

**MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES DE SUELO LIMOSO CON PLÁSTICO
PET MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**FERMÍN DARÍO QUINTANILLA VIVIESCAS
JENNIFFER CAUSIL RIBÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

**MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES DE SUELO LIMOSO CON PLÁSTICO
PET MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO**

**FERMÍN DARÍO QUINTANILLA VIVIESCAS
JENNIFFER CAUSIL RIBÓN**

Trabajo de grado presentado para optar por el título Ingeniero Civil

**Director:
Luis Alberto Capacho Silva
MsC. en Informática**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

“Primeramente agradezco a DIOS por todo lo sucedido en mi vida incluyendo aún las situaciones difíciles de las cuales he ido formando mi carácter, le agradezco por la salud, su respaldo en cada instante de mi vida y por todas las maravillas que ha creado que me permite disfrutarlas día a día. Agradezco a mis padres LUZ MARINA RIBÓN CASTRO Y YESSÍN ELIÉCER CAUSIL BETÍN por ser mi apoyo incondicional, por sus consejos, su ejemplo, principios inculcados con los he crecido y por su amor de ternura y de disciplina que hoy en día me permite ser una mujer con criterio. Agradezco a mis familiares y amigos por permitirme aprender de ellos cada día y por ser mi compañía en las diferentes etapas de mi vida. Agradezco a ROBINSON ZULUAGA RAMÍREZ quien fue una pieza clave a lo largo de mi vida y mi carrera, quien estuvo siempre con aliento de motivación en los momentos buenos y no tan buenos. Aun así en mi peor estado de ánimo, fue de gran apoyo para mí.”

Jénniffer Causil Ribón

Ante todo, gracias a dios, el que me permite culminar con este logro de vida y que personalmente me enorgullece.

Agradezco a mis padres MARIA VIVIESCAS GOMEZ y FERMIN QUINTANILLA quienes fueron los pilares principales para que esto se hiciera realidad. Por su entrega y esfuerzo que me permitieron a mi y a mis hermanos desarrollar una carrera universitaria.

A mis hermanos VERONICA AURORA Y JESUS DAVID por su comprensión y apoyo a lo largo de este proyecto de vida.

A mis compañeros, amigos y familiares que hicieron de esta travesía algo muy especial e imposible de olvidar.

Fermín Darío Quintanilla Viviescas

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO CONCEPTUAL	17
1.1 SUELO LIMOSO	17
1.2 NORMAS PARA CARACTERIZAR EL SUELO LIMOSO	18
1.3 POLIETILENO DE TEREFALATO (PET).....	18
1.3.1 Propiedades del PET	19
2. METODOLOGÍA	21
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	21
2.1.1 Análisis granulométrico.....	21
2.1.2 Límites de atterberg e índice de plasticidad.....	22
2.1.3 Gravedad específica del suelo.....	25
2.1.4 Ensayo de proctor modificado.....	26
2.1.5 Tereftalato de polietileno.....	27
2.1.6 Análisis granulométrico del PET.	27
2.1.7 Gravedad específica del PET.	28
2.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS.....	29
2.2.1 Recálculo del número de golpes.....	29
2.2.2 Probeta patrón de suelo limoso.	30
2.2.3 Probetas de suelo limoso y PET bajo tratamiento térmico.....	31
2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR RESISTENCIA.....	33
2.3.1 Compresión inconfiada.	33
2.3.2 Ensayo de corte directo.	35
2.3.3 Ensayo triaxial estático.	36
2.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	38
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	40

3.1 COMPRESIÓN INCONFINADA.....	40
3.1.1 Probetas patrón de suelo limoso inalterado.....	41
3.1.2 Probetas de suelo limoso y PET.....	42
3.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO	48
3.3 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO	52
3.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	57
4. CONCLUSIONES	59
5. RECOMENDACIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62
ANEXOS.....	64

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Carta de Plasticidad de Clasificación SUCS.....	25

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva de Compactación.	27
Gráfica 2. Carga Vs % PET (4 horas)	43
Gráfica 3. Carga Vs % PET. (6 horas)	44
Gráfica 4. Carga VS Tiempo	46
Gráfica 5. Comparación de probeta patrón Vs Probeta suelo-PET	47
Gráfica 6. Comparación de Esfuerzo cortante Vs deformación de las diferentes cargas normales.	51
Gráfica 7. Envolvente de falla ensayo Corte directo.	52
Gráfica 8. Comportamiento deformación Vs Esfuerzo desviador. Presión de confinamiento=100 kPa	54
Gráfica 9. Comportamiento deformación Vs Esfuerzo Normal. P. confinamiento=100 Kpa	55
Gráfica 10. Círculo de Mohr	56

LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 1. Suelo limoso	17
Imagen 2. Tereftalato de polietileno triturado	19
Imagen 3. Molde de trabajo para la elaboración de probetas	29
Imagen 4. Probeta patrón	30
Imagen 5. Probetas de suelo limoso y PET	31
Imagen 6. Máquina de compresión inconfiada.....	34
Imagen 7. Deformímetro	34
Imagen 8. Quorum 150ES	38
Imagen 9. Microscopio Electrónico de Barrido FEG Quanta 650.....	39
Imagen 10. Probetas con PET crudo	40
Imagen 11. Probetas con PET quemado	41
Imagen 12. Probetas suelo limoso y PET.	42
Imagen 13. Muestra de PET-suelo	58
Imagen 14. Partículas de suelo en la red de PET fluido	58

