

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO
MEZCLADO CON MATERIAL PET (RECICLADO) MEDIANTE CILINDROS
ELABORADOS POR MEDIO DE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**ANGIE NOHEMY HERRERA DÍAZ
JARLYN GISELLE GARCÍA HERRERA**

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

2018

**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO
MEZCLADO CON MATERIAL PET (RECICLADO) MEDIANTE CILINDROS
ELABORADOS POR MEDIO DE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**ANGIE NOHEMY HERRERA DÍAZ
JARLYN GISELLE GARCÍA HERRERA**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa para optar al título de: Ingeniera
Civil**

**Director
LUIS ALBERTO CAPACHO SILVA
INGENIERO CIVIL, MSC**

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

2018

DEDICATORIA

A Dios ya que sin Él nada de esto hubiera sido posible, así como a nuestros padres que nos apoyaron desde el comienzo hasta el fin de nuestra carrera, y nuestros amigos y compañeros de la Universidad, en especial Juan Avella y Paola Hernández. También agradecemos al director del proyecto, Luis Alberto Capacho Silva, por su dedicación, asesoría y motivación brindada a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Giselle García

DEDICATORIA

Agradezco a Dios, a mis padres, hermanos y sobrinos por su apoyo incondicional y a todas las personas que hicieron parte de este logro. Besos y abrazos.

Los amo, Angie Herrera

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. MARCO CONCEPTUAL	20
1.1 NORMAS INV E PARA SUELOS.....	20
1.2 ARENA LIMOSA	20
1.3 POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET).....	21
1.4 SUELO COMPUESTO.....	22
2. FASE EXPERIMENTAL	23
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA LIMOSA.....	23
2.1.1 Granulometría de la arena	23
2.1.2 Peso específico de la arena.....	24
2.1.3 límite líquido y límite plástico e índice de plasticidad de la arena	25
2.1.4 Ensayo de PROCTOR modificado a la arena limosa.....	26
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)	27
2.2.1 Granulometría del material.....	27
2.2.2 Peso específico del PET	28
2.3 COMPRESIÓN INCONFINADA.....	29
2.3.1 Cálculo del número de golpes.....	29
2.3.2 Probetas de arena limosa	30
2.3.3 Probetas de arena limosa y PET tratadas térmicamente	31
2.3.4 Velocidad de carga	37
2.4 CBR	37
2.4.1 CBR de la arena limosa	38
2.4.2 CBR del material compuesto	39
2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	40
2.6 CANTIDAD DE BOTELLAS	41

3. ANALISIS DE RESULTADOS.....	43
3.1 COMPRESIÓN INCONFINADA.....	43
3.1.1 Probetas de arena limosa	43
3.1.2 Probetas de arena limosa y 5% de PET	44
3.1.3 Probetas de arena limosa y 10% de PET	46
3.1.4 Probetas de arena limosa y 15% de PET	48
3.1.5 Probetas de arena limosa y 20% de PET	50
3.1.6 Probetas de arena limosa y 4% de PET	52
3.1.7 Probetas de arena limosa y 6% de PET	52
3.2 ENSAYO CBR	53
3.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	60
4. PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO	64
4.1 MEDIANTE UN LANZALLAMAS.....	64
4.2 POR MEDIO DE RIEGO.....	66
4.3 POR MEDIO DE LOSAS PREFABRICADAS	67
5. CONCLUSIONES	68
6. RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Carta de Plasticidad de Clasificación SUCS.....	26

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva de Compactación.....	27
Gráfica 2. Desplazamiento vs Carga para la Arena limosa.....	44
Gráfica 3. Carga VS Tiempo para 5% de PET.....	46
Gráfica 4. Carga VS Tiempo para 10% de PET.....	48
Gráfica 5. Carga VS Tiempo para 15% de PET.....	49
Gráfica 6. Carga VS Tiempo para 20% de PET.....	51
Gráfica 7. Carga Vs Tiempo para los Diferentes Porcentajes de PET.....	52
Gráfica 8. Comparación del Mejoramiento Del Suelo.....	53
Gráfica 9. Penetración Vs Esfuerzo Para los Especímenes de Arena Limosa.....	55
Gráfica 10. Densidad Seca Vs CBR Para La Arena Limosa.....	56
Gráfica 11. Penetración Vs Esfuerzo Para El Espécimen de 12 golpes.....	58
Gráfica 12. Densidad Seca Vs CBR Para La Arena Limosa y el PET.....	60
Gráfica 13. Arena Limosa.....	62
Gráfica 14. Arena Limosa y PET.....	62
Gráfica 15. Tiempo Vs Temperatura.....	66

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Moldes para la Elaboración de las Probetas	29
Imagen 2. Probeta de arena limosa	31
Imagen 3. Probetas de 5% de PET con diferentes horas	32
Imagen 4. Probetas de 10% de PET	34
Imagen 5. Probetas de 15% de PET	35
Imagen 6. Forma de medir la Temperatura	36
Imagen 7. MTS 810 Material Test System	37
Imagen 8. Moldes de Arena Limosa con sobrecarga	38
Imagen 9. Medición de la Expansión de la probeta.	38
Imagen 10. Ensayo de CBR.	39
Imagen 11. Tratamiento Térmico para Probetas de CBR.	40
Imagen 12. Quorum 150ES	40
Imagen 13. Microscopio Electrónico de Barrido FEG	41
Imagen 14. Botella plástica	41
Imagen 15. Arena Limosa	61
Imagen 16. Arena Limosa y PET	61
Imagen 17. Simulación de Subrasante Compactada	64
Imagen 18. Simulación de campo Aplicando Temperatura	65
Imagen 19. Sensor de Temperatura	65
Imagen 20. Losas Prefabricadas	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Granulometría de la Arena.....	24
Tabla 2. Peso Específico de la Arena.....	25
Tabla 3. Parámetros para el Ensayo Modificado de Compactación.....	26
Tabla 4. Granulometría del PET	28
Tabla 5. Peso Específico del PET.....	28
Tabla 6. Cantidad de Arena Limosa para el 5%	32
Tabla 7. Cantidad de PET para el 5%.....	32
Tabla 8. Temperatura de las Probetas.....	33
Tabla 9. Temperatura de las Probetas.....	34
Tabla 10. Temperatura de las Probetas.....	35
Tabla 11. Temperatura de las Probetas.....	36
Tabla 12. Resistencia a la Compresión.	43
Tabla 13. Carga de Probetas con 5% de PET 6 Horas en el Horno	44
Tabla 14. Carga de Probetas con 5% de PET 8 Horas en el Horno	45
Tabla 15. Carga de Probetas con 5% de PET 10 Horas en el Horno	45
Tabla 16. Carga de Probetas con 5% de PET 12 Horas en el Horno	45
Tabla 17. Carga de Probetas con 5% de PET 14 Horas en el Horno	45
Tabla 18. Carga de Probetas con 10% de PET 6 Horas en el Horno	46
Tabla 19. Carga de Probetas con 10% de PET 8 Horas en el Horno	47
Tabla 20. Carga de Probetas con 10% de PET 10 Horas en el Horno	47
Tabla 21. Carga de Probetas con 10% de PET 12 Horas en el Horno	47
Tabla 22. Carga de Probetas con 15% de PET 6 Horas en el Horno	48
Tabla 23. Carga de Probetas con 15% de PET 8 Horas en el Horno	49
Tabla 24. Carga de Probetas con 15% de PET 10 Horas en el Horno	49
Tabla 25. Carga de Probetas con 20% de PET 6 Horas en el Horno	50

Tabla 26. Carga de Probetas con 20% de PET 8 Horas en el Horno	50
Tabla 27. Carga de Probetas con 20% de PET 10 Horas en el Horno	50
Tabla 28. Carga de Probetas con 4% de PET 10 Horas en el Horno	52
Tabla 29. Carga de Probetas con 6% de PET 10 Horas en el Horno	52
Tabla 30. Carga Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa.....	54
Tabla 31. Presión Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa	54
Tabla 32. Resultados de CBR para La Arena Limosa	55
Tabla 33. Densidad Seca Para La Arena Limosa	56
Tabla 34. Carga Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa y el PET .	57
Tabla 35. Presión Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa y el PET	58
Tabla 36. Resultados de CBR para La Arena Limosa y PET.....	59
Tabla 37. Densidad Seca Para La Arena Limosa y el PET.....	59
Tabla 38. Resultados de Expansión para La Arena Limosa y PET.....	60
Tabla 39. Arena Limosa.....	62
Tabla 40. Arena Limosa Y PET.....	63

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Método para determinar el Peso Específico de la arena.	73
Anexo B: Método para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de la arena limosa.	75
Anexo C: Método para determinar el Peso Específico del Polietileno de Tereftalato (PET).	83
Anexo D: Método para determinar el 5% de PET en la masa de suelo para CBR.	86

RESUMEN

TÍTULO: DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO MEZCLADO CON MATERIAL PET (RECICLADO) MEDIANTE CILINDROS ELABORADOS POR MEDIO DE TRATAMIENTO TÉRMICO*

AUTORES: ANGIE NOHEMY HERRERA DÍAZ
JARLYN GISELLE GARCÍA HERRERA**

PALABRAS CLAVE: Polietileno de Tereftalato (PET), Arena Limosa

DESCRIPCIÓN:

El impacto ambiental que generan materiales como el Polietileno Tereftalato ha sido un problema para diferentes tipos de hábitat en el mundo, por lo que se hace necesario encontrar estrategias y así ayudar en gran medida los ecosistemas. En la actualidad se han presentado grandes avances ingenieriles, cabe resaltar el uso de materiales que están generando gran contaminación, para la solución de problemáticas muy comunes, un ejemplo de ello es el uso del material PET en el mejoramiento de vías con el fin de que estas puedan cumplir estándares de buena calidad. Esta investigación se centra en evaluar las propiedades mecánicas de un suelo tipo arena limosa mezclado con material PET (reciclado), utilizando probetas, las cuales son tratadas térmicamente. Este documento muestra la implementación del PET en el suelo con el fin de ayudar el medio ambiente y a su vez el mejoramiento de una subrasante, aumentando su soporte de carga. El propósito principal, es simular a través de ensayos de laboratorio lo que le sucedería al suelo en campo al momento de ser mezclado con el PET, esto, mediante probetas las cuales son compactadas y después sometidas a una temperatura durante determinado tiempo. Por medio de ensayos de compresión confinada y CBR poder obtener variables de capacidad de carga para el suelo normal, como para el geo-plástico y así poder realizar la comparación entre ambos..

