inicialmente una muestra de 800 gramos y posterior al proceso de lavado por el tamiz No 200 y secado al horno, el peso de la muestra fue de 456,80 gramos. Se obtuvo la distribución y el tamaño de las partículas de suelo (Gráfica 1 y Anexo A). Los porcentajes de gravas, arenas y finos fueron de 2,76%, 54,28% y 42,96%, respectivamente.

⁶ Duque Escobar, Gonzalo (2003) Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible: http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/URL_oficial_Manulageo: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

Grafica 1. Curva granulométrica del suelo



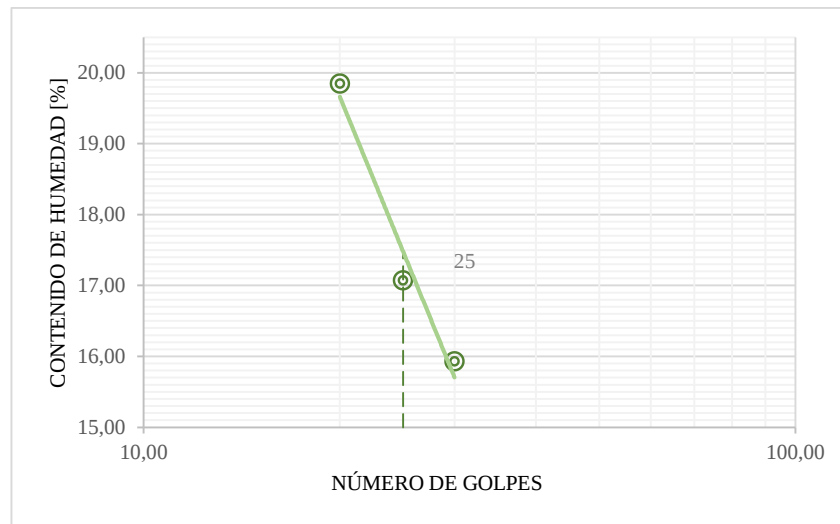
Los resultados del ensayo muestran que el suelo es una arena con alta cantidad de partículas finas, por consiguiente, se realizan los ensayos de límites para corroborar que sea una arena arcillosa.

2.1.2 Límites de Atterberg. Según el Sistema de clasificación de suelos unificado (S.U.C.S.), el valor del índice de plasticidad del suelo debe sobrepasar el 7% (Tabla 1). De los ensayos se obtuvieron valores de límite líquido de 17,48% (Grafica 2), límite plástico de 9,81 % e índice de plasticidad de 7,68%. (Anexo B). De esta forma, se verifica que el suelo empleado es una arena arcillosa (SC).

Tabla 1. Descripción del tipo de suelo por el Sistema de clasificación de suelos unificado (S.U.C.S.)

División Mayor	Símbolo	Nombre típico	Criterio de clasificación
Arena con finos	SM	Arenas Limosas	Límite de Atterberg debajo de la "línea A" o IP menos que 4
	SC	Arenas Arcillosas	Límite de Atterberg arriba de la "línea A" o IP mayor que 7

Grafica 2. Determinación limite líquido.



2.1.3 Peso específico. El peso de la muestra empleada para calcular la gravedad específica real del suelo, según el método B de la norma I.N.V. E – 222, fue de 450 gramos (Tabla 2). El resultado obtenido para el peso específico del suelo es 2,63 gr/cm³. (Anexo C)

Tabla 2. Peso específico del suelo areno arcilloso

Descripción	Valor	Unidad
Peso del frasco + Agua hasta la marca	652,5	gramos
Peso de la muestra en condición S.S.S	450,00	gramos
Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca	931,60	gramos
Peso de la muestra secada al horno	445,50	gramos
Gravedad específica	2,63	
Peso específico	2,63	gr/cm ³

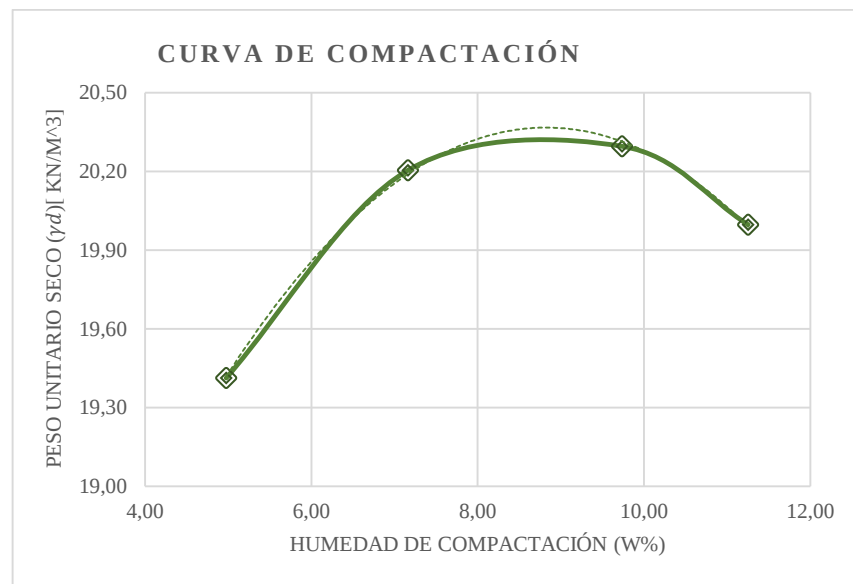
2.1.4 Ensayo Modificado de Compactación o Proctor Modificado. A través del ensayo modificado de compactación y la curva resultante (Curva de compactación), se obtiene la humedad óptima requerida para lograr el peso unitario seco máximo de un suelo durante la compactación. El ensayo se realizó de acuerdo al método A expuesto en la norma. (Tabla 3)

Tabla 3. Condiciones del método A para el ensayo modificado de compactación

Método	A
Diámetro del Molde	101,6 mm (4")
Material	Pasa tamiz de 4,75 mm (No.4)
Capas	5
Golpes/ Capas	25

Los valores obtenidos fueron de 9,73 % para la humedad óptima y 20,30 gr/cm³ para el peso unitario seco máximo del suelo areno arcilloso (Grafica 3 y Anexo D).

Gráfica 3. Curva de Compactación del ensayo Proctor modificado del suelo areno arcilloso.



2.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL TRITURADO DE TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

El Tereftalato de Polietileno (Polietilen Tereftalato - PET), fue patentado como un polímero para fibra por J. R. Whinfield y J.T. Dicknson en 1941. El PET es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido

tereftálico. El PET es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y aroma de los alimentos, es una barrera contra los gases, reciclable 100% y con posibilidad de producir envases reutilizables.

2.2.1 Análisis Granulométrico. Para el análisis granulométrico se utilizaron 1000 gramos de PET. La distribución del tamaño de las partículas se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Granulometría del material PET triturado

Malla No	PET Retenido Gr	% PET Retenido	% PET Acumulado	% PET Pasa
4	304.6	60.96	60.69	39.04
10	181.6	36.34	97.30	2.7
20	11.6	2.32	99.62	0.38
40	1.9	0.38	100	0
Total	499.7	100		

2.2.2 Peso Específico. Para determinar la gravedad específica del PET, se utilizaron 100 gramos de material. El procedimiento que se siguió fue basado mediante el método B que describe la norma INV E 222-13 (Tabla 5). El resultado obtenido para el peso específico del material triturado PET es 1,32 gr/cm³. (Anexo E)

Tabla 5. Peso específico del material PET triturado

Descripción	Valor	Unidad
Peso del frasco + Agua hasta la marca	653,3	gramos
Peso de la muestra en condición S.S.S	100	gramos
Peso de la muestra, frasco y agua agregada hasta la marca	677,3	gramos
Peso de la muestra secada al horno	91,5	gramos
Gravedad específica	1,32	
Peso específico	1,32	gr/cm ³

2.3 MOLDE EMPLEADO

2.3.1 Características. Para la elaboración de las probetas, se diseñó y empleó un molde cilíndrico de hierro, de tal forma que la dimensiones cumplieran con la relación 2:1 conforme la norma. (Gráfica 4). La selección del diseño y tamaño del molde de hizo para facilitar la elaboración de las probetas. (Imagen 1).

Gráfica 4. Dimensiones en centímetros, del molde empleado para la elaboración de las probetas.

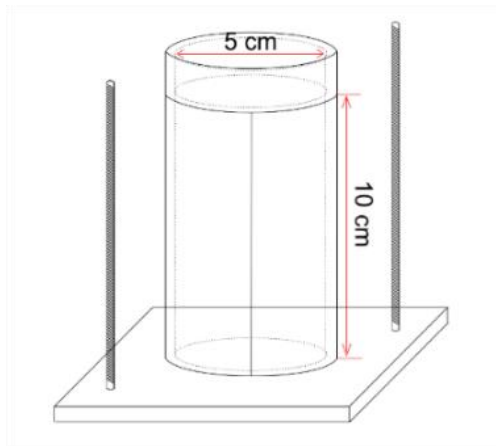


Imagen 1. Detalle del diseño del molde empleado para la elaboración de las probetas.



2.3.2 Determinación de las condiciones de compactación para el molde empleado. El molde empleado para la realización de los especímenes redujo su

tamaño en comparación al molde empleado en el método A del ensayo modificado de compactación, lo que hace necesario determinar las nuevas condiciones a usar para elaborar las probetas, conforme a la ecuación de la energía de compactación:

$$\text{Energía de compactación} = \frac{A * B * C * D}{E}$$

En donde,

A: Peso del Martillo

B: Caída del martillo

C: Número de capas

D: Número de Golpes

E: Volumen del Molde de Proctor Modificado.

Para conservar la energía de compactación y el número de capas utilizados en el ensayo modificado de compactación, y empleando un martillo de menor tamaño que se pudiera introducir dentro del nuevo molde, se calculó como 8, el número de golpes por capa para el procedimiento de compactación de las probetas. (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros de compactación para la elaboración de las probetas en el molde empleado.