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A: Procedimiento de ensayo de GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO. INV E 128-13	64
Anexo B: Procedimiento de ensayo de proctor modificado.....	67
Anexo C: Procedimiento para determinar la gravedad específica del pet(terftalato de polietileno).....	72
Anexo D: Procedimiento de elaboración de probetas	75
Anexo E: Recálculo de número de golpes y cálculo de energía de compactación	77
Anexo F: Procedimiento para determinar las dosificaciones de suelo limoso y pET.	78
Anexo G: Procedimiento ensayo corte directo.	83
Anexo H: Procedimiento de ensayo triaxial estático	88
Anexo I: Microscopía electrónica de barrido	91

RESUMEN

TÍTULO: MEJORAMIENTO DE SUBRASANTES DE SUELO LIMOSO CON PLÁSTICO PET MEDIANTE TRATAMIENTO TÉRMICO *

AUTORES: FERMÍN DARÍO QUINTANILLA VIVIESCAS
JENNIFFER CAUSIL RIBÓN **

PALABRAS CLAVE: Polietileno de Tereftalato (PET), suelo limoso.

DESCRIPCIÓN:

La presente investigación se basa en determinar una dosificación óptima de plástico reciclado (PET) en un suelo limoso bajo tratamiento térmico, para mejorar la resistencia del suelo y de esta forma presentar una posible alternativa de uso para el mejoramiento de subrasantes. El propósito es ocupar los espacios vacíos y de agua de la muestra de suelo limoso por material reciclado PET a una temperatura determinada que lo lleve a su fluidez. El PET se adicionará porcentualmente a la muestra mediante elaboración de probetas que se llevarán a prueba de carga bajo el ensayo de compresión inconfiada. Cabe aclarar que las dosificaciones de cada material se realizarán de forma volumétrica y con rangos determinados a partir de un 30% hasta un 60%, aumentándolos en intervalos de 5%. Posteriormente; se hará otro procedimiento para caracterizar la subrasante mejorada con PET mediante el ensayo triaxial estático en condición consolidado-drenado. Los resultados finalmente se compararán con el comportamiento de una probeta patrón que no haya sido modificada con PET y, por último, se tomará una muestra de la probeta óptima para analizar su morfología mediante microscopía electrónica de barrido y también así observar cómo es la distribución entre partículas de los materiales que conforman el compuesto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva

ABSTRACT

TITLE: IMPROVEMENT OF LIMOSO FLOOR SUBRASANTS WITH PET PLASTIC THROUGH THERMAL TREATMENT *

AUTHORS: FERMÍN DARÍO QUINTANILLA VIVIESCAS
JENNIFFER CAUSIL RIBÓN **

KEYWORDS: Terrestrial Polyethylene (PET), silty soil

DESCRIPTION:

The present investigation is based on determining an optimal dosage of recycled plastic (PET) in a silty soil under heat treatment, to improve the resistance of the soil and in this way present a possible alternative of use for the improvement of subgrants. The purpose is to occupy the empty and water spaces of the sample of silty soil by PET recycled material at a certain temperature that will lead to its fluidity. The PET will be added in percentage to the sample by making probes that will perform a load test under the unconfined compression test. It should be clarified that the dosages of each material are made volumetrically and with specific ranges from 30% to 60%, increasing them in 5% intervals. Later; another procedure will be done to characterize the improved sub-grade with PET by means of the static triaxial test in a consolidated-drained condition. The results will finally be compared with the behavior of a standard probe that has not been modified with PET and, finally, a sample of the optimal probe will be taken to analyze its morphology by scanning electron microscopy and also detect how the distribution between particles of the materials that make up the compound.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva

INTRODUCCIÓN

Actualmente el tema de tratamiento de la contaminación ambiental ha tenido gran auge debido a las consecuencias graves que se han estado presentando como el calentamiento global, desbordamiento de las fuentes hídricas por taponamientos, mortandad de seres vivos¹, entre otras; y una de las principales causas que ha llevado a estos hechos es la gran producción de plásticos que se ha venido generando y aumentando drásticamente por su alta demanda, pero el proceso de reutilización ha sido lento.

El plástico más producido en la industria es el PET (tereftalato de polietileno), el cual es un polímero utilizado para la elaboración de envases de bebidas, alimentos y fibras textiles, perteneciente al grupo de poliésteres con condensación termoplástica² y se caracteriza por tener alto grado de cristalinidad, resistencia mecánica a la compresión, al desgaste y a los productos químicos³.

Este problema ha llevado a organizaciones a plantear soluciones de sostenibilidad para mitigar el impacto ambiental que estos elementos producen, sin embargo, son muy pocas las empresas que han implementado los complejos procesos que se requieren para llevarlo de nuevo a su estado inicial, por su alto costo; por lo tanto, sigue siendo muy significativa la diferencia de producción-reciclaje.

¹ REVISTA SEMANA SOSTENIBLE. PET un plástico amigable pero no inofensivo. Visto en línea: <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/plastico-pet-un-amigable-pero-no-inofensivo/36282>

² CLUB ENSAYOS. Productos PET. Visto en línea: <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Productos-Pet/81965.html>

³ ROMÁN GARCÍA, Elvira. RECICLAJE. Visto en línea: <https://www.uv.mx/orizaba/cosustenta/files/2014/05/RECICLAJE-Elvira-Roman.pdf>

Pero debido a tal problema, se sigue trabajando para aportar en gran manera al medio ambiente. Uno de los campos en los que se está implementado su reutilización es el ámbito ingenieril en los procesos constructivos, principalmente en proyectos de infraestructura, es por esto que se llegó a esta investigación, en la cual se busca plantear una alternativa de mejoramiento de sub-rasante de vías reutilizando dicho material (PET). Cabe aclarar que en todo tipo de obra se busca que brinde seguridad, comodidad y tenga la mayor eficiencia posible, en lo que esta investigación aportaría, debido a que se espera que, al ser tomado un material reciclado de alternativa de implementación, reduzca costos de construcción y mantenimiento por las propiedades que brinda.