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Luis Alberto Capacho Silva

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF A SOIL MIXED WITH MATERIAL PET (RECYCLED) BY CYLINDERS ELABORATED BY HEAT TREATMENT. *

AUTHOR: ANGIE NOHEMY HERRERA DÍAZ
JARLYN GISELLE GARCÍA HERRERA**

KEYWORDS: Tertihtalate Polyethylene (PET), Silty Sand

DESCRIPTION:

The environmental impact generated by materials such as Polyethylene Terephthalate has been a problem for different types of habitat in the world, so it is necessary to find strategies and thus greatly help ecosystems. At present great engineering advances have been presented, it is worth noting the use of materials that are generating great contamination, for the solution of very common problems, an example of this is the use of PET material in the improvement of roads in order that These can meet good quality standards. This research focuses on evaluating the mechanical properties of a silty sand type soil mixed with PET material (recycled), using test tubes, which are heat treated. This document shows the implementation of PET in the soil in order to help the environment and in turn the improvement of a subgrade, increasing its load support. The main purpose is to simulate through laboratory tests what would happen to the soil in the field when it is mixed with the PET, this, by means of test tubes which are compacted and then subjected to a temperature for a certain time. By means of unconfined compression tests and CBR it is possible to obtain load capacity variables for the normal soil, as for the geo-plastic and thus be able to make the comparison between both

* Proyecto de grado

** Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Luis Alberto Capacho Silva

INTRODUCCIÓN

A través de los tiempos y con la continua evolución de los seres humanos, han surgido grandes avances científicos a lo largo de toda la historia. Uno de ellos es la necesidad con la que el hombre vio la importancia de la comunicación terrestre; hoy por hoy las vías son tan indispensable e importantes que se asegura que es por ellas por donde se mueve y se mide la economía de un país. Actualmente se hace todo tipo de investigación con el fin de buscar las características óptimas para una carretera, en pro a las necesidades vehiculares justificado con el menor impacto ambiental posible¹.

La contaminación ambiental en los últimos años ha tenido un auge de crecimiento bastante significativo, la utilización de muchos tipos de plásticos y la falta de cultura por parte de algunos ciudadanos están haciendo que nuestro planeta literalmente se esté muriendo. Antiguamente el uso de botellas plásticas era muy escaso, pero hoy en día esto ha cambiado y se ha incrementado de manera drástica su uso; cabe resaltar que en la actualidad se hacen campañas para concientizar a la comunidad en el uso de botellas de vidrio y en el reciclaje en pro al ambiente. El impacto ambiental que genera el PET es tan grave que se asegura que este tipo de material es inerte en el ambiente, convirtiéndose en residuo una vez es utilizado². La presencia de este tipo de plástico se evidencia en la superficie de los cauces de los ríos, en tuberías o canales, donde provocan taponamientos que generan contaminaciones físicas, visuales y de tipo biológico.

¹ ORTÚZAR S, J. Modelos de demanda de transporte. 2nd ed. México: ALFAOMEGA, 2000 p.157.

² CLUBENSAYOS Impacto Ambiental Del PET En México Y En El Mundo - Informe de Libros. 2018 [en línea] Disponible en: <https://www.clubensayos.com/Acontecimientos-Sociales/Impacto-Ambiental-Del-PET-En-México-Y-En/577978.html>.

En obra es común encontrarnos con terrenos que no satisfacen las características deseables para su aplicación, y se requiere diferentes procesos y tratamientos especiales con el fin de modificar su comportamiento a las condiciones deseadas. En muchos casos las propiedades mecánicas poseen tantas falencias, que se debe cambiar por completo el material para mejorar la estabilidad y seguridad del mismo. En la construcción de una vía, donde se presenta un suelo natural poco favorable que no garantiza la durabilidad de esta, se debe modificar por completo la subrasante compactada con material extraído de otros lugares que cumpla los estándares de buena calidad. La progresiva concienciación social centrada en el avance del desarrollo sostenible, redirige nuestra mirada hacia la implementación de residuos en la construcción de infraestructura. Es por ello que en el presente trabajo se tiene como finalidad buscar el máximo desempeño de un suelo tratado térmicamente por medio de la mezcla de este con polietileno de tereftalato (PET), el cual se comportará como un aditivo geo-plástico, y se busca la óptima relación o mejor cohesión suelo-PET que proporcione un aumento en la resistencia del terreno en una carretera sostenible.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 NORMAS INV E PARA SUELOS

- ✓ *INV E-213-13* Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
- ✓ *INV E-125-13* Determinación del límite líquido de los suelos.
- ✓ *INV E-126-13* Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- ✓ *INV E-128-13* Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos.
- ✓ *INV E-142-13* Ensayo modificado de compactación.
- ✓ *INV E-152-13* Compresión Inconfinada en muestras de suelos.
- ✓ *INV E-148-13* CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.

1.2 ARENA LIMOSA

La arena es un conjunto de partículas desagregadas de las rocas, sobre todo si son silíceas y acumuladas, y normalmente se presentan en las orillas de los ríos en forma de capas³. Los suelos areno-limosos, son una mezcla de dos tipos de suelo; en donde la parte arenosa tiene un tamaño de partícula entre los 0,05 y 2,00 mm, estos suelos arenosos son porosos, no retienen bien la humedad y son conocidos por su excelente capacidad de drenaje. Mientras que la parte limosa como componente del suelo, es producto de los depósitos sedimentarios típicamente resultantes de la glaciación, el tamaño de partícula de estos varía entre los 0,002 y 0,05 mm, los suelos limosos tienen un drenaje aceptable.

³ RAE Arena [en línea] disponible en: <http://dle.rae.es/?id=3UhFq2v>

1.3 POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)

El Polietileno Tereftalato (PET) es un Poliéster Termoplástico y se produce a partir de dos compuestos principales, el Ácido Tereftálico y Etilenglicol, aunque también se puede obtener utilizando Dimetiltereftalato en lugar de Ácido Tereftálico. Este material tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino.

El Polietileno Tereftalato en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química; existen diferentes grados de PET, los cuales se diferencian por su peso molecular y cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, de mayor peso molecular, grado ingeniería⁴.

Entre sus aplicaciones más importantes en el sector, se tiene la fabricación de envases para llenado a cualquier tipo de temperatura, ya sea normal o caliente; también, se desarrollan envases muy pequeños, desde 10 mililitros hasta garrafones de 19 litros. Día a día se va mejorando la velocidad de fabricación, con el fin de producir la mayor cantidad de recipientes en el menor tiempo posible⁶, para:

- ✓ Bebidas Carbonatadas
- ✓ Agua Purificada
- ✓ Aceite
- ✓ Conservas
- ✓ Cosméticos.
- ✓ Detergentes y Productos Químicos
- ✓ Productos Farmacéuticos

⁴ MARKETIZER Q. Usos y aplicaciones del Polietileno Tereftalato (PET) 2018 [en línea] Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-polietileno-tereftalato-pet-42703.htm>.

1.4 SUELO COMPUESTO

El material geo-plástico se produce calentando y mezclando simultáneamente botellas de plástico reciclado con suelo a una temperatura especificada para fundir el material de manera que se consiga una mezcla fundida uniforme. Estos tipos de suelos pueden ser utilizados en diversos aspectos de las aplicaciones de geoingeniería⁵.

⁵ KHOURY, N. Khoury, C School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, 202 W. Boyd, Norman, OK, 73019, United States PoroMechanics Institute, 100 E. Boyd Street, Norman, OK 73019, United States.

2. FASE EXPERIMENTAL

En la fase experimental se inició con la caracterización de los materiales a utilizar para la realización de la mezcla conformada por la arena limosa, el PET y agua. Posteriormente se establecieron parámetros de dosificación del material cementante (PET), enfocados en proporcionar funcionalidad y resistencia a la compresión en el material compuesto. La dosis establecida varía entre el 5% y el 20% del volumen de la arena limosa a utilizar.

Finalmente, se realizaron ensayos con el fin de medir algunas propiedades mecánicas de la mezcla suelo-pet tratada térmicamente.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ARENA LIMOSA

Las normas y especificaciones aplicadas para el desarrollo de la caracterización de los materiales son las propuestas por el Instituto Nacional de Vías (INV).

La arena utilizada en el presente trabajo proviene de un talud ubicado en la vía alterna de la carrera 22C del barrio San Antonio del Carrizal, localizado en el extremo norte del municipio de Girón (Santander), a orillas del río de Oro.

2.1.1 Granulometría de la arena Para el análisis granulométrico se utilizaron 4748.2 gramos de material y los resultados obtenidos en el estudio se presentan a continuación (**Ver Tabla No 1**).

Tabla 1. Granulometría de la Arena

Malla No	Suelo Retenido	Suelo Retenido	Retenido Acumulado	Suelo Pasa
***	Gr	%	%	%
3/4"	41.66	0.88	0.88	99.12
1/2"	95.00	2.00	2.88	97.12
3/8"	137.26	2.89	5.77	94.23
4	232.99	4.91	10.68	89.32
10	300.41	6.33	17.00	83.00
20	538.50	11.34	28.34	71.66
40	841.00	17.71	46.06	53.94
60	508.10	10.70	56.76	43.24
100	430.70	9.07	65.83	34.17
200	389.90	8.21	74.04	25.96
Pasa 200	1205.42	25.39	99.43	0.574
Total	4720.94	99.43		

- ✓ GRAVAS = 10.68 %
- ✓ ARENAS = 63.36 %
- ✓ FINOS = 25.96 %

Como consecuencia de la granulometría realizada, es correcto decir que el material utilizado consiste en una arena con un alto porcentaje de finos.

2.1.2 Peso específico de la arena Con el fin de determinar la gravedad específica del suelo, se utilizaron 150 gramos de material que pasa el tamiz No 4 (4.75 mm). El procedimiento que se siguió fue basado mediante el método B que describe la norma INV E 128-13.

Tabla 2. Peso Específico de la Arena

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	653.3	Gramos
Peso de la Muestra (En el Aire)	150	Gramos
Peso de la muestra + Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	739.5	Gramos
Peso de la Muestra Seca al Horno	138.3	Gramos
Gravedad específica de los Sólidos	2.3511	

Nota: Véase Anexo A

2.1.3 límite líquido y límite plástico e índice de plasticidad de la arena

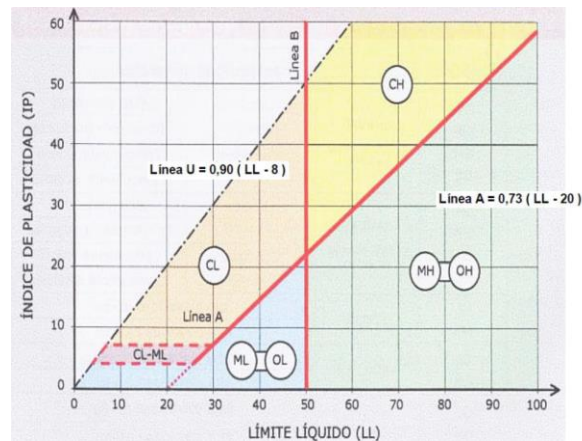
Determinado el tipo de suelo por medio de la granulometría, como una arena con un alto porcentaje de finos, se procede a clasificar estos finos por medio de los límites de Atterberg y por el método del sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, inventado por Arthur Casagrande.