Energía de compactación	56000	lb*pie/pie ³
Peso del Martillo	5,5	lb
Caída del martillo	56	cm
Número de capas	5	
Diámetro del molde empleado	5	cm
Altura del molde empleado	10	cm
Volumen del molde empleado	196,35	cm ³
Número de Golpes	8	UN

2.4 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS DE SUELO ARENO-ARCILLO Y PET TRITURADO TRATADAS TÉRMICAMENTE

Los porcentajes de variación de tereftalato de polietileno (PET) triturado seleccionados inicialmente para el análisis de este proyecto de investigación fueron:

5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% y 45%. La adición del PET se hizo mediante una relación volumétrica entre los dos materiales, suelo y PET.

El procedimiento para realizar una probeta consistía en: engrasar en su interior el molde empleado con Motorkote 3W White Water Washout Grease, para evitar la adhesión del material, mezclar la fracción de suelo y el PET triturado y posteriormente adicionar la proporción de agua correspondiente. Con la mezcla ya uniforme, se vertía en el molde por capas y se compactaba como se detalló anteriormente. (Imagen 2)

Imagen 2. Procedimiento para elaborar las probetas previo al tratamiento en el horno



La cantidad de agua adicionada a la mezcla, era modificada de acuerdo a la humedad natural del suelo en el momento de la elaboración de los especímenes, de tal forma que se alcanzara el valor de la humedad óptima, 9,73%, calculado anteriormente en el ensayo modificado de compactación.

Finalmente, se introducían los moldes al horno para iniciar el tratamiento de cocción. La selección del tiempo óptimo en el horno, hace necesario la variación de las horas para cada porcentaje de PET. Los valores de tiempos empleados fueron de 2, 4, 6 y 8 horas para cada porcentaje de PET.

Como prueba inicial, se elaboraron probetas para los extremos del rango de porcentajes seleccionados, es decir 5% y 45%, a 3, 4 y 5 horas, para hacer una inspección cualitativa del comportamiento del material. Las probetas del 5% tenían un buen color y dureza, pero las probetas del 45% en un tiempo menor a 3 horas, adquirieron un color negro oscuro y eran tan frágiles que fácilmente se podían partir con las manos (Imagen 3). Es así como se reduce el rango de análisis de variación del PET hasta el 30 %.

Imagen 3. Probeta de suelo areno arcilloso con 45% de PET triturado.



Las probetas con diferentes proporciones de PET sometidas a un periodo de dos (2) horas en el horno, presentaban mala cohesión y no se generaba la adhesión de la mezcla de los dos materiales (Suelo y PET) (Imagen 4). Luego, el tiempo de análisis de dos (2) horas es descartado del proceso.

Imagen 4. Probetas con diferentes porcentajes de contenido de PET sometidas a 2 horas en el horno



2.4.1 Probetas de suelo areno arcilloso con adición de 5 % de PET triturado.

El detalle de las cantidades de suelo areno arcilloso, PET triturado y agua empleados para la elaboración de las probetas con 5% de PET están en las Tablas 7, 8, 9 y en el Anexo F. Algunos especímenes con 5% de contenido de PET triturado se muestran en la imagen 5.

Tabla 7. Dosificación de suelo areno arcilloso para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado

Dosificación de suelo		
Gravedad Específica	2,63	
Masa de Suelo	500	gr
5 % de masa a quitar	25	gr
Masa de Suelo a Utilizar	475	gr
Volumen de 5 % de Suelo	9,51	cm ³

Tabla 8. Dosificación de PET triturado para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado

Dosificación de PET triturado		
Gravedad específica	1,32	
Volumen de 5% de PET	9,51	gr
Masa de PET a Utilizar	12,548	gr

Tabla 9. Dosificación de agua para elaborar una (1) probeta de 5% de PET triturado

Dosificación de agua		
Humedad óptima	9,73	%
Humedad natural	1,43	%
Volumen de agua	39,43	ml

Imagen 5. Probetas de diferentes horas para el 5% de porcentaje de PET



Las probetas al cumplir el tiempo en el horno, tuvieron temperaturas entre los 238 °C y los 276°C. (Tabla 10)

Tablas 10. Temperaturas promedio de las probetas al finalizar el tiempo en el horno

Tiempo	°C
4 h	242
6 h	266
8 h	274

2.4.2 Dosificación para probetas de suelo areno arcilloso con adición de PET triturado en diferentes porcentajes (10%,15%, 20%, 25% y 30%). El detalle de las cantidades de suelo areno arcilloso, PET triturado y agua empleados para la elaboración de las probetas con porcentajes de del 10%,15%,20%, 25% y 30% de PET están en las Tablas 11, 12 y 13. En la imagen 6, se observan algunas probetas con contenidos de PET del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% sometidas a diferentes tiempos en el horno.

Tabla 11. Dosificación de suelo areno arcilloso para elaborar una (1) probeta de PET triturado

Dosificación de suelo					
Porcentaje de PET adicionado	10%	15%	20%	25%	30%
Densidad del suelo [gr/ cm ³]	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
Masa de Suelo [gr]	500	500	500	500	500
% de masa a quitar [gr]	50	75	100	125	150
Masa de Suelo a Utilizar [gr]	450	425	400	375	350
Volumen para % de Suelo [cm ³]	19,01	28,52	38,02	47,53	57,03

Tabla 12. Dosificación de PET triturado para elaborar una (1) probeta de PET triturado

Dosificación de PET					
Porcentaje de PET adicionado	10%	15%	20%	25%	30%
Humedad óptima [%]	1,32	9,73	9,73	9,73	9,73
Humedad natural [%]	19,01	1,46	1,48	1,45	1,47
Volumen de agua [ml]	25,10	35,15	33,00	31,05	28,91

Tabla 13. Dosificación de agua para elaborar una (1) probeta de PET triturado

Dosificación de Agua					
Porcentaje de PET adicionado	10%	15%	20%	25%	30%
Humedad óptima [%]	1,32	9,73	9,73	9,73	9,73
Humedad natural [%]	19,01	1,46	1,48	1,45	1,47
Volumen de agua [ml]	25,10	35,15	33,00	31,05	28,91

Imagen 6. Probetas con diferentes variaciones de porcentaje de PET



Las probetas al cumplir el tiempo en el horno, tuvieron temperaturas entre los 245 °C y los 278°C. (Tabla 14)

Tabla 14. Temperaturas promedio de las probetas al final del tiempo en el horno

% de PET adicionado	10%	15%	20%	25%	30%
Tiempo	Temperatura [° C]				
4 h	247	255	254	259,7	263,3
6 h	256	262,3	264	262	268,7
8 h	265,3	261,3	271	274,7	276,3

2.5 ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS SIN ADICIÓN DE PET

Para poder comparar los valores de resistencia resultantes, se elaboraron probetas sin adición de material PET triturado, llamadas probetas patrón. Las probetas se elaboraron con la humedad óptima calculada en el ensayo modificado de compactación, el mismo número de capas de suelo y de golpes por capa; y no fueron sometidas a tratamiento térmico en el horno para conservar las condiciones a las cuáles actualmente se encuentran los suelos de las subrasantes. (Imagen 7)

Imagen 7. Probetas de suelo areno arcilloso sin PET



3. ENSAYOS DE LABORATORIO

3.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

El ensayo de compresión inconfiada fue realizado a cada una de las probetas, con adición de PET y sin adición, con el fin de calcular el valor de resistencia a la compresión de cada una. La máquina empleada para la realización del ensayo fue la MTS 810 Material Test System (Imagen 8). El diámetro mínimo de los especímenes es de 30 mm de acuerdo a la norma I.N.V, E- 152-13, y las probetas estudiadas tenían un diámetro de 50 mm. Con base en los resultados, se buscaba hallar el porcentaje de PET óptimo a adicionar al suelo areno arcilloso y de igual forma, verificar si la modificación hecha incrementaba las condiciones de resistencia del suelo.

Imagen 8. Ensayo de compresión inconfiada a una probeta con adición de 5% de PET en la MTS 810



3.1.1 Velocidad de carga. De acuerdo a la norma I.N.V. E- 152-13, se aplica carga para generar una deformación axial a una velocidad de 0,5 a 2,5 % de la altura por minuto. Para la curva de deformación son necesarios de 10 a 15 puntos, y la

velocidad escogida debe obtener fallas que no sobrepasen los 15 minutos. Las probetas tenían una altura de 0,1 m por lo que se optó por una velocidad de 2 mm/min o lo que es equivalente a 0,0333 mm/seg.

3.2 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO

El ensayo triaxial estático fue consolidado y drenado; realizado para las probetas patrón y para las probetas con el porcentaje óptimo de PET triturado seleccionado por el análisis realizado a los resultados de los ensayos de compresión inconfiada. Se hizo una probeta para cada presión de confinamiento y para cada tipo de suelo, con y sin PET, y las presiones de consolidación fueron de 50 y 100 MPa. (Imagen 9)

Imagen 9. Ensayo Triaxial Estático a una de las probetas con porcentaje óptimo de PET



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA

Los resultados obtenidos del ensayo de compresión inconfiada de cada espécimen de suelo con su respectivo porcentaje de PET y de la arena arcillosa se mostrarán a continuación:

4.1.1 Probetas sin adición de PET. Para dar respuesta del comportamiento del suelo al adicionar PET, se elaboraron tres (3) probetas sin contenido de PET o patrón, para comparar los valores obtenidos. De los resultados se descartó uno de los especímenes porque dio un valor muy mínimo de resistencia. (Tabla 15, grafica 5 e imagen 10)

Tabla 15. Valores de resistencia para las probetas sin adición de PET.