El enfoque es mezclar un suelo limoso con el material reciclado PET y someterlo a tratamiento térmico con el fin de que este al llegar a su fluidez, ocupe los espacios vacíos del suelo y así mejore las condiciones de resistencia. Para llevarlo a cabo se realizarán probetas con distintos porcentajes de PET y distintos tiempos a una temperatura fija, las cuales se llevarán a prueba bajo el ensayo de comprensión inconfina para determinar el porcentaje óptimo y a partir de ahí ser comparada con una probeta inalterada de suelo limoso y otra con el porcentaje óptimo mediante el ensayo triaxial estático; lo que permitirá determinar la mejor alternativa. En este caso el material reciclado PET se considera como un aditivo que aporta durabilidad, capacidad de soporte ante cargas sísmicas y estáticas, disminuye asentamientos y reduce permeabilidad⁴.

⁴ ASPECTOS POSITIVOS DEL USO DEL PET. PDF. Página 3. Visto en línea: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/15405/ANEXO%201-PET.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1 SUELO LIMOSO

El suelo limoso es un tipo de suelo proveniente de los procesos de sedimentación de materiales muy finos, están compuestos por partículas pequeñas que varían entre los 0,002 mm a 0,05 mm y presentan una textura suave al tacto en estado seco⁵. En campo se reconocen por su fácil maleabilidad (permite realizar bolas que se desagregan fácilmente). Se caracterizan por ser buenos en cuanto a retención de nutrientes y retención de agua, por ello, se considera uno de los suelos más fértiles, pero en estado seco se pulverizan⁶.

El suelo limoso es un suelo pedregoso, de color marrón oscuro, es un suelo rico en nutrientes debido a que la materia orgánica se descompone rápidamente, por lo tanto, es un suelo muy fértil, tiene gran permeabilidad, y es un suelo compacto⁷.

Imagen 1. Suelo limoso



⁵ GÓMEZ MAQUERA, Thalia Maribel. Clasificación de suelos. 2016. Visto en línea: <https://prezi.com/4eawqd9c0gjj/clasificacion-de-suelos/>

⁶ SUELOS LIMOSOS. Tendencia. Revista digital en español. Visto en línea: https://tendencias.com/eco/tipos-de-suelos/#/Suelos_limosos<http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=6329>

⁷ RODRÍGUEZ, Daniela. Suelo limoso, caracterización y usos. Visto en línea: <https://www.lifeder.com/suelo-limoso/>

Este suelo provino de la Universidad Industrial de Santander en la excavación realizada en el parqueadero de motos de la carrera 30 de la misma instalación.

1.2 NORMAS PARA CARACTERIZAR EL SUELO LIMOSO

La caracterización del suelo se realizó mediante pruebas de laboratorio basados en las normas propuestas por el Instituto Nacional de Vías haciendo ensayos de granulometría (*INV. E- 213-13*), límites de Atterberg (Límite líquido *INV E-125-13*, plástico e índice de plasticidad *INV E-128-13*), determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos (*INV 128-13*), ensayo modificado de compactación (*INV E-142-13*).

1.3 POLIETILENO DE TEREFALATO (PET)

El PET es un material polimérico derivado de dos materias del petróleo (Etileno y paraxileno). Es ampliamente utilizado en la industria principalmente en la fabricación de botellas para bebidas ya que se caracteriza por su alto grado cristalinidad y además se considera un material con buena resistencia química y térmica. Es uno de los polímeros que más se está empezando a reciclar por su alta producción y por ende es fácil la obtención en sus diferentes estados de post-consumo⁸, como lo es el de esta investigación (reciclado triturado).

⁸ HERRERA RESÉNDIZ, Juan Roberto y ESTRADA MONJE, Anayansi. Depolimerización de botellas de poli (tereftalato de etileno) (pet) post- consumo mediante glicosis.i..efecto del catalizador y del tipo de glicol. Volumen 13(3). 2012. Visto en línea: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/JUL12/herrera.pdf>

El uso del PET se clasifica según el peso molecular y el grado de cristalinidad. Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, de mayor peso molecular, grado ingeniería⁹.

Hoy en día este tipo de poliéster (grado ingeniería) se está implementando tanto por el cuidado del medio ambiente como por el aprovechamiento de las propiedades que puede aportar en el ámbito ingenieril en los procesos constructivos, las cuales se pueden observar a continuación.

Imagen 2. Tereftalato de polietileno triturado



1.3.1 Propiedades del PET

- Alta resistencia al desgaste y corrosión.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases.