Los límites de Atterberg tienen como principio, mostrar los diferentes estados de los suelos finos dependiendo de su contenido de agua. Al empezar con el análisis del límite plástico, frontera del estado semisólido y el estado plástico de un material, se tomó una muestra de suelo de 15 gramos que pasó el tamiz No 40. A dicho material se le adiciono agua en muy pocas cantidades con el fin de realizar rollos de suelo de aproximadamente 3 mm (1/8”) de diámetro, buscando que en esa dimensión ellos se agrietan o desmoronen. Al realizarse muchos intentos, e incluso en diferentes ocasiones para modificar variables como el ambiente, no se llegó a los rollos esperados, por lo que se concluyó que este tipo de suelo no posee límites, es decir, sus límites al igual que el índice de plasticidad (IP) son iguales a cero.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS (**Ver Figura No 1**), considera una arena limosa a aquel material cuyo índice de plasticidad (IP) es menor de 4. Es

por ello que es correcto afirmar que el suelo extraído del talud del municipio de Girón, y con el cual se trabajó en este proyecto de investigación, es considerado como una arena limosa.

Figura 1. Carta de Plasticidad de Clasificación SUCS



2.1.4 Ensayo de PROCTOR modificado a la arena limosa El método utilizado para realizar el ensayo, fue el A, propuesto por el Instituto Nacional de Vías (INV) para ensayos modificados de compactación. Esto debido a las especificaciones que el método indica y al ensayo de laboratorio anteriormente realizado como granulometría. El ensayo describe las dimensiones del molde, el número de capas y golpes, de la siguiente manera (**Ver Tabla No 3**).

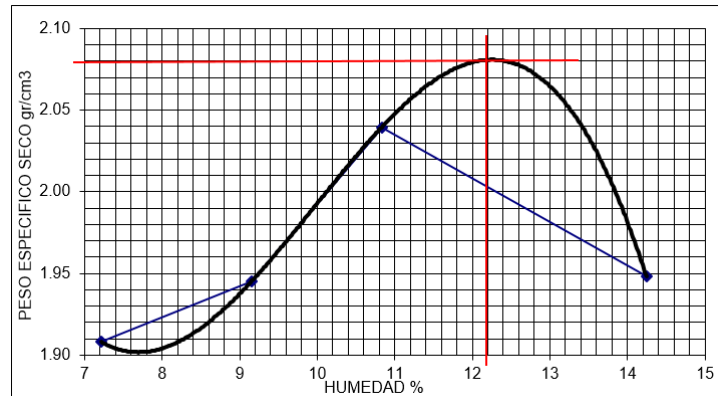
Tabla 3. Parámetros para el Ensayo Modificado de Compactación.

Número de Capas	5
Número de Golpes por Capa	25
Diámetro del Molde (cm)	10.16
Altura del Molde (cm)	11.50
Volumen del Molde (cm ³)	932.34

Con el fin de producir una energía de compactación aproximadamente de 2700 kN-m/m³, y teniendo en cuenta los parámetros anteriormente descritos (**Tabla No 3**),

se utilizó un martillo de 44.48 N (10 lbf), el cual caía libremente sobre el material a una altura de 457.2 mm (18"). **Nota: Véase Anexo B**

Gráfica 1. Curva de Compactación.



Densidad Seca Máxima = 2.08 gr/cm³

Humedad Óptima = 12.2 %

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)

El polietileno de Tereftalato utilizado fue comprado en el municipio de Girón (Santander). El material fue adquirido totalmente triturado, y así mismo, fue utilizado para el presente trabajo.

2.2.1 Granulometría del material Para el análisis granulométrico se utilizaron 5000 gramos de PET. Los resultados obtenidos en el estudio se presentan a continuación **(Ver Tabla No 4)**.

Tabla 4. Granulometría del PET

Malla No	PET Retenido	PET Retenido	PET Acumulado	PET Pasa
***	gr	%	%	%
4	3046	60.96	60.69	39.0
10	1816	36.34	97.30	2.7
20	116	2.32	99.62	0.38
40	19	0.38	100	0
Total	4997	100		

El conjunto de partículas de PET que conforman el material a utilizar son de caras planas y sus dimensiones oscilan entre los 0.42 mm y los 4.75 mm. Sin embargo, el mayor porcentaje de este plástico triturado posee un tamaño de aproximadamente 4.75 mm.

2.2.2 Peso específico del PET Con el fin de 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 128-13.

Tabla 5. Peso Específico del PET

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	653	Gramos
Peso de la Muestra (En el Aire)	100	Gramos
Peso de la muestra + Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	670.2	Gramos
Peso de la Muestra Seca	99.5	Gramos
Gravedad específica del PET		1.2090

Nota: Véase Anexo C

2.3 COMPRESIÓN INCONFINADA

El objetivo de realizar este ensayo fue determinar un valor de la resistencia a la compresión del suelo solo y del suelo mezclado con el material reciclado (PET) en diferentes porcentajes (tratados térmicamente), con el fin de encontrar el óptimo contenido de PET en el suelo que mejore las propiedades mecánicas respecto a las del suelo inalterado.

Para realizar las probetas de material se elaboraron dos moldes metálicos que cumplieran con las características dimensionales de 1:2, es decir, la altura de la probeta es el doble de su diámetro (**Ver Imagen No 1**).

Imagen 1. Moldes para la Elaboración de las Probetas



2.3.1 Cálculo del número de golpes Dado que el molde utilizado para los cilindros sometidos a compresión, dimensionalmente es muy diferente al de Proctor Modificado, los parámetros para calcular la energía de compactación varían. Razón por la cual fue necesario recalcular el número de golpes requeridos para cada una de las 5 capas del espécimen.

La energía de compactación producida para el ensayo de Proctor Modificado utilizando el método A, es de 61.2973 lbf cm/cm³, la cual se produce realizando 5 capas cada una con 25 golpes, y una caída y peso de martillo respectivamente de 457.2 mm (18") y 44.48 N (10 lbf).

$$\text{Energía de Compactación} = \frac{(A)(B)(C)(D)}{(E)}$$

A: Peso del Martillo

B: Caída del martillo

C: Número de capas

D: Número de Golpes

E: Volumen del Molde de Proctor Modificado

Utilizando la misma energía de compactación de Proctor Modificado, el mismo número de capas, las mismas propiedades del martillo, y modificando el volumen del molde según las dimensiones de este, el número de golpes que se requieren por capa se calculó de la siguiente manera:

Diámetro del Molde = 10 cm

Altura del Molde = 20 cm

$$V. \text{molde} = \pi * r^2 * H = \pi * 5^2 * 20 = 1570.8 \text{ cm}^3$$

$$61.2973 \text{ lbfcm/cm}^3 = \frac{(10 \text{ lbf})(45.72 \text{ cm})(5)(D)}{(1570.8 \text{ cm}^3)}$$

NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
43

2.3.2 Probetas de arena limosa Con el fin de tener el parámetro estándar de la resistencia a la compresión del suelo natural, se realizaron 3 probetas de arena limosa, para las cuales se calculó previamente la humedad natural del material, y

luego, se adicionó agua hasta obtener la humedad óptima de moldeo calculada con el ensayo de Proctor Modificado.

Imagen 2. Probeta de arena limosa



2.3.3 Probetas de arena limosa y PET tratadas térmicamente Los porcentajes de botella plástica triturada (PET) establecidos en un principio corresponden al 5, 10, 15 y 20% de material. Se realizaron las respectivas sustituciones de arena limosa por PET, por medio de volúmenes, teniendo en cuenta las densidades de cada uno de los elementos intervinientes (arena limosa y PET) en la elaboración de la mezcla.

Para cada uno de los porcentajes de PET y duración en el horno establecidos, se realizó tres probetas iguales, con el fin de corroborar resultados próximos.

Puesto que una arena no trasmite bien el calor debido al espaciamiento y forma de sus cristales, se buscó el tiempo óptimo en el horno para cada uno de los porcentajes de PET establecidos, y finalizado dicho tiempo, se registró la temperatura que alcanzó cada una de las probetas, con el fin de utilizar esta información para la propuesta de aplicación del geo-plástico en campo.

PARA EL 5% DE PET

Para el análisis de la probetas con 5% de Polietileno de Tereftalato, se variaron los tiempos en el horno de 6, 8, 10, 12 y 14 horas, para determinar el tiempo en el que

este porcentaje proporcionara la mayor resistencia a la compresión. La cantidad de material que se utilizó, se presenta en la **Tabla No 6.** y la **Tabla No 7.** y fue calculado por medio del reemplazo por volúmenes (**Ver Anexo D**).

Tabla 6. Cantidad de Arena Limosa para el 5%

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO		
Densidad del suelo	2.08	gr/cm3
Masa de Suelo	3500	Gramos
5 % de Masa a Quitar	175	Gramos
Volumen del 5 % de Suelo	84.134	cm3
Masa de Suelo a Utilizar	3325	Gramos

Tabla 7. Cantidad de PET para el 5%

CARACTERÍSTICAS DEL PET		
Densidad del PET	1.209	gr/cm3
Porcentaje de PET	5	%
Volumen de PET a Utilizar	84.134	cm3
Masa se PET a Utilizar	101.718	Gramos

Imagen 3. Probetas de 5% de PET con diferentes horas



La temperatura de las probetas al cumplir su tiempo en el horno varió entre los 194 °C y los 275°C, como se puede observar a continuación:

Tabla 8. Temperatura de las Probetas

TIEMPO	°C
6 Horas	194
	193
	194
8 Horas	211
	214
	206
10 Horas	228
	215
	214
12 Horas	238
	234
	238
14 Horas	275
	273
	274

El promedio de densidad seca obtenido de las probeta con 5% de botella plástica triturada fue de 2.01 gr/cm³, y se calculó realizando las mediciones de masa antes y después del tratamiento térmico, teniendo en cuenta el contenido de humedad.

PARA EL 10% DE PET

Para el análisis de las probetas con 10% de Polietileno de Tereftalato, los tiempos en el horno que se tuvieron en cuenta fueron de 6, 8, 10 y 12 horas, con el fin de buscar la mayor resistencia.

Imagen 4. Probetas de 10% de PET



La temperatura de las probetas al cumplir su tiempo en el horno, varió entre los 222 °C y los 287°C, como se puede observar a continuación:

Tabla 9. Temperatura de las Probetas

TIEMPO	°C
6 Horas	220
	227
	217
8 Horas	240
	237
	222
10 Horas	286
	282
	282
12 Horas	287
	283
	285

El promedio de densidad seca obtenido de las probeta con 10% de botella plástica triturada fue de 1.91 gr/cm³.

PARA EL 15% DE PET

Para el análisis de las probetas con 15% de PET, los tiempos en el horno que se tuvieron en cuenta fueron tiempos de 6, 8 y 10 horas, puesto que con los resultados de los porcentajes anteriores, no era viable hacer con más tiempos.

Imagen 5. Probetas de 15% de PET



La temperatura de las probetas al cumplir su tiempo en el horno, varió entre los 236 °C y los 286°C, como se puede observar a continuación:

Tabla 10. Temperatura de las Probetas

TIEMPO	°C
6 Horas	236
	246
	243
8 Horas	276
	284
	281
10 Horas	286
	284
	286

El promedio de densidad seca obtenido de las probeta con 15% de PET fue de 1.90 gr/cm³.