PROBETA	CARGA AXIAL	ESFUERZO NORMAL
	kN	KPa
1	1,17	5,86
2	1,06	5,38

Gráfica 5. Valor de carga máxima de las probetas sin PET.

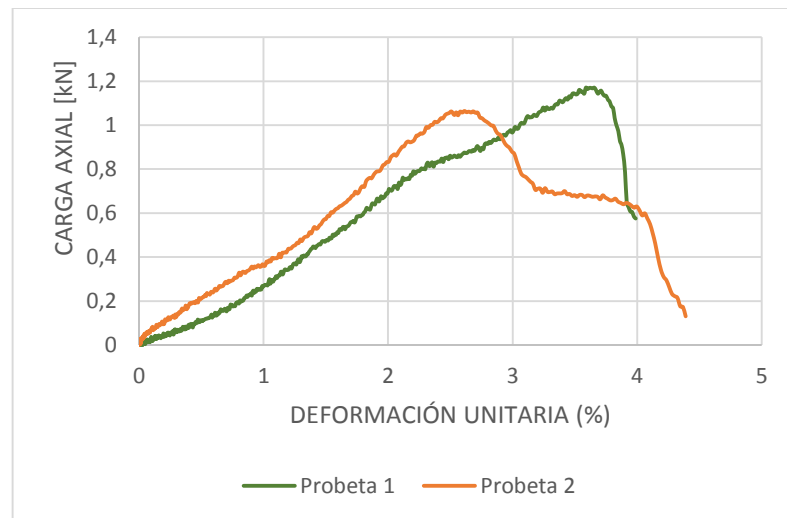


Imagen 10. Probeta fallada de suelo areno arcilloso sin adición de PET triturado



Es así como el valor promedio de carga soportado por la probeta patrón es de 1,12 kN.

4.1.2 Probetas con adición de PET. Se realizaron tres (3) probetas para cada uno de los tiempos de cocción establecidos con el fin de obtener resultados con una mayor precisión, y se repitió el proceso para cada porcentaje de PET utilizado (Imagen 11).

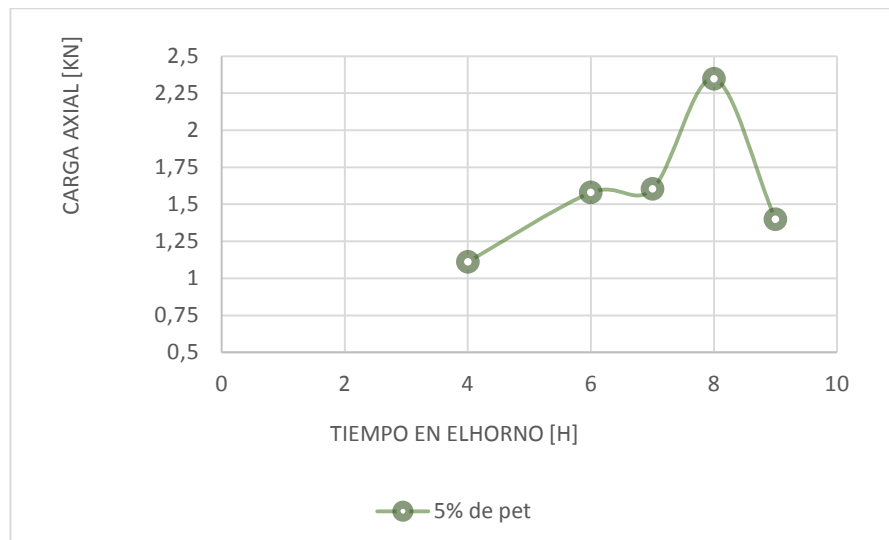
4.1.2.1 Probetas con 5% de PET. Para este porcentaje, se establecieron tiempos de 4, 6 y 8 horas encontrando un pico de resistencia en 8 horas. Posteriormente se realizaron probetas para los tiempos de 7 y 9 horas, para verificar el pico de resistencia. (Tabla 16 y gráfica 6)

Tabla 16. Valores de resistencia para las probetas con 5% de adición de PET tratadas térmicamente.

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
4	0,95	1,11	5,69
	1,09		
	1,29		
6	1,52	1,58	7,67
	1,64		
	1,57		
7	2,05	1,60	8,18

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
8	1,53	2,35	11,87
	1,23		
	2,06		
	2,58		
9	2,40	1,40	7,15
	1,14		
	1,70		
	1,36		

Gráfica 6. Valores de resistencia promedio para las probetas con 5% de adición de PET tratadas térmicamente.

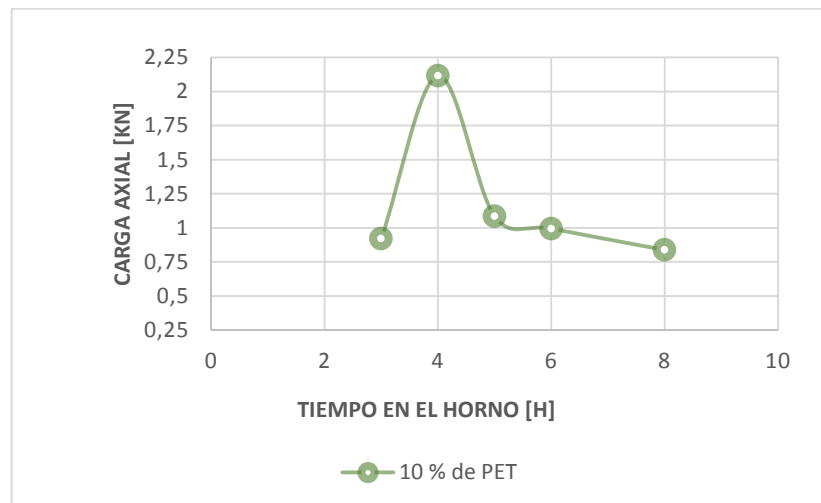


4.1.2.2 Probetas con 10% de PET. Se utilizaron tiempos de cocción de 4, 6 y 8 horas. Se obtuvo una mayor resistencia en las probetas de 4 horas, por lo que se materializaron probetas de 3 y 5 horas para verificar el pico de resistencia. (Tabla 17 y gráfica 7)

Tabla 17. Valores de resistencia para las probetas con 10% de adición de PET tratadas térmicamente.

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
3	0,07	0,92	4,66
	1,41		
	1,28		
4	0,00	2,11	8,65
	2,08		
	2,15		
5	0,06	1,08	5,40
	1,76		
	1,43		
6	1,00	0,99	4,59
	0,00		
	0,99		
8	0,00	0,84	3,43
	0,94		
	0,73		

Gráfica 7. Valores de resistencia promedio para las probetas con 10% de adición de PET tratadas térmicamente.



4.1.2.3 Probetas con 15% de PET. Para este porcentaje de PET se obtuvo la resistencia máxima en el mismo número de horas de cocción que el del porcentaje anterior. El mayor valor de resistencia fue en las 4 horas de cocción, por lo que se

materializaron probetas de 3 y 5 horas para verificar el pico de resistencia. (Tabla 18 y gráfica 8)

Tabla 18. Valores de resistencia para las probetas con 15% de adición de PET tratadas térmicamente.

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
3	0,07	0,92	4,66
	1,41		
	1,28		
4	2,37	1,79	9,14
	1,70		
	1,30		
5	1,02	1,41	7,23
	1,76		
	1,43		
6	1,47	1,25	6,41
	1,29		
	0,99		
8	0,33	0,67	3,43
	0,94		
	0,73		

Grafica 8. Valores de resistencia promedio para las probetas con 15% de adición de PET tratadas térmicamente.

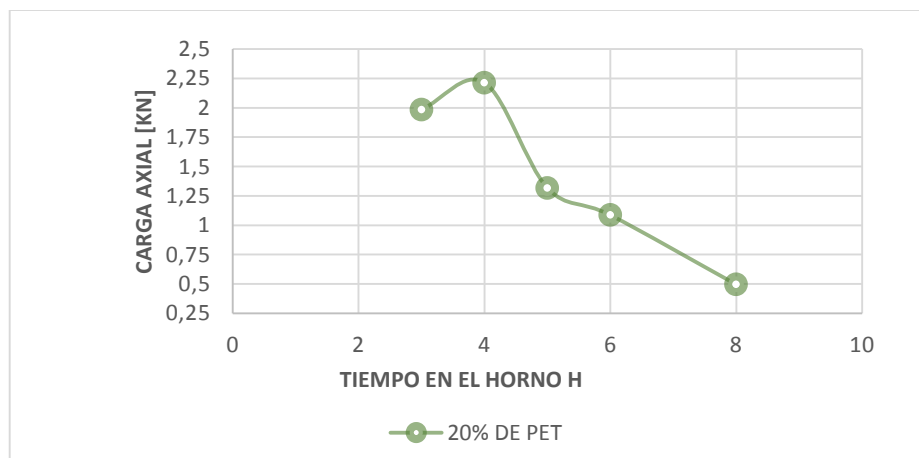


4.1.2.4 Probetas con 20% de PET. Para esta proporción de PET las 4 horas de cocción fue el tiempo donde se encontró la resistencia máxima, por lo que se materializaron probetas de 3 y 5 horas para verificar el pico de resistencia. (Tabla 19 y gráfica 9)

Tabla 19. Valores de resistencia para las probetas con 20% de adición de PET tratadas térmicamente.

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN		
3	0,00	1,99	6,75
	0,66		
	3,31		
4	1,41	2,21	10,19
	2,98		
	2,25		
5	1,93	1,32	6,67
	0,93		
	1,09		
6	1,18	1,09	5,47
	0,00		
	0,99		
8	0,49	0,50	2,00
	0,00		
	0,50		

Gráfica 9. Valores de resistencia promedio para las probetas con 20% de adición de PET tratadas térmicamente.