⁹ SÁNCHEZ SIERRA, María y PAREDES QUIROGA, Pedro. Estudio de viabilidad técnica de la implementación del polietileno tereftalato como material para estabilización de taludes. Visto en línea:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1703/1/ESTUDIO%20DE%20VIABILIDAD%20T%C3%89CNICA%20DE%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20POLIETILENO%20TEREFTALATO%20COMO%20MATERIAL%20PARA%20ESTABILIZACI%C3%93N%20DE%20TALUD~1.pdf>

- Reciclable y maleable.
- Es muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Mezclado con suelo mediante tratamiento térmico, disminuye asentamientos ante eventuales cargas dinámicas y/o estáticas, aumenta la resistencia al corte y reduce la permeabilidad.
- Buena resistencia a la fatiga
- Buen comportamiento como aislante térmico¹⁰

¹⁰ ÁLVAREZ PABÓN, Jorge A. ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES. Colombia. Página 58. Visto en línea:
http://anfacal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estab.Doc.Colombiano,varios%20insumos,Cal.2010-F_Upload.pdf

2. METODOLOGÍA

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

SUELO LIMOSO

2.1.1 Análisis granulométrico. El ensayo granulométrico es el ensayo mediante el cual se separan las partículas de suelo (grava, arena y finos) para determinar cuantitativamente el tamaño de las mismas. Este proceso se realiza por medio de tamices de abertura cuadrada.

Para realizarlo, primeramente, se tomó una muestra de 1000 gramos de suelo, la cual fue lavada y secada al horno. Seguidamente se tomó el peso de dicha muestra de la que resultó un peso final de 503.4 gramos al cual se le hizo el procedimiento de vibración con los tamices ubicados progresivamente decreciente.

Tabla 1. Granulometría

Peso inicial: 1000 g			Peso final: 503.40 g		
# Tamiz	Tamiz. mm	Peso (g)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
4	4.76	32.7	3.3%	3.3%	96.7%
10	2.00	10.5	1.1%	4.3%	95.7%
20	0.84	56.0	5.6%	9.9%	90.1%
40	0.42	11.4	1.1%	11.1%	88.9%
60	0.25	99.4	9.9%	21.0%	79.0%
80	0.18	65.5	6.6%	27.6%	72.5%
100	0.15	33.7	3.4%	30.9%	69.1%
200	0.07	141.6	14.2%	45.1%	54.9%
Pasa 200		548.8	54.9%	100.0%	0.0%
Total		999.6			

Gravas	3.3%
Arenas	41.8%
Finos	54.9%

Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) para caracterizarse como suelo fino debe pasar por el tamiz No 200 más del 50% (**Tabla N°1**). Cumpliendo con ello, se procede a la realización de ensayos de límites de Atterberg para comprobar que sea suelo limoso.

2.1.2 Límites de atterberg e índice de plasticidad. Atterberg definió los límites de consistencia en los suelos finos para caracterizar su comportamiento de acuerdo a su estado de saturación y así ser clasificado como arcilla o limos bajo el Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

En este estudio se realizó el ensayo de límite líquido y límite plástico, para luego determinar el índice de plasticidad del que me resultaría la clasificación del suelo según la carta de plasticidad planteada en dicho sistema.

El límite líquido se define como el porcentaje de humedad límite requerido en el suelo secado en el horno, antes de que el suelo se vuelva a un estado líquido.

El Límite plástico es el porcentaje de humedad que permite que el suelo permanezca en estado plástico.

El índice de plasticidad es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico. Este índice corresponde a la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico del suelo.

Para llevar a cabo el ensayo de límites de Atterberg, se tomaron 200 gramos de suelo pasado por el tamiz N. 40; se empezó realizando el límite plástico, debido a que si el suelo húmedo no dejaba formar los rollos establecidos por la norma *INV E-126-13* de límite plástico, por obvias razones sería un suelo arenoso. Entonces, primeramente, se tomó una muestra de 20 gramos de suelo, a la que se le fue agregando agua con el fin de que el suelo permitiera hacer los rollos. Para hacerlos, se fue dividiendo en pequeñas porciones, las cuales iban siendo amasadas para formar un rollo de aproximadamente 3 mm de diámetro y que alrededor de dos minutos formara grietas. Después de varios intentos, se logró dicho fin y se tomaron dos muestras cuyos resultados se pueden observar en la **Tabla N° 2**. De estas se tomaron datos de peso húmedo y seco con recipiente y sin él, para obtener el porcentaje de humedad del suelo. Seguidamente se procedió a realizar el ensayo de límite líquido con la cazuela de Casa Grande según la norma *INV E-125-13* (**Tabla N° 3**), en la cual se tomó el suelo y se le agregó agua hasta formar una pasta consistente, con el fin de que al asentar el espécimen en la base y enrazarla de tal forma que quedara una superficie plana (con profundidad de 10 mm aproximadamente en el punto máximo de su espesor), se realizara una ranura dividiendo la muestra en dos partes, se dejó caer varias veces la muestra sobre la base girando la manivela de la cazuela (a una velocidad de 2 revoluciones por segundo), hasta que dichos lados se juntaran de nuevo en cualquiera de sus partes a una distancia de 13 mm.

Así se realizó el procedimiento varias veces hasta que esto fuera posible.

Según la norma, por tratarse de un tipo de suelo fino, el rango de número de golpes debía estar entre 25-35, 20-30 y 15-25. De aquí se anotó el número de golpes necesario para lograr dicha distancia (13 mm) y se tomó la muestra de la parte donde primero fue alcanzada esta. Dicha muestra se pesó y fue llevada al horno. Luego de esto, se pesó en estado seco y así se repitió el proceso hasta tener las muestras de los tres rangos de golpes establecidos con sus respectivos porcentajes

de humedad. Para determinar el límite líquido se graficó dichos porcentajes versus número de golpes, y por medio de regresión lineal se determinó el valor, el cual es el porcentaje de humedad a los 25 golpes exactamente. Teniendo ya el límite líquido y el índice de plasticidad, se va a la carta de plasticidad de clasificación SUCS (**Figura N° 1**), la cual indicó que es un suelo limoso ya que el índice de plasticidad debe estar aproximadamente entre 0-10 (**Tabla N° 4**), por lo tanto, es correcto afirmar que el suelo de trabajo en esta investigación es un suelo limoso.