PARA EL 20% DE PET

Para las probetas con 20% de PET, los tiempos en el horno que se tuvieron en cuenta fueron tiempos de 6, 8 y 10 horas.

Imagen 6. Forma de medir la Temperatura



La temperatura de las probetas al cumplir su tiempo en el horno, varió entre los 243 °C y los 287°C, como se puede observar a continuación:

Tabla 11. Temperatura de las Probetas

TIEMPO	°C
6 Horas	246
	247
	243
8 Horas	278
	282
	281
10 Horas	286
	285
	287

El promedio de densidad seca obtenido de las probeta con 20% de botella plástica triturada fue de 1.89 gr/cm³.

2.3.4 Velocidad de carga La carga a compresión aplicada por la MTS 810 Material Test System (**Ver Imagen No 7**) se programó con el fin de que se produjera una deformación axial a una velocidad de 0.5 y 2.5 % por minuto como lo indica la norma. La altura de las probetas era de aproximadamente 20 cm, lo que indicó establecer la velocidad de carga a 3 mm/min.

Imagen 7. MTS 810 Material Test System



2.4 CBR

El ensayo de CBR se realizó para determinar el índice de resistencia para tres muestras con características iguales, pero con diferente proceso de compactación, con el fin de relacionar el contenido de agua y el peso unitario seco. El CBR se hizo para establecer un parámetro de comparación entre las resistencias que aporta el suelo solo y las que se esperan mejoren mediante la mezcla de este con la dosificación óptima de PET. Para cada uno de los especímenes se realizaron 3 capas como lo indica la norma, y lo que varió en cada uno, fue el número de golpes por capa, empezando con una probeta de 12, 25 y 56 golpes.

2.4.1 CBR de la arena limosa Para evaluar el índice de resistencia que proporcionó el ensayo de CBR en la arena limosa, se tomó una muestra de 15000 gramos, a la cual se le halló la humedad natural y se le agregó agua hasta lograr llegar a su humedad óptima de compactación, para realizar 3 especímenes.

Para cada una de las probetas se realizaron 3 capas con diferente número de golpes entre una y otra probeta. Sobre la superficie de cada una se colocó un vástago ajustable, y sobre él una sobrecarga, que produjo una presión de 10 lbf para simular posibles capas por encima del suelo en la realidad. Luego, se sumergieron los 3 moldes en agua por 4 días, inmediatamente sumergidos y al final del periodo de inmersión, se tomaron lecturas para medir la expansión del material (**Ver Imagen No 8 y 9**).

Imagen 8. Moldes de Arena Limosa con sobrecarga.



Imagen 9. Medición de la Expansión de la probeta.



Se inició el proceso de penetración del pistón de CBR, el cual aplicó una carga inicial de 44 N (10 lbf) que aumentó a una velocidad constante de 1.27 mm/min. Durante el ensayo se registró las cargas para cada una de las penetraciones definidas por

la norma, y finalmente se determinó la humedad de penetración del material (**Ver Imagen No 10**).

Imagen 10. Ensayo de CBR.



2.4.2 CBR del material compuesto El procedimiento para calcular el índice de resistencia del suelo mezclado con PET, fue prácticamente igual al que se realizó con el material no modificado. Debido a que era un material compuesto, y según nuestro plan de investigación, este debía someterse a temperatura para lograr la cohesión entre los materiales intervinientes.

El ensayo de CBR para la arena limosa más el Polietileno de Tereftalato, se realizó con el tiempo sometido a temperatura y dosificación óptima, determinado mediante los resultados de los ensayos de compresión inconfiada. La dosificación de cada uno de los materiales (Arena y PET) igualmente se determinó por medio de la relación de volúmenes. (**Ver Anexo D**).

Imagen 11. Tratamiento Térmico para Probetas de CBR.



2.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

El laboratorio de SEM, se realizó para obtener imágenes microscópicas del material y su composición, esto con el fin de determinar como el PET se adhiere al suelo después de un tratamiento térmico y los elementos que conforman cada una de las muestras.

El ensayo consistió en poner dos muestras (suelo solo y suelo más PET) sobre una base metálica con cinta adhesiva de carbón, luego se generó un alto vacío para realizar un recubrimiento con oro por medio del equipo Quorum 150ES.

Imagen 12. Quorum 150ES



Finalmente, se pasaron las muestras cubiertas por oro al Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun), donde se tomaron imágenes que se proporcionaron por medio de la energía que se genera del choque entre electrones, debido a un haz que emite el microscopio hacia la muestra conductora. Esto se

realizó a un voltaje de aceleración de 25kV por medio del detector de electrones retrodispersados BSE (Back Scattered Electrón Detector (BSED) tipo SSD).

Imagen 13. Microscopio Electrónico de Barrido FEG



2.6 CANTIDAD DE BOTELLAS

Se determinó el número de botellas plásticas que se usarían en el mejoramiento de una subrasante con el óptimo porcentaje, con el fin de estimar que tanto se contribuye al ambiente en una carretera sostenible.

Una botella de agua comercial de 600 ml, tiene una masa aproximada de 10 gramos.

Imagen 14. Botella plástica



Para un m² de subrasante con 15 cm de espesor se requieren 907 botellas plásticas.

Para un m³ de material se requieren 6045 botellas plásticas.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 COMPRESIÓN INCONFINADA

Como resultado del ensayo de Compresión Inconfinada para cada una de las probetas con los porcentajes de PET establecidos y para la arena limosa se obtuvieron los siguientes datos:

3.1.1 Probetas de arena limosa Las 3 probetas realizadas con el suelo no modificado (solo arena limosa), soportaron aproximadamente la misma carga a compresión que les proporcionaba la maquina MTS 810 Material Test System (**Ver Imagen No 7**), los resultados obtenidos tienen una desviación estándar muy baja de 0.0087, y por ello utilizaremos la media de los tres datos para representar el resultado de carga que soporta el suelo inalterado.

Tabla 12. Resistencia a la Compresión.

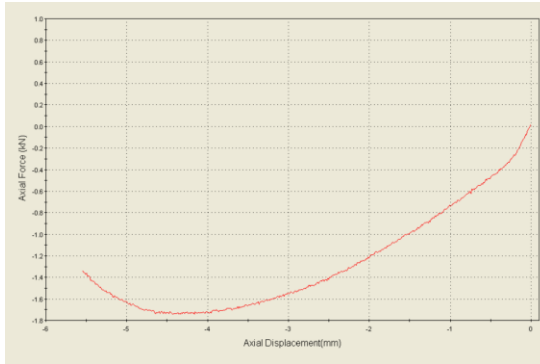
PROBETA	CARGA AXIAL
	(kN)
SUELO A	1.7449
SUELO B	1.7524
SUELO C	1.7349

CARGA AXIAL QUE SOPORTA LA ARENA LIMOSA
1.744 kN

Gráficamente se puede observar la curva Desplazamiento Vs Fuerza Axial que suministra la máquina de ensayo, donde la máxima carga soporta por el espécimen

fue de 1.7449 kN que proporciono un desplazamiento en la probeta de aproximadamente 4mm.

Gráfica 2. Desplazamiento vs Carga para la Arena limosa



3.1.2 Probetas de arena limosa y 5% de PET Para cada uno de los tiempos establecidos de las probetas en el horno, se realizaron 3 con el fin de corroborar resultados próximos.

Los resultados de carga que soportaron las 15 probetas de suelo mezclado con Polietileno de Tereftalato sometidas a un tratamiento térmico durante 6,8,10,12 y 14 horas son:

Tabla 13. Carga de Probetas con 5% de PET 6 Horas en el Horno

PROBETAS DE 5%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
6 HORAS EN EL HORNO	7.71	7.84
	7.86	
	7.97	

Tabla 14. Carga de Probetas con 5% de PET 8 Horas en el Horno

PROBETAS DE 5%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
8 HORAS EN EL HORNO	13.18	13.84
	13.37	
	13.60	

Tabla 15. Carga de Probetas con 5% de PET 10 Horas en el Horno

PROBETAS DE 5%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	17.85	18.28
	18.54	
	18.46	

Tabla 16. Carga de Probetas con 5% de PET 12 Horas en el Horno

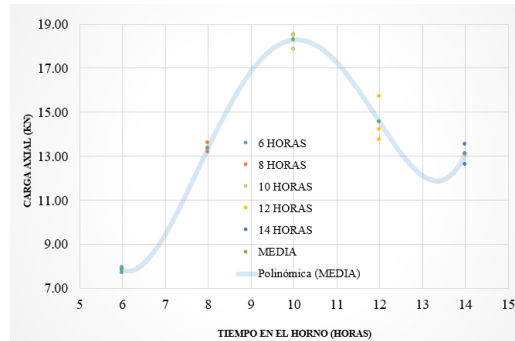
PROBETAS DE 5%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
12 HORAS EN EL HORNO	15.73	14.56
	14,20	
	13.76	

Tabla 17. Carga de Probetas con 5% de PET 14 Horas en el Horno

PROBETAS DE 5%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
14 HORAS EN EL HORNO	12.62	13.09
	13.12	
	13.53	

La representación gráfica de los resultados de compresión inconfiada obtenidos (**Ver Gráfica No 3**), permiten observar el comportamiento de como varia la carga que soporta el material compuesto con respecto a al número de horas que fue sometido a tratamiento térmico.

Gráfica 3. Carga VS Tiempo para 5% de PET



El tiempo óptimo en el horno donde se logra la máxima capacidad de soporte para el 5% de Polietileno de Tereftalato fue de 10 horas, alcanzando un promedio de temperatura de 219°C (**Ver Tabla No 8**).

3.1.3 Probetas de arena limosa y 10% de PET Para el 10% de Polietileno de Tereftalato se realizaron probetas con un tiempo estipulado en el horno de 6, 8, 10 y 12 horas.