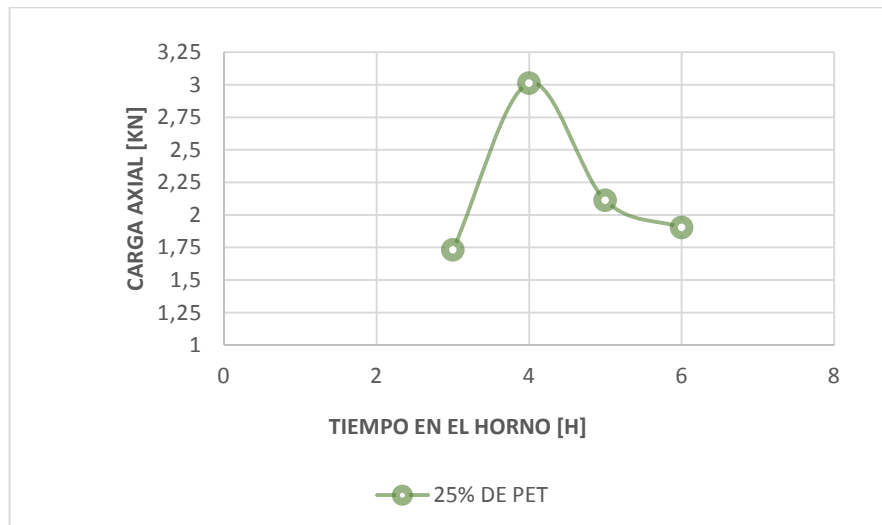


4.1.2.5 Probetas con 25% de PET. Para las probetas del 25% de PET se eliminó el tiempo de cocción de 8 horas debido a que las probetas quedaban demasiado cocidas a causa del plástico y se dificultaba el proceso de desencostrar. La resistencia máxima se obtuvo en el tiempo de 4 horas de cocción en el horno. (Tabla 20 y gráfica 9)

Tabla 20. Valores de resistencia para las probetas con 25% de adición de PET tratadas térmicamente

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
3	2,50	1,73	8,70
	1,41		
	1,28		
4	3,63	3,01	15,38
	3,28		
	2,13		
5	1,12	2,11	10,63
	3,10		
	0,00		
6	0,47	1,90	9,46
	4,25		
	0,99		

Gráfica 10. Valores de resistencia promedio para las probetas con 25% de adición de PET tratadas térmicamente.



4.1.2.6 Probetas con 30% de PET. Para este porcentaje de PET se obtuvo la resistencia máxima en el mismo número de horas de cocción que el del porcentaje anterior. El mayor valor de resistencia fue en las 4 horas de cocción, por lo que se materializaron probetas de 3 y 5 horas para verificar el pico de resistencia. (Tabla 21 y gráfica 11).

Tabla 21. Valores de resistencia para las probetas con 30% de adición de PET tratadas térmicamente

TIEMPO h	CARGA AXIAL	CARGA AXIAL PROMEDIO	ESFUERZO NORMAL
	kN	kN	KPa
3	3,64	2,11	10,74
	1,41		
	1,28		
4	2,81	2,63	13,42
	2,59		
	2,48		
5	2,15	2,17	10,91
	2,20		
	0,00		
6	1,63	1,31	6,64
	1,22		
	1,09		

Gráfica 11. Valores de resistencia promedio para las probetas con 30% de adición de PET tratadas térmicamente.

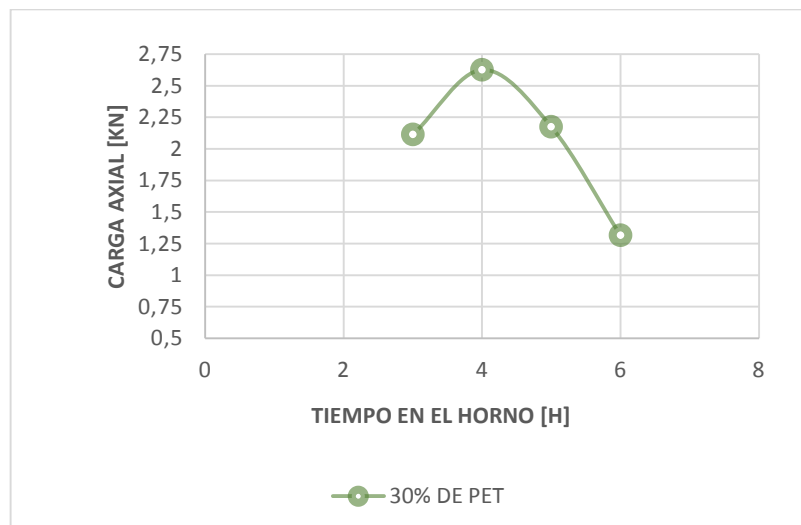
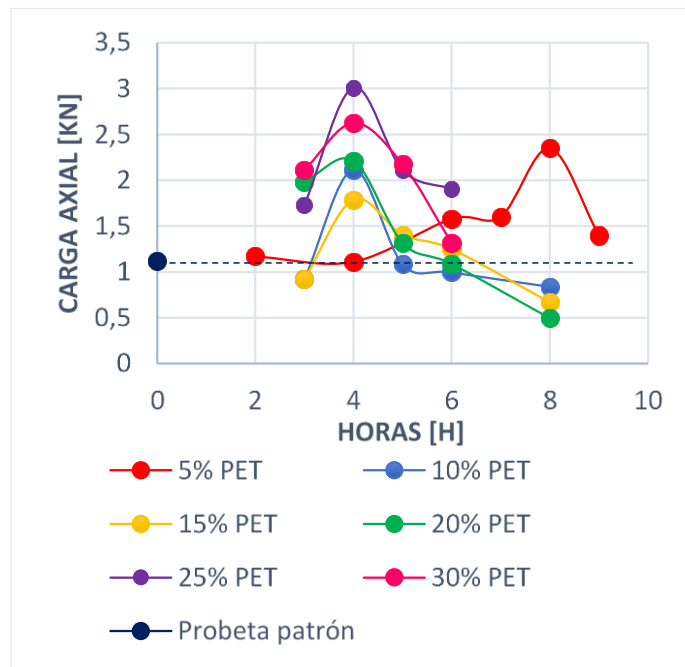


Imagen 11. Probeta con contenido de PET después del ensayo de compresión inconfiada

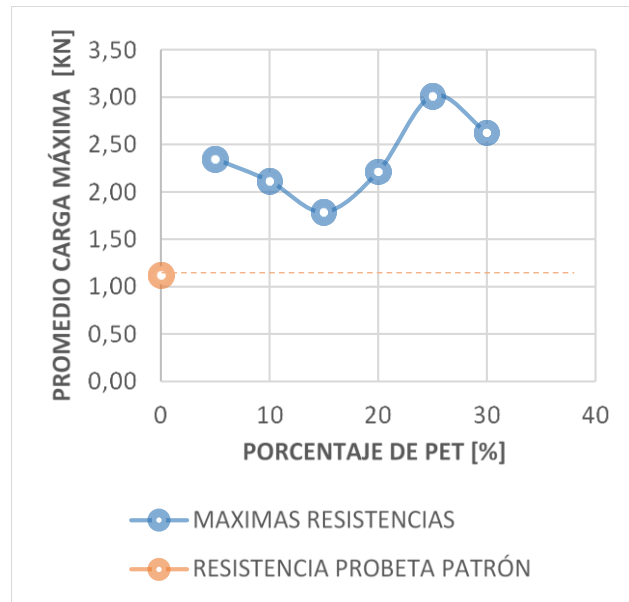


Con base en los resultados, se determina que la mayor resistencia axial se produce en las probetas realizadas con 25% de contenido de PET triturado, sometidas a 4 horas en el horno. (Gráfica 12 y gráfica 13)

Gráfica 12. Carga Axial Vs. Tiempo en el horno de todos los porcentajes

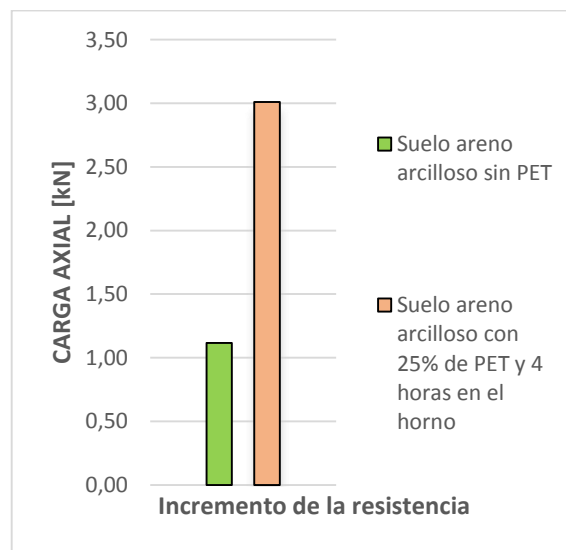


Gráfica 13. Carga Axial Máxima Vs. Porcentaje de PET



El valor de carga alcanzado para el porcentaje óptimo ya mencionado es de 3,01 kN que comparado con la probeta patrón (sin adición de PET) es de 1,12 kN. Es así, como se evidencia el incremento de la resistencia en un valor aproximado de 169 % adicional. (Gráfica 14)

Gráfica 14. Incremento de la carga axial del suelo con adición de PET respecto al suelo sin adición del mismo