Tabla 2. Ensayo Límite Plástico

LÍMITE PLÁSTICO*		
Recipiente No.	1	2
Prw (g)	10.50	9.90
Prs (g)	10.05	9.50
Pr (g)	8.20	7.90
P _w (g)	0.45	0.40
P _s (g)	1.85	1.60
W%	24.32	25.00

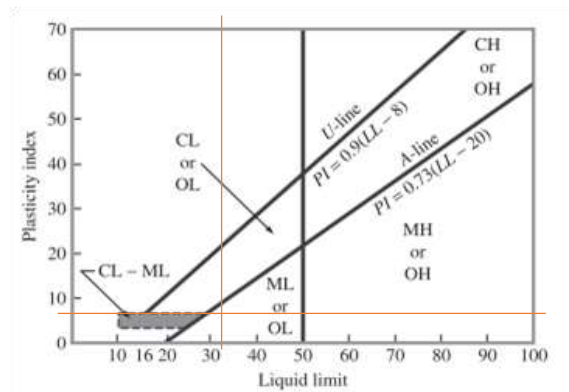
Tabla 3. Ensayo Límite Líquido

LÍMITE LÍQUIDO				
Número de Golpes	35	25	20	15
Recipiente No.	3	2	1	29
Prw (g)	19.4	21	22.1	23.2
Prs (g)	16.8	17.7	18.4	19
Pr (g)	8.2	8.1	8.2	8.2
P _w (g)	2.60	3.30	3.70	4.20
P _s (g)	8.60	9.60	10.20	10.80
W%	30.23	34.38	36.27	38.89

Tabla 4. Límites de Atterberg e índice de plasticidad.

RESULTADOS	
Límite Líquido	33.9%
Límite Plástico	24.7%
Índice de plasticidad	9.3%

Figura 1. Carta de Plasticidad de Clasificación SUCS



Corroborando con la **Figura N° 1**, es correcto afirmar que el suelo se caracteriza como un limo de baja plasticidad (ML).

2.1.3 Gravedad específica del suelo. La gravedad específica es la relación de peso de un cierto volumen de solidos al aire respecto al peso de agua destilada a una temperatura dada. Este procedimiento se realizó según la norma *INV 128-13*.

Tabla 5. Gravedad específica del suelo

Peso del Frasco + Agua hasta la marca, en el Aire	652.9	Gramos
Peso de la Muestra en condición S.S.S, en el aire	500	Gramos
Peso de la muestra + Frasco y Agua hasta la marca, en el Aire	933.7	Gramos

Peso de la muestra secada al Horno	435.7	Gramos
------------------------------------	-------	--------

Gravedad específica real	2.81
Gravedad específica aparente	1.99
Gravedad específica aparente S.S.S	2.281

NOTA: Ver Anexo A

2.1.4 Ensayo de proctor modificado. El ensayo de Proctor modificado se realizó con el fin de determinar la humedad óptima que produciría el máximo peso específico seco del suelo (densidad seca máxima) en el proceso de compactación, con una energía determinada. El método que se utilizó fue el método A del Instituto Nacional de Vías (*INV E 142-07*), en el cual se tiene un molde de diámetro 102 mm (4") y gran porcentaje del material de suelo pasa por el tamiz 4.75 mm (No 4).

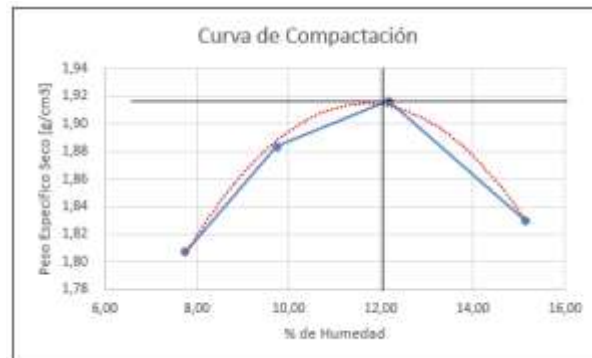
Tabla 6. Parámetros requeridos para el ensayo de Proctor modificado según *INV E-142-07-método A*.

Número de Capas	5
Número de Golpes por Capa	25
Diámetro del Molde (cm)	10.16
Altura del Molde (cm)	11.63
Volumen del Molde (cm ³)	943
Peso del martillo (Kg)	4.54
Altura de caída del martillo(cm)	45.72
Energía de compactación(Kg-cm/ cm ³)	27

NOTA: Ver Anexo B

A partir de este ensayo, se construye la curva de compactación con los resultados obtenidos, de la cual se extrae el valor de la humedad óptima que me produciría el peso específico máximo del suelo. (**Gráfica N°1**)

Gráfica 1. Curva de Compactación.



Densidad seca máxima = 1.92 g/cm³

Humedad Óptima $\cong$ 12 %

2.1.5 Tereftalato de polietileno. Para la caracterización del PET se realizó análisis granulométrico y gravedad específica.

2.1.6 Análisis granulométrico del PET. Para el análisis granulométrico se utilizaron 500 gramos de PET. Los resultados obtenidos, se presentan a continuación.