Tabla 18. Carga de Probetas con 10% de PET 6 Horas en el Horno

PROBETAS DE 10%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	
6 HORAS EN EL HORNO	6.43	6.54
	6.66	
	6.52	

Tabla 19. Carga de Probetas con 10% de PET 8 Horas en el Horno

PROBETAS DE 10%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
8 HORAS EN EL HORNO	12.98	13.27
	13.37	
	13.44	

Tabla 20. Carga de Probetas con 10% de PET 10 Horas en el Horno

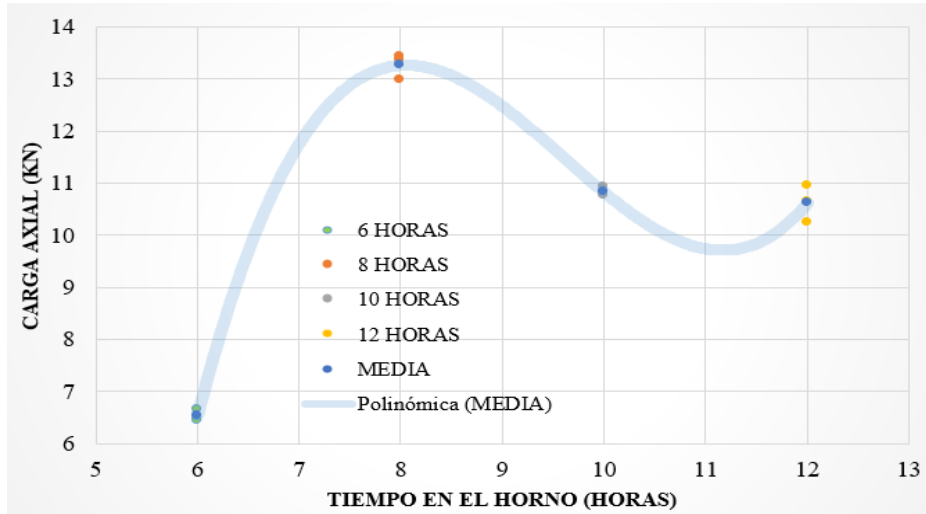
PROBETAS DE 10%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	10.83	10.84
	10.92	
	10.77	

Tabla 21. Carga de Probetas con 10% de PET 12 Horas en el Horno

PROBETAS DE 10%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
12 HORAS EN EL HORNO	10.65	10.63
	10.25	
	10.96	

Con los resultados del ensayo de compresión inconfiada para el 10% de Polietileno de Tereftalato, podemos concluir que el tiempo óptimo en el horno para este porcentaje disminuyo con respecto al porcentaje anterior a 8 horas, y esto posiblemente se presentó debido a que se aumentó en gran medida el material plástico, haciendo un poco más conductiva térmicamente la muestra (**Ver Gráfica No 4**).

Gráfica 4. Carga VS Tiempo para 10% de PET



3.1.4 Probetas de arena limosa y 15% de PET Para el 15% de Polietileno de Tereftalato se realizaron probetas con un tiempo estipulado en el horno de 6, 8 y 10 horas, con el fin de buscar la máxima carga axial en el intermedio de esos horarios, de no ser así se realizarían con otros tiempos.

Tabla 22. Carga de Probetas con 15% de PET 6 Horas en el Horno

PROBETAS DE 15%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
6 HORAS EN EL HORNO	2.24	2.96
	3.19	
	3.45	

Tabla 23. Carga de Probetas con 15% de PET 8 Horas en el Horno

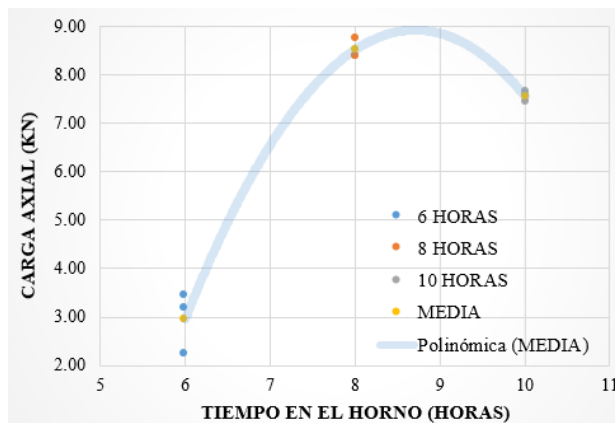
PROBETAS DE 15%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
8 HORAS EN EL HORNO	8.41	8.52
	8.40	
	8.76	

Tabla 24. Carga de Probetas con 15% de PET 10 Horas en el Horno

PROBETAS DE 15%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	7.59	7.57
	7.46	
	7.66	

Con los resultados de los ensayo de compresión inconfiada para el 15% de Polietileno de Tereftalato, podemos concluir que el tiempo óptimo en el horno para este porcentaje continua siendo de 8 horas, pero se puede notar una disminución significativa en las cargas que este material compuesto soportan (**Ver Gráfica No 5**).

Gráfica 5. Carga VS Tiempo para 15% de PET



3.1.5 Probetas de arena limosa y 20% de PET Para las probetas con un 20% de Polietileno de Tereftalato, los tiempos establecidos de estas en el horno fueron de 6, 8 y 10, esperando que la máxima carga que soportan esté en el tiempo intermedio, generando una concavidad en la gráfica de resultados.

Tabla 25. Carga de Probetas con 20% de PET 6 Horas en el Horno

PROBETAS DE 20%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
6 HORAS EN EL HORNO	2.15	2.21
	2.22	
	2.26	

Tabla 26. Carga de Probetas con 20% de PET 8 Horas en el Horno

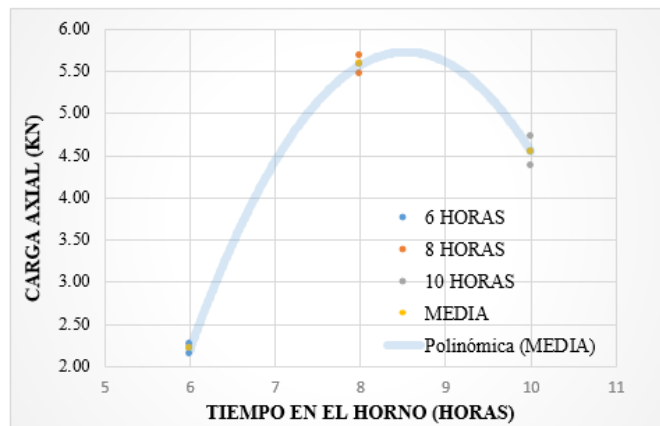
PROBETAS DE 20%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
8 HORAS EN EL HORNO	5.68	5.58
	5.47	
	5.58	

Tabla 27. Carga de Probetas con 20% de PET 10 Horas en el Horno

PROBETAS DE 20%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	4.55	4.55
	4.73	
	4.37	

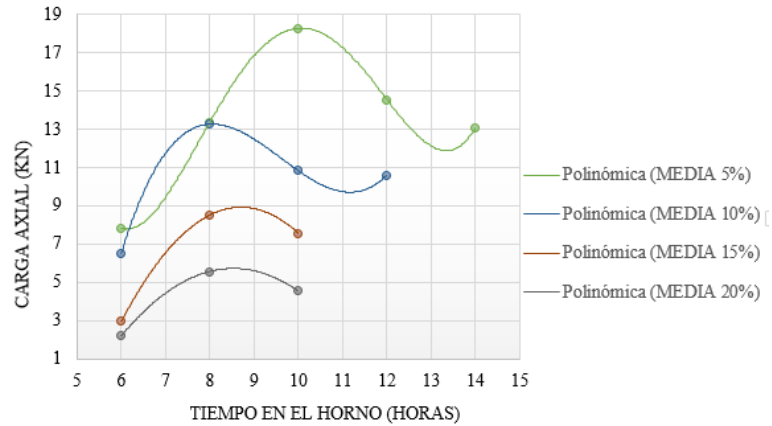
Las probetas con el 20% de PET, proporcionaron resultados de resistencia a la compresión muy bajos respecto a los obtenidos con los anteriores porcentajes, y el tiempo óptimo en el horno fue de 8 horas (**Ver Gráfica No 6**).

Gráfica 6. Carga VS Tiempo para 20% de PET



Debido a los resultados obtenidos anteriormente de las probetas de suelo mezcladas con los diferentes porcentajes de botella plástica triturada, podemos concluir que la mayor resistencia a la compresión se logró con un porcentaje de 5% del polímero y con 10 horas de tratamiento térmico (**Ver Gráfica No 7**). Todos los porcentajes de PET mejoraron la carga respecto a la del suelo natural, pero la óptima se consiguió con 10 horas en el horno y 5% del PET, lo que conllevó a realizar otros ensayos con el fin de acotar este resultado óptimo, por ello, se realizaron probetas con el 4 y 6 % de plástico sometidas a las mismas 10 horas de temperatura.

Gráfica 7. Carga Vs Tiempo para los Diferentes Porcentajes de PET



3.1.6 Probetas de arena limosa y 4% de PET

Tabla 28. Carga de Probetas con 4% de PET 10 Horas en el Horno

PROBETAS DE 4%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	14.60	14.46
	14.33	
	14.47	

3.1.7 Probetas de arena limosa y 6% de PET

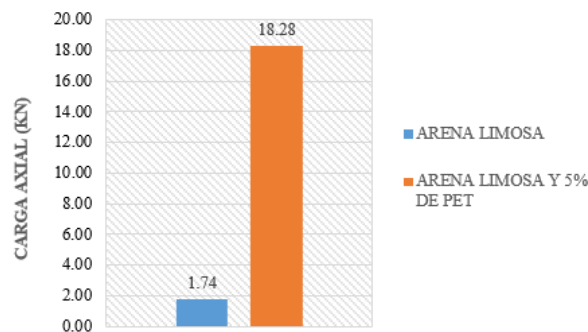
Tabla 29. Carga de Probetas con 6% de PET 10 Horas en el Horno

PROBETAS DE 6%	CARGA AXIAL	PROMEDIO CARGA AXIAL
	(kN)	(kN)
10 HORAS EN EL HORNO	9.92	10.51
	11.05	
	10.56	

El estudio realizado por medio del laboratorio de compresión inconfiada determinó que el porcentaje óptimo de Polietileno de Tereftalato que se debe utilizar para el mejoramiento de la carga de soporte de un suelo es de un 5%, sometido a un tratamiento térmico donde todo el material alcance una temperatura aproximada de 219°C.

La arena limosa soportó una carga axial de 1.744 kN, mientras que mezclada con el polímero en un 5% soportó 18.28 kN, lo que hace mejora 10 veces mas la propiedad mecánica a la compresión del suelo compuesto con respecto al no modificado.