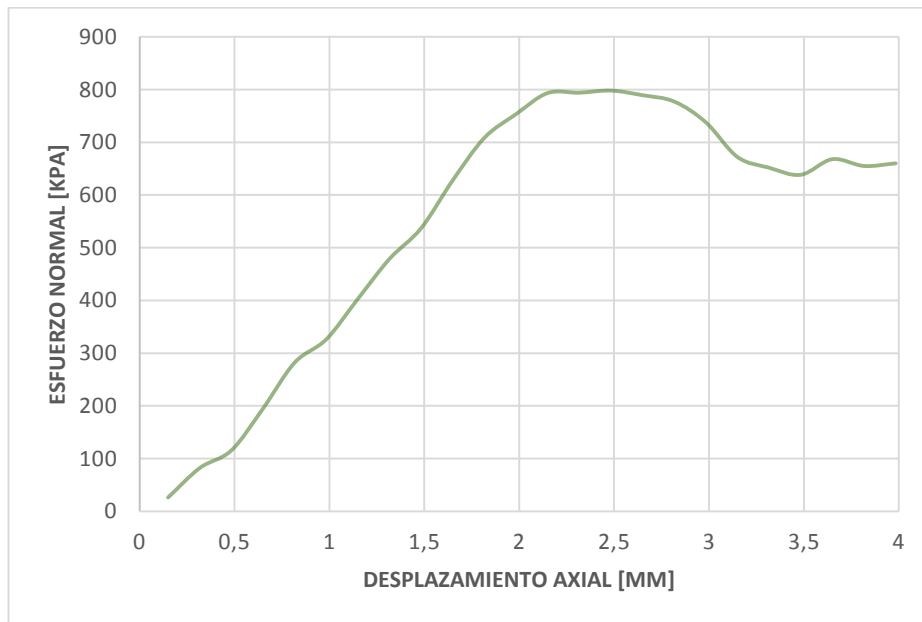


4.2 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO

4.2.1 Probetas con el porcentaje óptimo de PET. Luego de finalizar el análisis del ensayo de compresión inconfiada, se escogió el porcentaje óptimo de PET a adicionar al suelo y el número de horas de cocción adecuadas, ya mencionadas. Se elaboraron dos especímenes en estas condiciones para ser sometidos a el ensayo triaxial estático. Los resultados obtenidos se mostrarán a continuación:

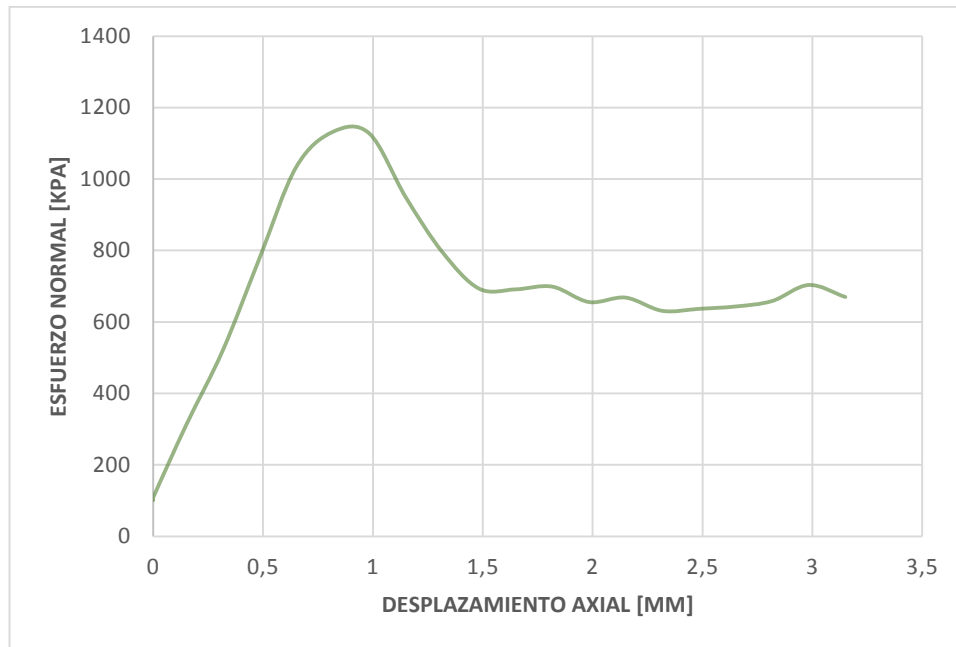
4.2.1.1 Probeta con contenido del 25% PET con presión de confinamiento de 50 KPa.

Gráfica 15. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta con contenido de porcentaje de PET óptimo para presión de confinamiento de 50 KPa Ver: Anexo G



4.2.1.2 Probeta con contenido del 25% PET con presión de confinamiento de 100 KPa

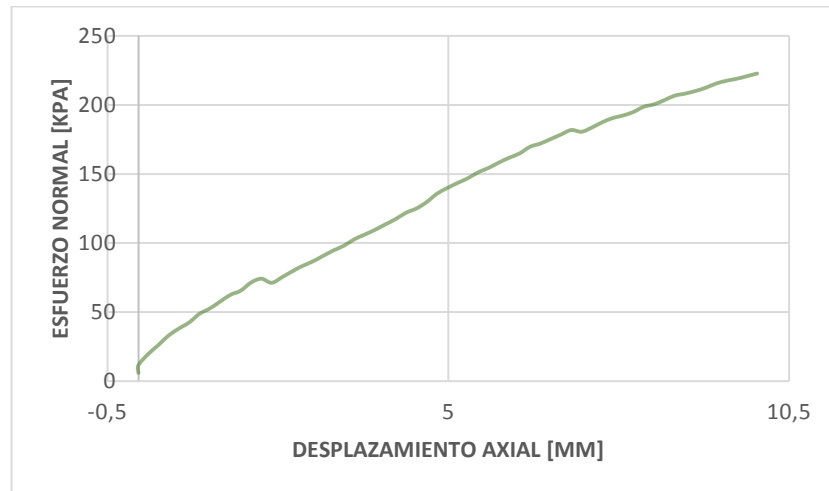
Grafica 16. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta con contenido de porcentaje de PET óptimo para presión de confinamiento de 100 KPa Ver: Anexo H



4.2.2 Probetas de suelo areno arcilloso no modificado. Se elaboraron dos especímenes del suelo sin adición de PET, para realizar una comparación con el suelo modificado. A continuación, se mostrarán los resultados:

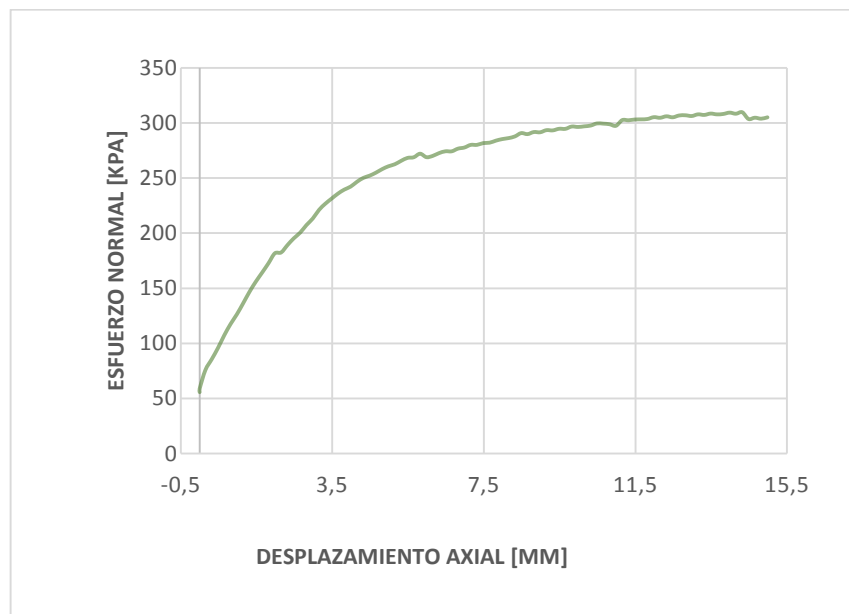
4.2.2.1 Probetas de suelo areno arcilloso con presión de confinamiento de 50 KPa.

Grafica 17. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta sin adición de PET para una presión de confinamiento de 50 KPa Ver: Anexo I



4.2.2.2 Probetas de suelo areno arcilloso con presión de confinamiento de 100 KPa.

Grafica 18. Esfuerzo Normal Vs. Desplazamiento axial de la probeta sin adición de PET para una presión de confinamiento de 100 KPa Ver: Anexo J

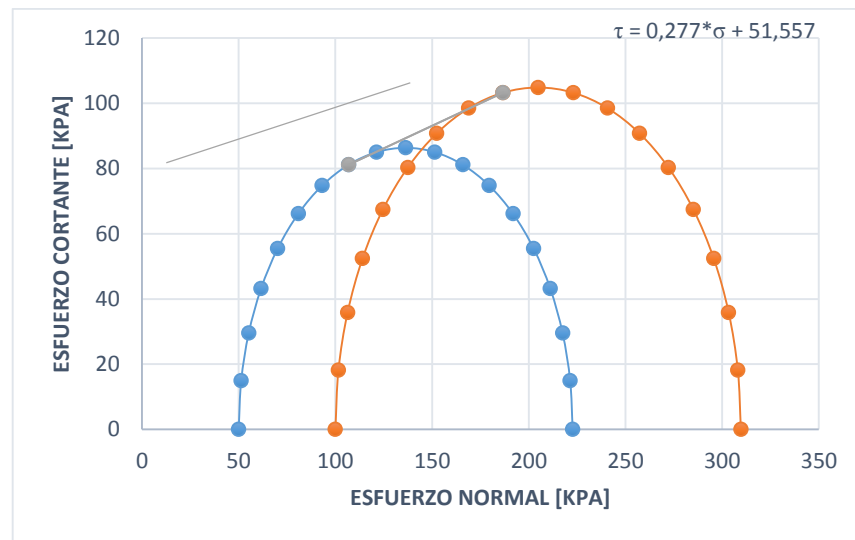


4.2.3 Comparación de resultados según el criterio de falla de Mohr Coulomb.

El ensayo triaxial estático arroja los parámetros de resistencia de cohesión y ángulo de fricción de un suelo. Los valores de cohesión y el ángulo de fricción obtenidas del análisis del ensayo para el suelo areno arcilloso sin PET y el suelo modificado son:

4.2.3.1 Criterio de falla de Mohr Coulomb del suelo areno arcilloso.

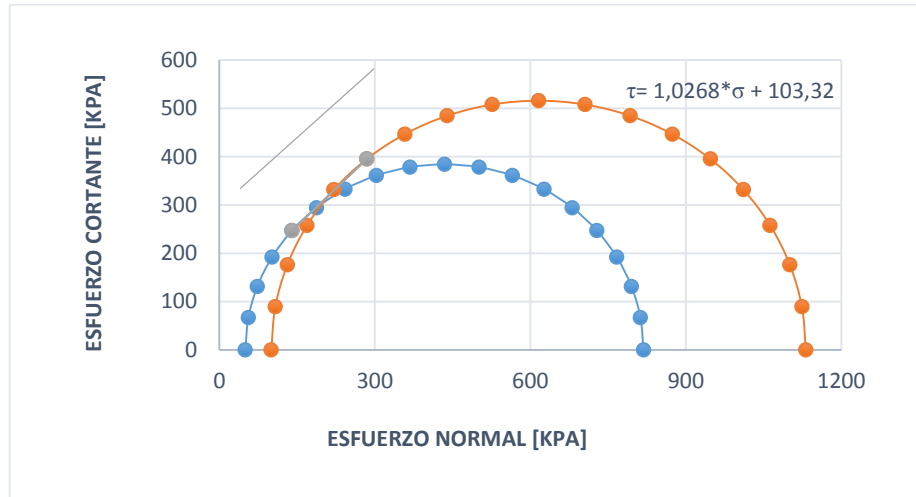
Grafica 19. Determinación del ángulo de fricción y cohesión por el criterio de falla de Mohr Coulomb para suelo sin adición de PET.



Luego de aplicar el criterio de falla de Mohr Coulomb a los especímenes sometidos al ensayo triaxial estático, como resultado se obtuvo una cohesión de 51,55 KPa y un ángulo de fricción de 16°.

4.2.3.2 Criterio de falla de Mohr Coulomb del suelo modificado con PET.

Grafica 20. Determinación del ángulo de fricción y cohesión por falla de Mohr Coulomb suelo con 25% de PET.



En el suelo modificado, con adición del 25% de PET triturado, se puede observar el aumento en el ángulo de fricción tanto como en la cohesión. El resultado de estas dos propiedades del suelo es una cohesión de 103,32 KPa y un ángulo de fricción de 45°.

5. IMPLEMENTACIÓN EN LAS SUBRASANTES

5.1 CAMIÓN CISTERNA DE RIEGO

En la actualidad, se implementa el reciclaje del plástico PET en las carreteras para realizar las capas de rodadura. Una alternativa para aplicar la adición de PET triturado al suelo de la subrasante, puede ser mediante la mezcla y el vertido con un camión cisterna sobre parte de la subrasante, similar al procedimiento empleado en el riego de asfalto. El diseño del automotor y la cantidad de capaz a adicionar debería ser estudiado en una investigación posterior.

Imagen 12. Primera alternativa de disposición en campo de la mezcla de suelo y PET triturado.



Fuente: Página oficial empresa SISLER S.A.; Productos en venta; Mantenimiento Vial; Camión Regador de asfalto; Disponible en: <http://www.sislersa.com.uy/index.php/productos/ver/Camion-Regador-de-asfalto-45>

5.2 ADOQUINES

La propuesta consiste en la elaboración de adoquines en bloque, con una mezcla de suelo y PET triturado, y de un tamaño similar al volumen empleado en el estudio de este proyecto. De igual manera, durante su elaboración serán sometidos a

cocción en el horno, como anteriormente se mencionó, durante 4 horas y con una proporción volumétrica de contenido de PET triturado del 25%. El espesor y forma del adoquín podría ser modificado para mejorar condiciones de, costo, durabilidad y elaboración del mismo, pero ese análisis deberá ser ejecutado en otra investigación.

Imagen 13. Segunda alternativa de disposición en campo de la mezcla de suelo y PET triturado



Fuente: Página oficial empresa Bottai, Soluciones en concreto; Productos prefabricados en hormigón; Adoquines; Disponible en: <http://www.bottai.cl/productos-prefabricados-de-hormigon/adoquines/>

6. CONCLUSIONES

El porcentaje óptimo que mejora la resistencia de un suelo areno arcilloso es el de 25% de contenido volumétrico de PET triturado, pues la incrementa en un 169% adicional comprado con la probeta patrón o probeta de sólo suelo. La probeta modificada alcanzó una fuerza axial de 3,01 kN y la probeta patrón de 1,12 kN.

Como existen más variables a analizar para determinar un valor único de porcentaje óptimo como: la temperatura del horno, el volumen de la probeta o la humedad de la mezcla, entre otras, se puede definir que para el porcentaje seleccionado de 25% en un rango de 3, 4 y 5 horas de cocción de los especímenes en el horno, se obtiene un incremento en la resistencia.

Con el análisis de resultados del ensayo triaxial estático del suelo areno arcilloso y el suelo modificado se pudo apreciar un aumento en las propiedades mecánicas obtenidas, estas propiedades son la cohesión y el ángulo de fricción. La cohesión y el ángulo de fricción son de 51,55 [KPa] y 16° respectivamente, para el suelo areno arcilloso. Para el suelo modificado, son 103,32 [KPa] y 46°. Obteniendo en la cohesión un aumento del 94% adicional con respecto a su estado natural y para el ángulo de fricción un incremento del 187,5% adicional. Mostrando así que el proceso el cual fue sometido al suelo, generó un mejoramiento de estas propiedades mecánicas.

7. OBSERVACIONES

En el suelo con menor contenido de PET triturado, las partículas del material PET no logran incorporarse con las partículas del suelo, evidenciándose que la resistencia soportada se debe solamente a la cocción del suelo. Adicional, el suelo areno arcilloso actúa como un aislante térmico al no permitir que se fundan las partículas de PET. Al incrementarse el contenido de PET, se acelera el proceso de fundición del mismo, es decir, que a un menor tiempo de cocción el material resultante se mezcla homogéneamente y también puede quemarse más fácilmente. El material pasado de cocción se hace más frágil, por ende, se disminuye su resistencia.

Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia la variación en cada uno de los parámetros analizados: porcentajes óptimos de PET, tiempo en el horno y carga soportada, conforme al tipo de suelo estudiado. Los valores detallados en la Tabla 22, son tomados de los proyectos de investigación publicados preliminarmente por estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. El suelo que presenta mejor comportamiento al adicionar contenido triturado de PET, es el areno limoso, al soportar 18,28 kN, a pesar de requerir mayor tiempo en el horno y menos cantidad de PET.

Tabla 22. Valores óptimos de contenido de PET a adicionar a los diferentes tipos de suelos para incrementar su resistencia.

SUELO	TIEMPO [horas]	PORCENTAJE DE CONTENIDO DE PET [%]	CARGA [kN]
Areno Limoso ⁷	10	5	18, 28
Arena Fina ⁸	4	30	11,10
Arena Triturada ⁸	8	30	7,14
Areno Arcilloso	4	25	3,01

⁷ A.N. Herrera, J. G. García; Determinación de las propiedades mecánicas de un suelo mezclado con material PET (reciclado) mediante cilindros elaborados por medio de tratamiento térmico; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga, Colombia; 2018.

⁸ A.M. Aponte, T. J. Salcedo; Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico PET reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga, Colombia; 2019.

BIBLIOGRAFIA

A.M. Aponte, T. J. Salcedo; Alternativa de uso de materiales geosintéticos elaborados con arena y plástico PET reciclado para la fabricación de elementos no estructurales en la construcción; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga, Colombia; 2019.

A.N. Herrera, J. G. García; Determinación de las propiedades mecánicas de un suelo mezclado con material PET (reciclado) mediante cilindros elaborados por medio de tratamiento térmico; Universidad Industrial de Santander; Bucaramanga, Colombia; 2018.

Braja M. Das; Fundamentos de ingeniería geotécnica; Thomson Learning; California, Estados Unidos, 2001; Cap. 1; p. 1-2.

Duque Escobar, Gonzalo (2003) Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional de Colombia, Manizales. Disponible: [http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/](http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/URL%20oficial%20Manulageo)URL oficial Manulageo: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

I.N.V.E-152-13; Compresión Inconfinada en muestras de suelos; Normas y Especificaciones del Instituto Nacional de Vías; Colombia.

Ing. Oscar Valerio Salas; Ensayos Triaxiales para suelos; Métodos y Materiales; Volumen 1; Diciembre de 2011; Lanammer UCR .

Naji Khoury, A.M. ASCE, Charbel Khoury, S.M. ASCE y Younane Abousleiman³, M.ASCE; Soil Fused with Recycled Plastic Bottles for Various Geo-Engineering Applications; Geotecnics of Waste Management and Remediation.