Tabla 7. Granulometría del PET

Peso inicial: 500 g			Peso final: - g		
# Tamiz	Tamiz. (mm)	Peso (g)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
4	4.76	304.6	60.96	60.69	39.04
10	2	181.6	36.34	97.3	2.7
20	0.84	11.6	2.32	99.62	0.38

Peso inicial: 500 g			Peso final: - g		
# Tamiz	Tamiz. (mm)	Peso (g)	% Reten.	% Ret.Acum	% Pasa
40	0.42	1.9	0.38	100	0
Total		499.7	100		

Las partículas del PET triturado de trabajo se caracterizan por tener color transparente, forma poligonal, caras aplanadas y el tamaño que más predomina en sus partículas es de 4.76 mm aproximadamente.

2.1.7 Gravedad específica del PET. Este ensayo se realiza con el fin de determinar la gravedad específica del PET, bajo el método B indicado por la norma *INV E 128-13*; la cual permite calcular la densidad del material para luego determinar el porcentaje de dosificación en la mezcla.

Tabla 8. Gravedad específica del PET

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	653.3	Gramos
Peso de la Muestra (En el Aire)	100	Gramos
Peso de la muestra + Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)	675.2	Gramos
Peso de la Muestra Seca	91.5	Gramos

Gravedad específica real	1.315
Gravedad específica aparente	1.172
Gravedad específica aparente S.S.S	1.28

NOTA: Ver Anexo C

2.2 ELABORACIÓN DE PROBETAS

Para realizar este estudio, se hizo necesaria la elaboración de probetas, las cuales debían ir contenidas en un molde para llevar a cabo el debido proceso de compactación y tratamiento térmico. Este molde hecho en acero 1040 consta de tener forma cilíndrica con las siguientes dimensiones:

Diámetro: 5.08 cm

Altura: 10.4 cm

La relación de sus dimensiones son 2:1, es decir, la altura es dos veces su diámetro.

Para este molde fue necesario la colocación de un anillo de extensión para lograr enrazarla y darle una mejor compactación en la última capa.

Por cada dosificación de PET con su respectivo tiempo se realizaron tres probetas e igualmente para la elaboración de la probeta patrón.

Imagen 3. Molde de trabajo para la elaboración de probetas



NOTA: Ver anexo D

2.2.1 Recálculo del número de golpes. Para el proceso de compactación de la mezcla en el ensayo de Proctor modificado se hizo necesario recalcular el número

de golpes para elaborar las probetas, debido a que el dimensionamiento del molde de trabajo es diferente al nombrado en el método A de la norma *INV E 142-07*.

Para este cálculo se tomó la misma energía de compactación y el mismo número de capas definido por norma (**Tabla N°6**), pero con un martillo y volumen distinto debido al dimensionamiento (altura y diámetro) del nuevo molde de trabajo.

Tabla 9. Parámetros requeridos para el ensayo de Proctor modificado con el molde de trabajo

Número de capas	5
Número de golpes por capa	8
Diámetro del molde (cm)	5.08
Altura del molde (cm)	10.4
Volumen del molde (cm ³)	204.2
Peso del martillo (Kg)	2.6
Altura de caída del martillo(cm)	56
Energía de compactación(Kg-cm/cm ³)	27

NOTA: Ver anexo E

2.2.2 Probeta patrón de suelo limoso. Las probetas de suelo limoso se elaboraron con el fin de tener un patrón de comparación que permitiera diferenciar el comportamiento del suelo con el aditivo (plástico reciclado PET); y de esta forma poder concluir y mirar la factibilidad de que esta sea o no, una alternativa de uso para mejorar su resistencia según los resultados arrojados.

Imagen 4. Probeta patrón



2.2.3 Probetas de suelo limoso y PET bajo tratamiento térmico. Este tipo de probetas se realizaron entre un rango de porcentajes de 30% a 60% aumentándolo cada 5% de contenido de PET en la mezcla de suelo. La cantidad de material se calculó por medio de volúmenes teniendo en cuenta sus densidades. Para el tiempo de cocción en el horno se consideró un tiempo representativo de 4h y 6h determinado del rango de tiempo que soporta la mezcla al ser expuesta a elevadas temperaturas.

Imagen 5. Probetas de suelo limoso y PET



DOSIFICACIÓN GENERAL DE PROBETAS

Partiendo de los resultados de Proctor modificado y gravedad específica realizados a los materiales de suelo y PET, se obtuvieron los siguientes valores, que serán clave a la hora de la dosificación de mezcla:

Tabla N° 10. Características de PET y suelo Limoso

Densidad del suelo limoso (g/ cm ³)	1,92
--	------

Densidad del PET (g/ cm ³)	1,28
% humedad óptima	12
Relación: Densidad suelo/ Densidad PET	1,5

A partir de estos valores (**Tabla N° 10**) se determinaron las proporciones de cada material en la mezcla. Por cada porcentaje se realizaron tres probetas calculando de la siguiente forma sus dosificaciones.

$$Ms = \rho_s * Vol * (1 - \%PET) * FM * No.probetas$$

Donde:

Ms = Masa de suelo [gr]

ρ_s = Densidad del suelo limoso [gr/ cm³]

Vol= Volumen del molde de trabajo [cm³]

FM= 1.2 Factor de mayoración

NOTA: La cantidad de suelo limoso calculada para cada porcentaje, complementa todo lo relacionado con la compactación del anillo de extensión y el material que se pierde en este proceso (desperdicio y compactación del anillo de extensión).

$$Cantidad\ de\ PET = \frac{Ms * \% PET}{\frac{\rho_s}{\rho_{PET}} * (1 - \% PET)}$$

NOTA: Ver anexo F

Tabla N° 11. Dosificaciones generales para tres probetas

% PET	Masa de suelo [g]	Masa de PET [g]	Cantidad de Agua [ml]
25%	1100	244,4	161,3

30%	1000	285,7	154,3
35%	930	333,8	151,7
40%	860	382,2	149,1
45%	800	436,4	148,4
50%	730	486,7	146,0
55%	660	537,8	143,7
60%	600	600,0	144,0

NOTA: En el desarrollo del estudio se observa el valor óptimo de PET, el cual justifica el cálculo necesario del 25%.