Gráfica 8. Comparación del Mejoramiento Del Suelo



3.2 ENSAYO CBR

PARA LA ARENA LIMOSA

Los resultados de carga y de presión aplicada por el pistón para cada una de las penetraciones establecidas por la norma son:

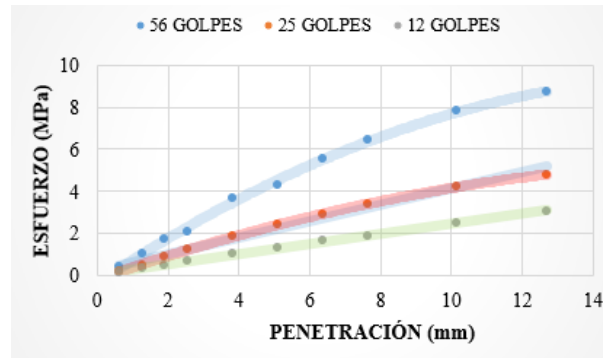
Tabla 30. Carga Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa

Penetración		Carga [N]		
in	mm	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0.03	0.635	31	41	79
0.05	1.27	63	99	204
0.08	1.905	97	169	332
0.1	2.54	133	238	402
0.15	3.81	200	357	712
0.2	5.08	256	465	825
0.25	6.35	316	567	1072
0.3	7.62	368	656	1248
0.4	10.16	482	818	1519
0.5	12.7	590	929	1684

Tabla 31. Presión Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa

Penetración		Presión [Mpa]		
in	mm	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0.025	0.635	0.160	0.212	0.408
0.05	1.27	0.326	0.512	1.054
0.075	1.905	0.501	0.873	1.716
0.1	2.54	0.687	1.230	2.078
0.15	3.81	1.034	1.845	3.680
0.2	5.08	1.323	2.403	4.264
0.25	6.35	1.633	2.930	5.540
0.3	7.62	1.902	3.390	6.450
0.4	10.16	2.491	4.227	7.850
0.5	12.7	3.049	4.801	8.703

Gráfica 9. Penetración Vs Esfuerzo Para los Especímenes de Arena Limosa



RELACIÓN DE SOPORTE (CBR)

Para cada uno de los especímenes realizados, se calculó la relación de soporte (CBR) con respecto a los esfuerzos producidos en la penetración de 2.54 mm y 5.08 mm, y se tomó como resultado de CBR el mayor entre los dos obtenidos.

$$CBR(2.54 \text{ mm}) = \frac{\text{Esfuerzo en } 2.54 \text{ mm}}{6.9 \text{ MPa}} * 100$$

$$CBR(5.08 \text{ mm}) = \frac{\text{Esfuerzo en } 5.08 \text{ mm}}{10.3 \text{ MPa}} * 100$$

Tabla 32. Resultados de CBR para La Arena Limosa

	CBR (2,54 mm) [%]	CBR (5.08 mm) [%]
12 GOLPES	9.96	12.84
25 GOLPES	17.83	23.33
56 GOLPES	30.11	41.39

RELACIÓN DE SOPORTE (CBR) DE DISEÑO PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMA

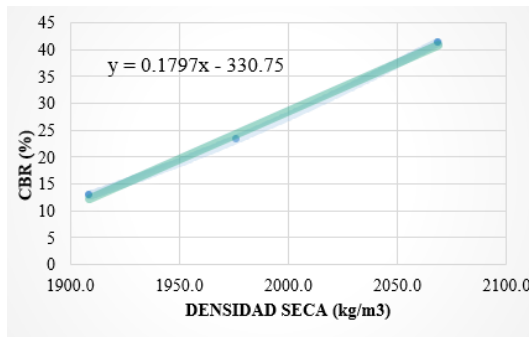
Para el cálculo del CBR de diseño, se tuvo en cuenta el peso unitario seco máximo y la humedad óptima de compactación, determinados mediante el ensayo de Proctor Modificado, los cuales fueron igual a 2080 kg/m³ y 12.2 % respectivamente.

Tabla 33. Densidad Seca Para La Arena Limosa

Molde	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
Peso Molde (gr)	8888	9214	8914
Peso Molde + Suelo Húmedo (gr)	13436	13923	13843
Peso del Suelo Húmedo (gr)	4548	4708	4929
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	2.1	2.2	2.3
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.9	2.0	2.1
Densidad Seca (kg/m ³)	1909	1976	2068

Con el fin de determinar el CBR de diseño, se grafica la curva Densidad Seca Vs CBR, y se establece que el CBR de diseño es igual al punto que pasa por la curva cuando el peso unitario seco es máximo (2080 kg/m³).

Gráfica 10. Densidad Seca Vs CBR Para La Arena Limosa



$$CBR_{Diseño} = 0.1797 X - 330.75$$

$$CBR_{Diseño} = 0.1797 (2080 \text{ kg/m}^3) - 330.75$$

$CBR_{Diseño} = 43 \%$

EXPANSIÓN DEL SUELO

Los tres especímenes de arena limosa no reportaron ninguna expansión, fue igual a cero.

PARA LA ARENA LIMOSA Y POLIETILENO DE TEREFALATO

Los resultados de carga y de presión para los 3 especímenes de suelo y PET con diferente energía de compactación son:

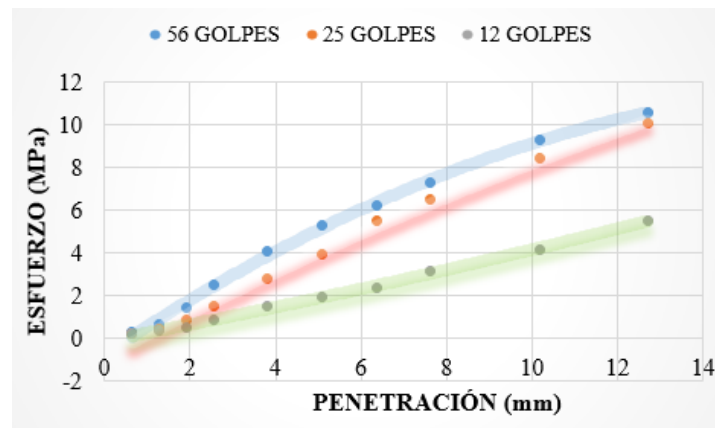
Tabla 34. Carga Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa y el PET

Penetración		Carga [N]		
in	mm	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0.025	0.635	32	34	47
0.05	1.27	62	82	126
0.075	1.905	92	163	274
0.1	2.54	158	289	478
0.15	3.81	293	530	789
0.2	5.08	375	752	1025
0.25	6.35	447	1054	1193
0.3	7.62	608	1252	1405
0.4	10.16	801	1633	1797
0.5	12.7	1066	1940	2042

Tabla 35. Presión Aplicada por el Pistón de CBR Para La Arena Limosa y el PET

Penetración		Presión [Mpa]		
in	mm	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
0.025	0.635	0.165	0.176	0.243
0.05	1.27	0.320	0.424	0.651
0.075	1.905	0.475	0.842	1.416
0.1	2.54	0.817	1.494	2.470
0.15	3.81	1.514	2.739	4.078
0.2	5.08	1.938	3.886	5.297
0.25	6.35	2.310	5.447	6.165
0.3	7.62	3.142	6.470	7.261
0.4	10.16	4.140	8.439	9.287
0.5	12.7	5.509	10.026	10.553

Gráfica 11. Penetración Vs Esfuerzo Para El Especimen de 12 golpes



RELACIÓN DE SOPORTE (CBR)

La relación de soporte (CBR) con respecto a los esfuerzos producidos en la penetración de 2.54 mm y 5.08 mm, es:

Tabla 36. Resultados de CBR para La Arena Limosa y PET

	CBR (2,54 mm) [%]	CBR (5.08 mm) [%]
12 GOLPES	11.83	18.82
25 GOLPES	21.65	37.73
56 GOLPES	35.80	51.43

RELACIÓN DE SOPORTE (CBR) DE DISEÑO PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMA DEL SUELO Y PET

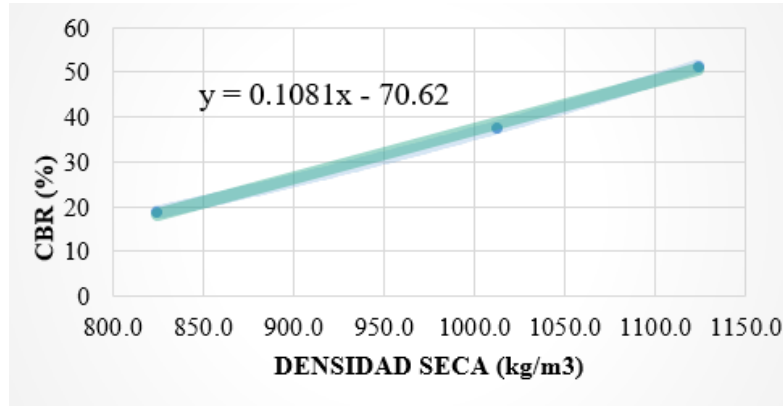
Para el cálculo del CBR de diseño, se tuvo en cuenta el peso unitario seco máximo de los tres probetas realizadas.

Tabla 37. Densidad Seca Para La Arena Limosa y el PET

Molde	12 Golpes	25 Golpes	56 Golpes
Peso Molde (gr)	8928	9004	9074
Peso Molde + Suelo Húmedo (gr)	10892	11416	11751
Peso del Suelo Húmedo (gr)	1964	2412	2677
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	0.9	1.1	1.3
Densidad Seca (gr/cm ³)	0.8	1.0	1.1
Densidad Seca (kg/m ³)	824	1012	1123

Con el fin de determinar el CBR de diseño, se grafica la curva Densidad Seca Vs CBR, y se establece que el CBR de diseño es igual al punto que pasa por la curva cuando el peso unitario seco es máximo (1123 kg/m³).

Gráfica 12. Densidad Seca Vs CBR Para La Arena Limosa y el PET



$$CBR = 0.1081(x) - 70.62$$

$$CBR = 0.1081 (1123 \text{ kg/m}^3) - 70.62$$

$$CBR_{Diseño} = 51\%$$

EXPANSIÓN DEL SUELO Y PET

Tabla 38. Resultados de Expansión para La Arena Limosa y PET

MOLDE	EXPANSIÓN (%)
12 GOLPES	2.293
25 GOLPES	1.965
56 GOLPES	1.747

3.3 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Las imágenes que se obtuvieron de la realización de este ensayo de laboratorio, hacen que se evidencie en la muestra de suelo y PET más porosidad, debido a la fusión que presenta el plástico. Los vacíos que se generan de este cambio de

estado hacen que se cree una delgada capa de color negro alrededor de la muestra de suelo, debido al polímero utilizado.

Imagen 15. Arena Limosa

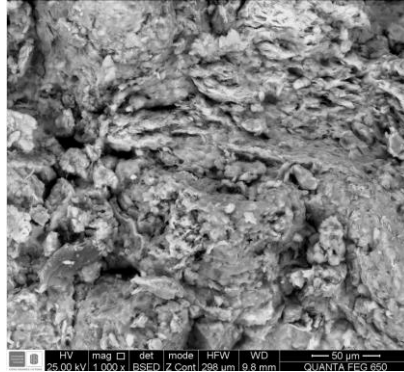
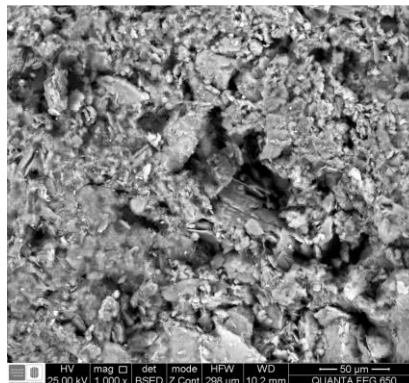


Imagen 16. Arena Limosa y PET



Los elementos encontrados en las dos muestras varían drásticamente en la cantidad de carbono, debido al polímero que en una de ellas se encuentra.