ANEXOS

Anexo A. Detalle del análisis granulométrico del material areno arcilloso

Siguiendo el procedimiento de la norma I.N.V.E-123-13, Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, de la muestra de suelo analizada se obtiene la siguiente granulometría:

Peso Total de la muestra de suelo seco [gr]	800	Peso lavado, seco, por tamiz 200 [gr]		456,8
Alternos [pulg]	Peso retenido [gr]	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa
3	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2 1/2	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1 1/2	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
3/4	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1/2	6,10	0,76%	0,76%	99,24%
3/8	4,20	0,53%	1,29%	98,71%
No. 4	11,80	1,48%	2,76%	97,24%
No. 10	14,50	1,81%	4,58%	95,43%
No. 20	42,60	5,33%	9,90%	90,10%
No. 40	215,40	26,93%	36,83%	63,18%
No. 60	116,10	14,51%	51,34%	48,66%
No. 100	35,00	4,38%	55,71%	44,29%
No. 200	10,60	1,33%	57,04%	42,96%
Fondo	343,70	42,96%	100,00%	0,00%

Evidencia del ensayo análisis granulométrico de la arena arcillosa



Anexo B. Detalle de la determinación de límites de Atterberg para el suelo areno arcilloso

Con base en la norma I.N.V.E-125-13, Determinación del límite líquido de los suelos, y la norma I.N.V.E-126-13, Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, y el análisis hecho a la muestra de suelo empleada se discriminan los datos obtenidos en el ensayo a continuación:

Limite Líquido			
No de golpes	30,00	25,00	20,00
Cápsula No.	13,00	14,00	15,00
Pc + P. húmedo [gr]	21,30	22,50	23,90
Pc + P. seco [gr]	19,50	20,40	21,30
Peso Cápsula [gr]	8,20	8,10	8,20
Peso Suelo Seco [gr]	11,30	12,30	13,10
% Humedad	15,93	17,07	19,85

Limite plástico		
Cápsula No.	17,00	18,00
Pc + P. húmedo [gr]	10,60	10,00
Pc + P. seco [gr]	10,40	9,80
Peso Cápsula [gr]	8,20	7,90
Peso Suelo Seco [gr]	2,20	1,90
% Humedad	9,09	10,53

Limite Liquido [%]	17,48
Limite plásticos [%]	9,81
Índice de plasticidad	7,68

Anexo C. Detalle de la determinación del Peso Específico de la arena arcillosa.

Siguiendo el procedimiento empleado por la norma I.N.V.E-222-13, Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino, se tomaron los siguientes datos:

A= Peso del frasco + Agua hasta la marca en el aire A= 652,5 Gramos

B= Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire B= 450,00 Gramos

C= Peso de la muestra. Frasco y Agua agregada hasta la marca en el aire C= 931,60 Gramos

D= Peso de la muestra secada al horno. D= 445,50 Gramos

$$\text{Gravedad específica del suelo} = \frac{B}{A + B - C}$$

$$\text{G. E. del suelo} = \frac{450}{652,5 + 450 - 931,60}$$

$$\text{G. E. del suelo} = 2,633 \text{ gr/cm}^3$$

Luego el peso específico del suelo areno arcilloso empleado es de 2,63 gr/cm³.

Anexo D. Detalle del Ensayo Modificado de Compactación o Proctor Modificado

Tomando con referencia el procedimiento del método A empleado en la norma I.N.V. E 142- 13, Relaciones de humedad-Peso unitario seco en los suelos (Ensayo modificado de compactación), se tomaron los siguientes datos:

Vw=	Volumen de agua
Ps=	Peso del suelo
Pm=	Peso del molde
Pm+sc=	Peso del molde + suelo compactado
Pt=	Peso de la tara
Pt+sh=	Peso de la tara+ suelo húmedo
Pt+ss=	Peso de la tara+ suelo seco

Probeta 1		
Vw	105	ml
Ps	2500	gr
Pm	4161,9	gr
Pm+sc	6121,5	gr
Pt	5,5	gr
Pt+sh	45,6	gr
Pt+ss	43,7	gr

Probeta 2		
Vw	155	ml
Ps	2500	gr
Pm	4161,9	gr
Pm+sc	6243,9	gr
Pt	5,5	gr
Pt+sh	45,9	gr
Pt+ss	43,2	gr

Probeta 3		
Vw	205	ml
Ps	2500	gr
Pm	4161,9	gr
Pm+sc	6303,5	gr
Pt	5,4	gr
Pt+sh	42,6	gr
Pt+ss	39,3	gr

Probeta 4		
Vw	255	ml
Ps	2500	gr
Pm	4161,9	gr
Pm+sc	6301,2	gr
Pt	5,2	gr
Pt+sh	48,7	gr
Pt+ss	44,3	gr

Humedades, densidades y pesos unitarios (submuestras)

Humedad de moldeo de cada probeta (w)

$$w = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

Probeta 1

$$w1 = \frac{(45,6 - 5,5) - (43,7 - 5,5)}{(43,7 - 5,5)} * 100 = 4,98 \%$$

Probeta 2

$$w2 = 7,16 \%$$

Probeta 3

$$w3 = 9,73 \%$$

Probeta 4

$$w4 = 11,25 \%$$

Densidad Húmeda (ρH)

$$\rho H = k * \frac{MT - MMD}{V}$$

Donde,

k= Constante de conversión, es 1 según la tabla:

<i>k</i>	<i>densidad</i>	<i>volumen</i>
1	g/cm ³	cm ³
0,001	kg/m ³	m ³
1000	g/cm ³ o kg/cm ³	cm ³

MT= Masa del suelo húmedo dentro del molde (Pm+sh)

MMD= Masa del molde compacto (Pm)

V= Volumen del molde (V=943 cm³)

Probeta 1

$$\rho H_1 = 1 * \frac{6121,5 - 4161,9}{943} = 2,078 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 2

$$\rho H_2 = 2,208 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 3

$$\rho H_3 = 2,271 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 4

$$\rho H_4 = 2,269 \text{ gr/cm}^3$$

Densidad seca (ρd)

$$\rho d = \frac{\rho H}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde,

ρH = Densidad húmeda (Punto de compactación)

w= Humedad de moldeo

Probeta 1

$$\rho d_1 = \frac{2,078}{1 + \frac{4,97}{100}} = 1,98 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 2

$$\rho d_2 = 2,060 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 3

$$\rho d_3 = 2,070 \text{ gr/cm}^3$$

Probeta 4

$$\rho d_4 = 2,039 \text{ gr/cm}^3$$

Peso Unitario seco (γd)

$$\gamma d = k_1 * \rho d$$

Donde,

k_1 = Constante, para g/cm^3 es de 9,8066

ρd = Densidad seca

Probeta 1

$$\gamma d_1 = 9,8066 * 1,98 = 19,413 \text{ g/cm}^3$$

Probeta 2

$$\gamma d_2 = 20,204 \text{ g/cm}^3$$

Probeta 3

$$\gamma d_3 = 20,296 \text{ g/cm}^3$$

Probeta 4

$$\gamma d_4 = 19,997 \text{ g/cm}^3$$

Anexo E. Detalle de la determinación del Peso Específico del Tereftalato de Polietileno, PET, triturado.

Siguiendo el procedimiento empleado por la norma I.N.V.E-222-13, Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino, se tomaron los siguientes datos:

A= Peso del frasco + Agua hasta la marca en el aire A= 653,3 Gramos

B= Peso de la muestra en condición S.S.S en el aire B= 100 Gramos

C= Peso de la muestra. Frasco y Agua agregada hasta la marca en el aire C= 677,3 Gramos

D= Peso de la muestra secada al horno. D= 91,5 Gramos

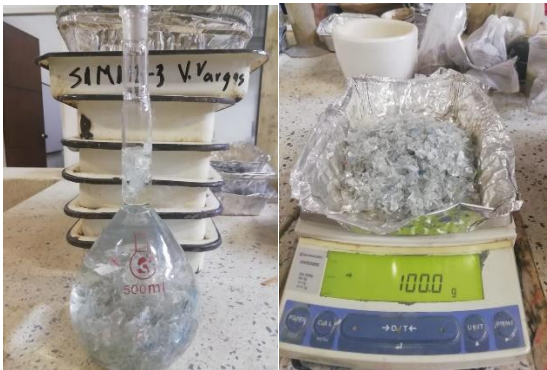
$$\text{Gravedad específica del suelo} = \frac{B}{A + B - C}$$

$$\text{G. E. del suelo} = \frac{100}{653,3 + 100 - 677,3}$$

$$\text{G. E. del suelo} = 1,316 \text{ gr/cm}^3$$

Luego el peso específico del material PET empleado es de 1,32 gr/cm³.

Evidencia del ensayo para determinar el Peso específico del PET



Anexo F. Cálculo tipo del método empleado para determinar el porcentaje (%) de PET en la masa de suelo (5% de PET).

Teniendo en cuenta la ecuación mostrada a continuación, y el volumen del molde es de 196,35 cm³, y la densidad de la arena arcillosa es de 2,63 gr/cm³.

$$Masa\ de\ Suelo = Densidad * Volumen$$

Se calcula la masa necesaria de suelo para suplir dicho volumen.

$$Masa\ de\ Suelo = 2,63\ gr/cm^3 * 196,35cm^3$$

$$Masa\ de\ Suelo = 512,47\ gr$$

De esta forma utilizamos como base de cálculo, 500 gramos de arena arcillosa, de los cuales restamos el 5% del material el cual será reemplazado, obteniendo una masa de:

$$Masa\ de\ Suelo\ a\ quitar = 0,05 * 500\ gr$$

$$Masa\ de\ Suelo\ a\ quitar = 25\ gr$$

$$Masa\ de\ Suelo\ a\ utilizar = 500\ gr - 25\ gr$$

$$Masa\ de\ Suelo\ a\ utilizar = 475\ gr$$

El volumen que ocupó el 5% de suelo que se restó fue el volumen que se reemplazó por plástico PET triturado.

$$Volumen\ de\ Suelo\ 5\% = \frac{Masa}{Densidad}$$

$$Volumen\ de\ Suelo\ 5\% = \frac{500\ gr * 0,05}{2,63\ gr/cm^3}$$

$$Volumen\ de\ Suelo\ 5\% = 9,51\ cm^3$$

La densidad del Tereftalato de Polietileno es de 1,32 gr/cm³ y el volumen a sustituir es de 9,51 cm³, luego la cantidad de masa de PET utilizado es:

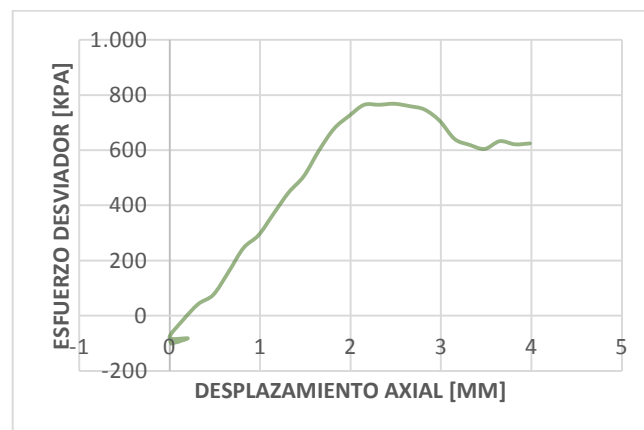
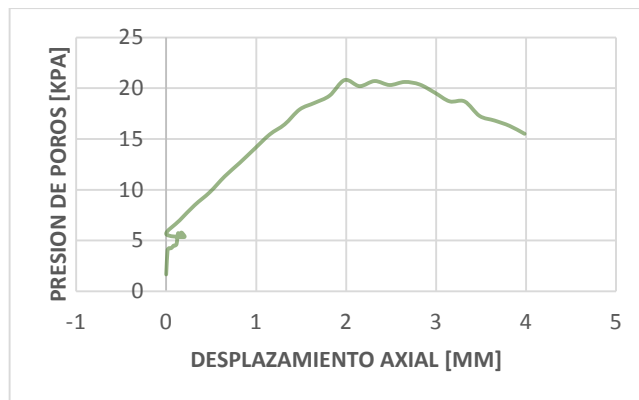
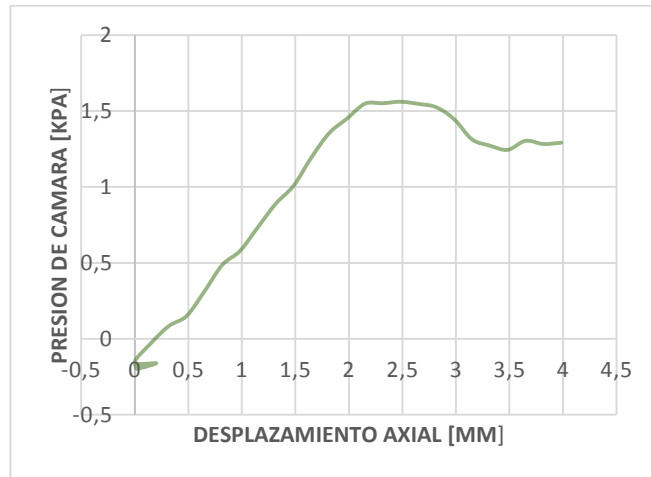
$$Masa\ de\ PET = Densidad * Volumen$$

$$\text{Masa de PET} = 1,32 \text{ gr/cm}^3 * 9,51 \text{ cm}^3$$

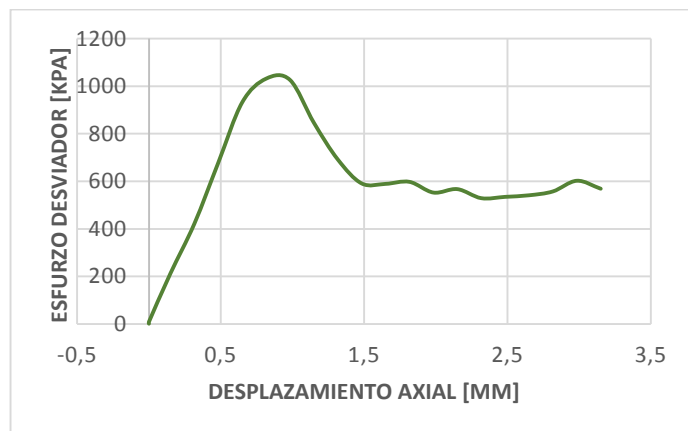
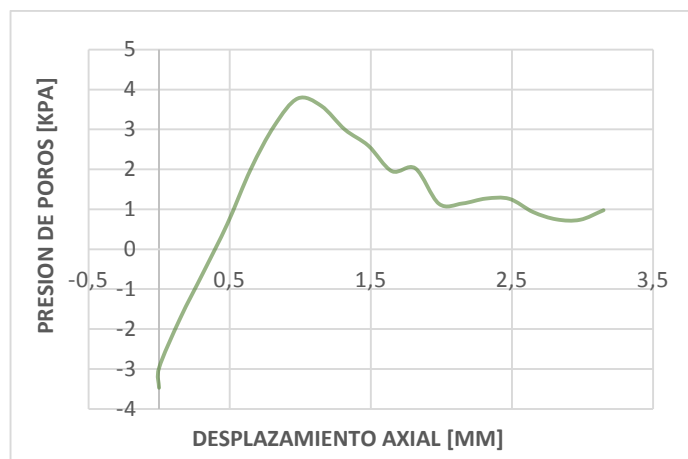
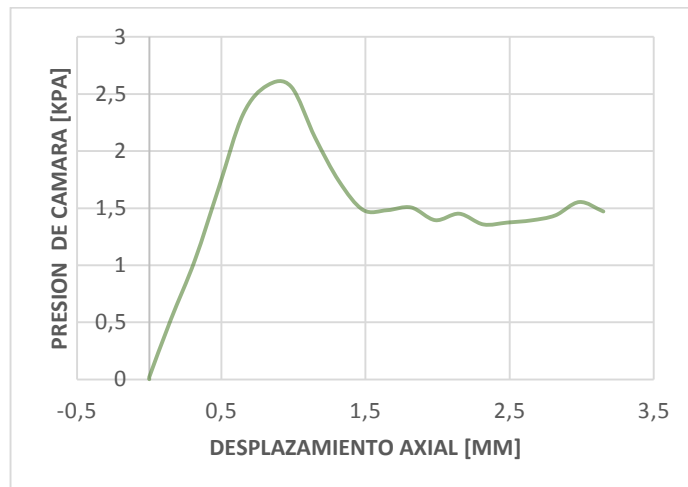
$$\text{Masa de PET} = 12,55 \text{ gr}$$

Para determinar el valor de agua a adicionar, se tuvo en cuenta la humedad optima del ensayo modificado de compactación y la humedad natural del momento en que se realizó la mezcla.

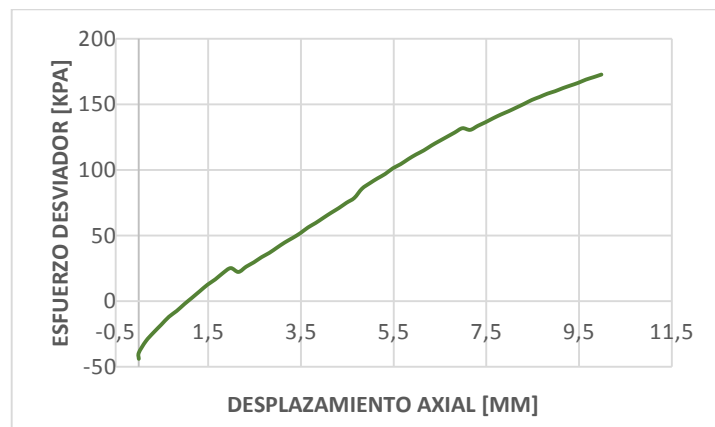
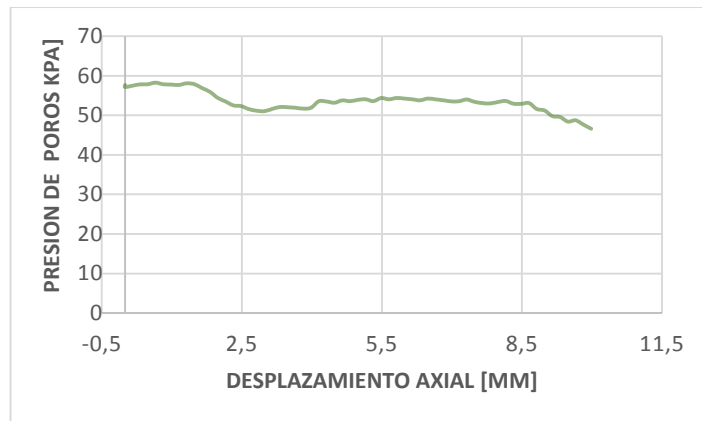
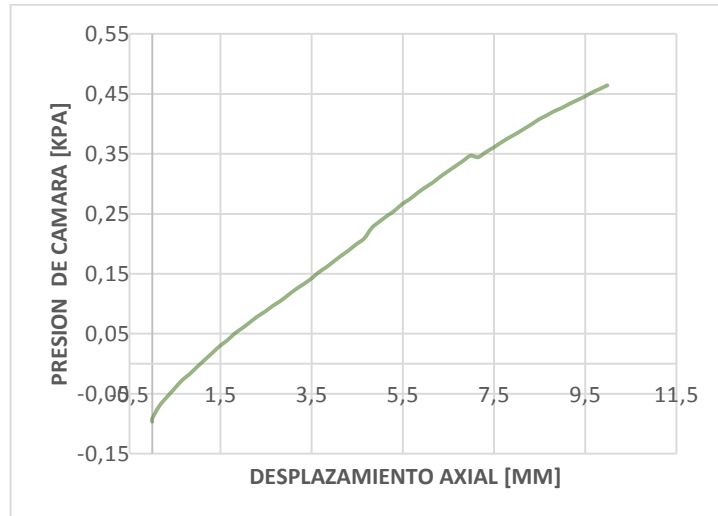
**Anexo G. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para para el suelo
areno arcilloso sin contenido de PET a una presión de confinamiento de 50
KPa**



Anexo H. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso sin contenido de PET a una presión de confinamiento de 100 KPa



Anexo I. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso con contenido de PET del 25% a una presión de confinamiento de 100 KPa



Anexo J. Valores resultantes del ensayo triaxial estático para el suelo areno arcilloso con contenido de PET del 25% a una presión de confinamiento de 100 KPa