2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR RESISTENCIA.

Los ensayos realizados tanto a la probeta patrón como a la mezcla suelo-PET fueron: compresión inconfiada (*INV E-152-13*), para determinar la resistencia a la compresión, ensayo triaxial estático (*INV E 153-07*) y corte directo (*INV E-154-07*), con el fin de determinar la resistencia al cortante y hacer la comparación necesaria para concluir la afectación del material aditivo al suelo, conteniendo el porcentaje óptimo obtenido.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

2.3.1 Compresión inconfiada. El objetivo de este ensayo es calcular la resistencia a la compresión de la mezcla de suelo con el PET en los diferentes tiempos en el horno y los diferentes porcentajes realizados, aplicando una carga axial a las probetas formadas por dicha mezcla luego de haber sido sometidas a tratamiento térmico, para así determinar su resistencia y de igual forma el valor óptimo de PET.

Imagen 6. Máquina de compresión inconfiada.



VELOCIDAD DE CARGA

La carga axial aplicada por la máquina de compresión inconfiada (**Imagen N° 6**) se programó con el fin de que se produjera la falla a una velocidad de 0.048 mm/seg. Para programar tal velocidad fue necesario un deformímetro y un cronómetro y se calculó tomando el tiempo que tardaba en dar una vuelta.

En el deformímetro cada línea representa 0.001 pulgadas y la vuelta completa cien líneas. Simultáneamente se tomó el tiempo que demoró en dar una vuelta (en este caso, aproximadamente 53 segundos) y se repitió el procedimiento en la segunda vuelta para comprobar que la velocidad fuera constante.

Imagen 7. Deformímetro



RESISTENCIA AL CORTANTE

Los ensayos utilizados para hallar la resistencia al cortante entre la probeta patrón y la probeta de suelo-PET fueron el ensayo triaxial (suelo-PET) y el ensayo de corte directo (suelo limoso inalterado) bajo las mismas condiciones, en este caso, consolidado-drenado, debido a que representa la condición más crítica en campo.

Para llevar a cabo estos ensayos se tuvo presente que los suelos finos plásticos se comportan en forma diferente a los suelos finos no plásticos, por lo tanto, su comportamiento a la resistencia es variable; en un extremo se comportan como arenas finas y en otro extremo como arcillas. Para tener en cuenta esta diferencia de comportamiento se propuso la clasificación de los suelos cohesivos utilizando el índice de cohesión. Si el índice de cohesión era cercano a cero, se trataba de un limo, mientras que si tenía un índice de cohesión mayor de 1 se trataba de una arcilla; lo que demostró que el suelo es limoso, como se puede observar a continuación.¹¹

$$\text{Índice de cohesión} = \frac{\text{índice de plasticidad}}{\text{límite plástico}}$$

$$\text{Índice de cohesión} = \frac{9.3}{24.7} = 0.38$$

2.3.2 Ensayo de corte directo. El ensayo de corte directo permite determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo (cohesión y fricción). En la medición de estos factores influye la relación de vacíos, presión de confinamiento y la velocidad de la aplicación de cargas¹².

¹¹ SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos-Análisis geotécnico. Resistencia al cortante. Capítulo 3. Pág 114.

¹² CRUZ VELAZCO, Lucio Gerardo. Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Universidad del Cauca-Facultad de Ingeniería Civil.

Para realizarlo, la muestra se coloca en una caja compuesta por dos anillos, uno superior y otro inferior, los cuales pueden desplazarse horizontalmente el uno con respecto al otro al aplicarse una fuerza de cortante. Las muestras no pueden saturarse completamente, pero se puede obtener un grado de saturación relativamente alto, sumergiendo la muestra en agua por un período largo de tiempo (2 horas), antes del ensayo, y finalmente, se procede a fallarla.¹³

Cabe anotar, que este ensayo arroja un resultado conservador; es por esto, que luego se realiza el ensayo triaxial estático para comparar (el valor a comparar es solo el de la probeta que tenga el porcentaje óptimo de PET en la mezcla con la probeta patrón, a la cual se le pretende mejorar las propiedades mecánicas).

NOTA: Ver anexo G

2.3.3 Ensayo triaxial estático. El ensayo triaxial en esta investigación se realizó con el fin de conocer los parámetros que permitirían determinar la resistencia al cortante de la mezcla óptima (cohesión y fricción).

Aquí se aplicó el método consolidado drenado (CD), colocando cargas de confinamiento (σ_3) y cargas axiales (σ_1) para mejor simulación de las condiciones reales de esfuerzos en campo. El objetivo de la fase de saturación del ensayo fue llenar todos los vacíos de la muestra con agua sin que se aplicaran esfuerzos indeseables a ella, por lo tanto se aplicó una velocidad baja (1 mm/min); y con la consolidación se buscó que la muestra alcanzara el equilibrio en un estado drenado, en el cual se determinaría el esfuerzo que llevaría a la falla.¹⁴

¹³ SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos-Análisis geotécnico. Resistencia al cortante. Capítulo 3- Pág 96.