Gráfica 13. Arena Limosa

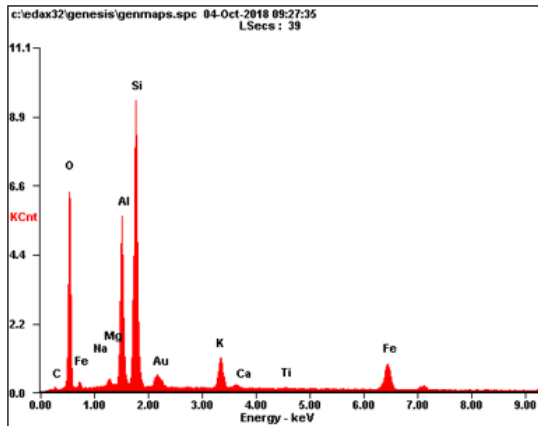


Tabla 39. Arena Limosa

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	02.01	03.72
<i>O</i>	41.14	57.33
<i>Na</i>	00.00	00.00
<i>Mg</i>	00.70	00.64
<i>Al</i>	13.75	11.36
<i>Si</i>	27.37	21.72
<i>Au</i>	04.74	00.54
<i>K</i>	03.28	01.87
<i>Ca</i>	00.08	00.05
<i>Ti</i>	00.14	00.07
<i>Fe</i>	06.80	02.71
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Gráfica 14. Arena Limosa y PET

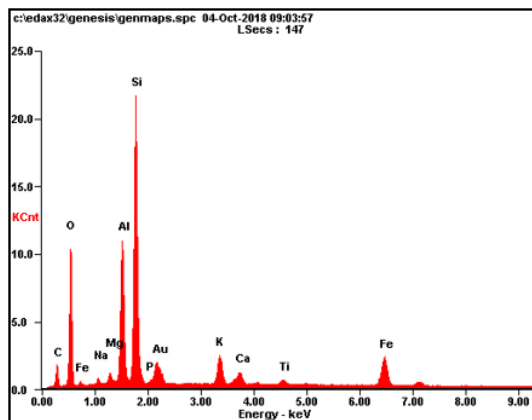


Tabla 40. Arena Limosa Y PET

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	12.56	22.41
<i>O</i>	32.09	42.98
<i>Na</i>	00.68	00.64
<i>Mg</i>	00.89	00.79
<i>Al</i>	10.99	08.73
<i>Si</i>	24.10	18.38
<i>P</i>	00.25	00.17
<i>Au</i>	06.79	00.74
<i>K</i>	02.87	01.57
<i>Ca</i>	01.23	00.66
<i>Ti</i>	00.69	00.31
<i>Fe</i>	06.84	02.63
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

4. PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN EN CAMPO

4.1 MEDIANTE UN LANZALLAMAS

Se simuló una posible ejecución en campo que consistió en elaborar en un molde parte de una subrasante compactada con material geo-plástico, las dimensiones del área del molde eran de 30cm*40 cm. Se realizó un supuesto terreno natural con un espesor de 4cm, y sobre él, se compactó el material compuesto por la arena limosa y el porcentaje óptimo de polietileno, con su humedad óptima de moldeo para un espesor de capa de 15cm, como usualmente se utiliza.

Imagen 17. Simulación de Subrasante Compactada



Para la subrasante geo-plástica se utilizó la misma energía de compactación, el mismo número de capas y las mismas propiedades del martillo del ensayo Proctor Modificado. Se cambió el volumen del molde según las dimensiones de este, y el número de golpes que se requieren es:

Volumen = 18000 cm³

$$61.2973 \text{ lbfcm/cm}^3 = \frac{(10 \text{ lbf})(45.72 \text{ cm})(5)(D)}{(18000 \text{ cm}^3)}$$

NÚMERO DE GOLPES POR CAPA
483

Una vez simulada la subrasante geo-sintética, se instala una termocupla 15 cm abajo de la superficie del suelo, con el fin de que, al aplicar calor se controle el tiempo que tarde en llegar el material a la temperatura óptima de 219°C.

Trascurridos 45 minutos, la termocupla no registró ningún cambio de temperatura con respecto a la inicial (24°C), y se concluyó que este método no es viable por el gran tiempo que demanda, sería poco eficaz su implementación.

Imagen 18. Simulación de campo Aplicando Temperatura



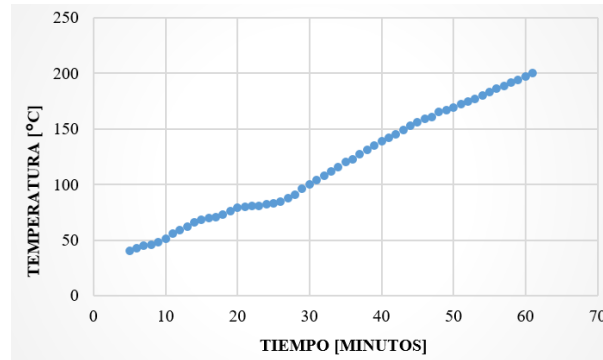
Imagen 19. Sensor de Temperatura



Con el fin de determinar la velocidad a la que viaja la temperatura por el material, se decidió ubicar la termocupla 5 cm abajo de la superficie donde se aplicó la llama.

Se requirió aproximadamente una hora para que el material alcanzara una temperatura de 200°C.

Gráfica 15. Tiempo Vs Temperatura



La temperatura incrementó a una velocidad de 3.88°C/min, lo que hace poco viable este método para tramos cortos de carretera y lo hace imposible para grandes extensiones.

4.2 POR MEDIO DE RIEGO

En muchos países se ha implementado el plástico reciclado en la construcción de carreteras, y la mayoría de ellos lo utilizan para la capa de rodadura.

La implementación que se propone para la realización de la subrasante mejorada, consiste en extender capas de suelo que se emparejan por medio del vibro compactador. Luego, por medio de un camión cisterna, se aplica el riego del plástico derretido, y así rellenar poros y lograr la cohesión que se busca entre los materiales. El proceso se debe realizar las veces necesarias para alcanzar el grosor de capa que se busca.

4.3 POR MEDIO DE LOSAS PREFABRICADAS

Otro posible método de implementación en campo, es a través de losas prefabricadas de suelo con el óptimo porcentaje de PET. Es una forma de controlar fácilmente los parámetros de temperatura en el horno y es una manera bastante eficaz de instalar, lo que sería muy viable en la realidad.

Imagen 20. Losas Prefabricadas



5. CONCLUSIONES

Por las razones y evidencias mencionadas en el transcurso de este trabajo, es correcto afirmar que para el mejoramiento de la propiedad mecánica a la compresión de un suelo de tipo arena limosa se debe adicionar un 5% de Polietileno de Tereftalato, sometiendo el material compuesto a 10 horas de tratamiento en el horno, dicho componente incrementa en gran medida la resistencia a la compresión del suelo no modificado hasta 10 veces con su implementación.

Como resultado de la investigación se corroboró cómo la temperatura afecta de manera drástica al material compuesto, debido a los grandes cambios presentados en los resultados del ensayo de compresión, en probetas con iguales características, pero con diferente duración en el tratamiento térmico.

Con el ensayo de CBR se demuestra que el suelo mezclado con el material plástico reciclado, mejora en gran proporción su índice de resistencia con respecto al suelo inalterado. Es viable esta implementación en campo, ya que el CBR para la arena limosa y para la arena con PET, respectivamente es igual a 43 % y 51% y según la Tabla 220-1 (Requisitos de los materiales para terraplenes) del Art 220 (TERRAPLENES) en el capítulo 2, de las especificaciones del INVIAS, el valor de CBR para un suelo adecuado debe ser mayor o igual a 5%.

Finalmente, se concluye que es indispensable empezar a incluir el plástico reciclado, en la construcción de una ciudad sostenible. Más que para el mejoramiento de propiedades mecánicas en diferentes estructuras, es una forma de mitigar un poco la contaminación que hoy por hoy vivimos y que aumenta con el transcurrir del tiempo, ya que se estima que el mundo arroja 13 millones de

toneladas de desechos plásticos cada año al mar, y se cree que para el 2050 habrá más plástico que peces en nuestros océanos⁶.

⁶ CASA TIEMPO, La polución plástica hace necesario otro Acuerdo de París, El Tiempo. [en línea], Disponible en: <https://www.eltiempo.com/vida/medioambiente/contaminacion-por-plastico-en-el-mundo-hace-necesario-acuerdo-de-paris-104802>

6. RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de emisión de gases con el objetivo de identificar qué tan perjudicial es este proceso para con la capa de ozono.
- Implementar el método para la capa de rodadura, disminuyendo el material bituminoso y remplazarlo por PET.
- Hacer un estudio en el que se aprecie el grado de contaminación que el plástico pueda efectuar sobre el terreno aledaño.

BIBLIOGRAFÍA

CASA TIEMPO, La polución plástica hace necesario otro Acuerdo de París, El Tiempo. [en línea] Disponible en: <https://www.eltiempo.com/vida/medioambiente/contaminacion-por-plastico-en-el-mundo-hace-necesario-acuerdo-de-paris-104802>

CLUBE NSAYOS Suelo. Tipos, Clasificación, Estructura E Importancia. - *Informe de Libros*. [en línea] Disponible en: <https://www.clubensayos.com/Informes-de-Libros/Suelo-Tipos-Clasificacin-Estructura-E-Importancia/516815.html>.

CLUBENSAYOS Impacto Ambiental Del PET En México Y En El Mundo - Informe de Libros. [en línea] Disponible en: <https://www.clubensayos.com/Acontecimientos-Sociales/Impacto-Ambiental-Del-PET-En-México-Y-En/577978.html>.

KHOURY, N. KHOURY, C School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, 202 W. Boyd, Norman, OK, 73019, United States
PoroMechanics Institute, 100 E. Boyd Street, Norman, OK 73019, United States.

MARKETIZER.. Usos y aplicaciones del Polietileno Tereftalato (PET) | QuimiNet.com. [en línea] Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-polietileno-tereftalato-pet-42703.htm>.

O'NEAL, D. LAVERNE. Los componentes del suelo: arena, limo y arcilla. [en línea] Disponible en: <https://www.geniolandia.com/13082695/los-componentes-del-suelo-arena-limo-y-arcilla>

ORTÚZAR S, J. Modelos de demanda de transporte. 2nd ed. México: ALFAOMEGA, 2000 p.157.

RAE Arena [en línea] Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=3UhFq2v>

ANEXOS

Anexo A: Método para determinar el Peso Específico de la arena.

Método para determinar el Peso Específico de la arena.

Procedimiento:

- ✓ Se midió el peso del balón aforado con agua hasta la marca.
- ✓ Se secó una muestra de material en el horno, a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta alcanzar una masa constante. Seguido de ello se pesó 150 gramos de este material para la determinación de la gravedad específica.
- ✓ Por medio de un embudo se introdujeron los sólidos de suelo en el balón aforado sin ningún líquido adentro.
- ✓ Se agregó agua y se agitó tratando de formar una lechada; se terminó de añadir agua hasta la marca, lavando las partículas de material que quedaron adheridas en el cuello del balón aforado.
- ✓ Se procedió a medir la masa del frasco con suelo y agua hasta la marca, empleando siempre la misma balanza.
- ✓ Se extrajo la totalidad del suelo del balón aforado, y se secó en el horno a una temperatura $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante; luego se midió la masa seca de los sólidos.

DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (A) = 653.3 gr

Peso de la Muestra (B) = 150 gr

Muestra + Frasco + Agua hasta la marca (C) = 739.5 gr

Peso de la Muestra Seca al Horno (D) = 138.3 gr

**CÁLCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS
(SUELO)**

$$\text{GER} = \frac{B}{A + B - C} = \frac{150 \text{ gr}}{653.3 \text{ gr} - 739.5 \text{ gr} + 150 \text{ gr}}$$

GER = 2.3511

Anexo B: Método para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de la arena limosa.

MÉTODO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD ÓPTIMA Y LA DENSIDAD SECA MÁXIMA DE LA ARENA.

Procedimiento:

- ✓ Definido el método A para la realización de este ensayo, se procede a seleccionar el material a utilizar, que es el que pasó el tamiz de abertura de 4.75 mm (No. 4). El suelo manipulado no fue anteriormente compactado, esto con el fin de no alterar nuestros resultados.
- ✓ Se prepararon cuatro muestras, con diferentes humedades, con el fin de encontrar la óptima.
- ✓ A la primera muestra se le adicionó agua en pocas cantidades hasta conseguir una humedad visualmente determinada. Esto se consiguió apretando el suelo con el fin de que se formara un terrón que al liberarse la presión de la mano no se separara. La cantidad de agua necesaria para conseguir esa humedad para 2500 gramos de suelo fueron 100 ml.
- ✓ Se tomó la lectura de la masa del molde más la base (**Ver Imagen No 21**).
- ✓ Se preparó el molde con la base y el collar de extensión, ajustándolo con las respectivas roscas.
- ✓ Luego se realizó la compactación, lo mejor distribuido posible en 5 capas, cada una con 25 golpes.
- ✓ La quinta capa sobrepasó el molde, con el fin de que al quitar el collar de extensión, se enrasara la superficie lo más horizontal posible.
- ✓ Se determinó y anotó la masa del molde más la base y el suelo compactado (**Ver Imagen No 22**).

- ✓ Se extrajo la probeta y se tomó una parte de ella para determinar la humedad con la que fue compactada, registrando la masa de suelo húmedo y buscando su masa constante por medio del horno (**Ver Imagen No 23**).
- ✓ De igual forma pero modificando la humedad, es decir, se aumentó la cantidad de agua a adicionar al material, 50 ml con respecto a la probeta anterior, se realizaron 3 probetas más.
- ✓ Al realizarse la última probeta se aseguró que los pesos unitarios húmedos formaran una curva, es decir se presentara un pico en la gráfica.

Imagen No 21. Masa del molde más la base.



Imagen No 22. Masa del molde más la base y el suelo compactado.



Imagen No 23. Probetas con diferentes Humedades.



DATOS OBTENIDOS:

Probeta	1	2	3	4
Peso del Molde (gr)	4163	4163	4163	4163
Peso del Molde + Suelo Húmedo (gr)	6071	6143	6271	6238
Peso Suelo Húmedo Compactado (gr)	1907	1979	2108	2075
Densidad Húmeda (gr/cm ³)	2.05	2.12	2.26	2.23
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.91	1.95	2.04	1.95

CÁLCULO DE LA DENSIDAD HÚMEDA

$$Densidad Humeda = \frac{Peso\ del\ Suelo\ Humedo}{Volumen\ del\ molde}$$

✓ Probeta 1

$$Densidad Humeda = \frac{1907\ gr}{932.34\ cm^3}$$

$$\text{Densidad Humeda} = 2.046 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

✓ Probeta 2

$$\text{Densidad Humeda} = \frac{1979 \text{ gr}}{932.34 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad Humeda} = 2.123 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

✓ Probeta 3

$$\text{Densidad Humeda} = \frac{2108 \text{ gr}}{932.34 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad Humeda} = 2.260 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

✓ Probeta 4

$$\text{Densidad Humeda} = \frac{2075 \text{ gr}}{932.34 \text{ cm}^3}$$

$$\text{Densidad Humeda} = 2.226 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

DATOS DE HUMEDAD OBTENIDOS EN CADA PROBETA:

Probeta	1	2	3	4
---------	---	---	---	---

PESO TARA (gr)	5.3	5.5	8.5	5.2	4.5	8.3	5.5	8.4
PESO DE TARA + SUELO HUMEDO (gr)	50.3	48.2	49.1	46.9	46.9	49.8	48.7	47.8
PESO DE TARA + SUELO SECO (gr)	47.3	45.3	45.7	43.4	42.7	45.8	43.3	42.9
PESO AGUA	3.0	2.9	3.4	3.5	4.2	4.0	5.4	4.9
PESO SOLIDO	42.0	39.8	37.2	38.2	38.2	37.5	37.8	34.5
HUMEDAD	7.1	7.3	9.1	9.2	11.0	10.7	14.3	14.2
PROMEDIO HUMEDAD %	7.21		9.15		10.83		14.24	

CÁLCULO DE LA HUMEDAD

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso del Solido}} * 100\%$$

✓ Probeta 1

Para Tara 1

$$\% \text{ Humedad } T1 = \frac{3.0}{42.0} * 100\% = 7.1 \%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{2.9}{39.8} * 100\% = 7.3 \%$$

Humedad para la Probeta 1
$\% \text{ Humedad} = \frac{7.1 + 7.3}{2} = 7.21 \%$

✓ Probeta 2

Para Tara 1

$$\% \text{ Humedad } T1 = \frac{3.4}{37.2} * 100\% = 9.1 \%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{3.5}{38.2} * 100\% = 9.2 \%$$

Humedad para la Probeta 2
$\% \text{ Humedad} = \frac{9.1 + 9.2}{2} = 9.15 \%$

✓ Probeta 3

Para Tara 1

$$\% \text{ Humedad } T1 = \frac{4.2}{38.2} * 100\% = 11.0\%$$

Para Tara 2

$$\% \text{ Humedad } T2 = \frac{2.0}{37.5} * 100\% = 10.7 \%$$

Humedad para la Probeta 3
$\% Humedad = \frac{11.0 + 10.7}{2} = 10.83 \%$

✓ Probeta 4

Para Tara 1

$$\% Humedad T1 = \frac{5.4}{37.8} * 100\% = 14.3 \%$$

Para Tara 2

$$\% Humedad T2 = \frac{4.9}{34.5} * 100\% = 14.2\%$$

Humedad para la Probeta 4
$\% Humedad = \frac{14.3 + 14.2}{2} = 14.24 \%$

CÁLCULO DE LA DENSIDAD SECA

$$Densidad Seca = \frac{Densidad Humedad}{1 + \frac{Humedad de la probeta}{100}}$$

✓ Probeta 1

$$Densidad Seca = \frac{2.046}{1 + \frac{7.21}{100}} = 1.91 \text{ gr/cm}^3$$

✓ Probeta 2

$$\text{Densidad Seca} = \frac{2.123}{1 + \frac{9.15}{100}} = 1.95 \text{ gr/cm}^3$$

✓ Probeta 3

$$\text{Densidad Seca} = \frac{2.260}{1 + \frac{10.83}{100}} = 2.04 \text{ gr/cm}^3$$

✓ Probeta 4

$$\text{Densidad Seca} = \frac{2.226}{1 + \frac{14.42}{100}} = 1.95 \text{ gr/cm}^3$$

Con los datos obtenidos de densidades secas y porcentajes de humedad de cada una de las 4 probetas realizadas, se pudo graficar la curva de compactación (**Ver Grafica No 1.**) que proporciona la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Densidad Seca Máxima = 2.08 gr/cm³

Humedad Optima = 12.2

%

Anexo C: Método para determinar el Peso Específico del Polietileno de Tereftalato (PET).

Método para determinar el Peso Específico deL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET).

Procedimiento:

- ✓ Se midió el peso del balón aforado con agua hasta la marca.
- ✓ Se pesó 100 gramos de este material para la determinación de la gravedad específica (**Ver Imagen No 24**).
- ✓ Por medio de un embudo se introdujeron los sólidos de PET en el balón aforado sin ningún líquido adentro.
- ✓ Luego se agregó agua y se agito; seguido de ello se terminó de añadir agua hasta la marca, lavando las partículas de material que quedaron adheridas en el cuello del balón aforado (**Ver Imagen No 25**).
- ✓ Se procedió a medir la masa del frasco con PET y agua hasta la marca, empleando siempre la misma balanza.
- ✓ Se extrajo la totalidad del suelo del balón aforado, y se secó dejándolo varios días al aire libre; luego se midió la masa seca de los sólidos.

Imagen No 24. Polietileno de Tereftalato (PET)

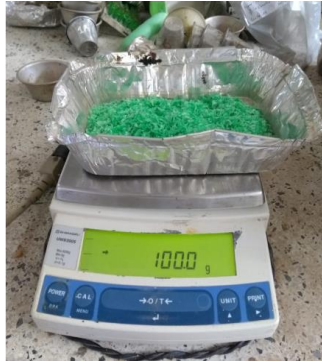


Imagen No 25. Balón aforado con PET y agua



DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (A) = 653 gr

Peso de la Muestra (B) = 100 gr

Muestra + Frasco + Agua hasta la marca (C) = 670.2 gr

Peso de la Muestra Seca (D) = 99.5 gr

CÁLCULO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL POLIETILENO DE TEREFTALATO (PET)

$$\text{GER} = \frac{B}{A + B - C} = \frac{100 \text{ gr}}{653 \text{ gr} - 670.2 \text{ gr} + 100 \text{ gr}}$$

GER = 1.2090

Anexo D: Método para determinar el 5% de PET en la masa de suelo para CBR.

MÉTODO PARA DETERMINAR EL 5% DE PET EN LA MASA DE SUELO PARA CBR.

Puesto que el volumen del molde es de 2331.26 cm³, y la densidad de la arena limosa es de 2.08 gr/cm³, calculamos la masa necesaria para suplir ese volumen.

$$\text{Masa de Suelo} = \text{Densidad} * \text{Volumen}$$

$$\text{Masa de Suelo} = 2.08 \text{ gr/cm}^3 * 2331.26 \text{ cm}^3$$

$\begin{aligned} \text{Masa de Suelo} \\ = 4849.02 \text{ gr} \end{aligned}$

Teniendo en cuenta las pérdidas y que la última capa compactada debe sobrepasar al anillo de extensión (con el fin de enrasar la superficie), utilizamos 5000 gramos de arena limosa, de los cuales restamos el 5% del material el cual será reemplazado, obteniendo una masa de:

$$\text{Masa de Suelo} = 5000 \text{ gr} - 0.05 * 5000 \text{ gr}$$

$\begin{aligned} \text{Masa} \\ = 4750 \text{ gr} \end{aligned}$

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

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

$$\text{Volumen de Suelo 5\%} = \frac{5000 \text{ gr} * 0.05}{2.08 \text{ gr/cm}^3}$$

$$\text{Volumen de Suelo 5\%} = 120.192 \text{ cm}^3$$

Con la densidad del Polietileno de Tereftalato igual a 1.209 gr/cm³ y el volumen a suplir igual a 120.192 cm³ calculamos la cantidad de masa de PET utilizado.

$$\text{Masa de PET} = \text{Densidad} * \text{Volumen}$$

$$\text{Masa de PET} = 1.209 \text{ gr/cm}^3 * 120.192 \text{ cm}^3$$

$\begin{aligned} \text{Masa de PET} \\ = 145.31 \text{ gr} \end{aligned}$