¹⁴ PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL. Instituto Nacional de Vías (INV E-153-07)

En este ensayo se probaron las muestras cilíndricas dentro de una membrana delgada de caucho, colocándolas dentro de una celda triaxial con dos tapas rígidas y pistones arriba y abajo de la muestra.¹⁵

Para determinar la resistencia se utilizó el círculo de Mohr, el cual representa el estado de los esfuerzos en el momento de una falla al cortante. Este método utiliza la envolvente de falla, en la cual se representan puntos que corresponden a los esfuerzos que la producen.

La resistencia al corte es calculada de la siguiente forma:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante, es el esfuerzo que produce el sillazamiento en la muestra de suelo.

σ = Esfuerzo normal, es el esfuerzo aplicado perpendicularmente a la superficie de la muestra para generar una deformación vertical.

c : Cohesión, es una medida de adherencia entre las partículas de suelo.

ϕ = Ángulo de fricción del suelo, es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, depende del tipo de material, forma y tamaño de las partículas, organización y distribución de los granos, densidad, permeabilidad, presiones, entre otros.

NOTA: Ver anexo H

¹⁵ SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos-Análisis geotécnico. Resistencia al cortante. Capítulo 3-Pág 90.

2.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

La microscopía se hizo con el fin de estudiar la morfología de la mezcla suelo – PET, ya que los electrones permiten obtener imágenes de alta resolución y contraste, obteniendo detalles de cómo se adhieren las partículas de PET al suelo bajo tratamiento térmico. Para ello se utilizaron dos equipos: Quorum 150 ES (**Imagen N°8**) y el microscopio electrónico de barrido FEG Quanta 650 (**Imagen N° 9**).

- El Quorum 150 ES es el equipo mediante el cual se carboniza la muestra debido a que los materiales de la mezcla son materiales no conductivos y es necesario serlo para obtener las imágenes mediante el microscopio.

Imagen 8. Quorum 150ES



- El Microscopio FEG Quanta 650, es el equipo con el que se obtienen las imágenes mediante la tecnología de emisión de campo para la generación del haz de electrones. Este haz tiene una baja dispersión angular, el cual le permite producir imágenes de mayor resolución que los microscopios convencionales mediante detectores de electrones secundarios(SE), electrones retrodispersados (BSE) y electrones transmitidos (STEMI).¹⁶

¹⁶ FOLLETO DE LABORATORIO DE MICROSCOPIA LabMIC. Guatiguará, parque tecnológico. Universidad Industrial de Santander.

Imagen 9. Microscopio Electrónico de Barrido FEG Quanta 650



NOTA: Ver anexo I

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 COMPRESIÓN INCONFINADA

Las probetas de suelo-PET son el principal enfoque de esta investigación, cuyo propósito es estudiar el comportamiento del PET con el suelo limoso bajo tratamiento térmico. Primeramente, se establecieron porcentajes a estudiar entre un rango estimado del 30% al 60% de PET en la muestra, aumentándolo cada 2%. Pero, a medida que se iba realizando dicho proceso, se observó que cada 2% no variaba notablemente la consistencia en la mezcla ni el resultado físico de ella después de haber estado el mismo tiempo en el horno, por lo que se procedió a realizar dicho procedimiento aumentándolo a intervalos de 5%. El tiempo estimado inicialmente fue entre rangos de dos(2h) a doce(12h) horas en el horno para cada porcentaje, pero en el proceso de realización se notó que en un tiempo menor o igual a tres horas (3h) el PET aún no había logrado la fluidez (aún se podía observar en estado crudo) (*Imagen N° 10*) y después de 6 horas y media el PET ya estaba quemado (*Imagen N° 11*), por lo que se estableció finalmente el rango de tiempo entre tres horas y media a seis horas en el horno.

Imagen 10. Probetas con PET crudo



Imagen 11. Probetas con PET quemado



3.1.1 Probetas patrón de suelo limoso inalterado. Se sometieron al ensayo de compresión inconfiada tres probetas de suelo limoso inalterado con la humedad requerida, para obtener un valor de comparación con respecto a las probetas modificadas con PET. La resistencia a la compresión por cada una de ellas fueron las siguientes:

Tabla 10. Resistencia a la compresión de probetas patrón.

Probeta No.	Carga Axial
	(KN)
1	2.7
2	3.3
3	3.3

Carga axial promedio que soporta el suelo limoso
3.1 KN

Por ser el limo un tipo de suelo cohesivo se puede observar que presenta un comportamiento aceptable a la hora de ser solicitado ante cargas axiales, sin embargo, con esta investigación se desea mejorar dichas condiciones mediante el aditivo (PET).

3.1.2 Probetas de suelo limoso y PET. Son probetas conformadas por la mezcla de suelo y PET a una humedad determinada para ser llevadas a un tratamiento térmico en el horno.

Imagen 12. Probetas suelo limoso y PET.



En la **Imagen N° 12** se pudo observar que las probetas después de su tratamiento térmico resultaron tener características como gran porosidad, superficialmente débiles cuando el PET no llegaba a su fluidez y algunas con puntos diminutos blancos que representaban el PET quemado.

De los tres datos de resistencia obtenidos para cada porcentaje de PET, se tomó el promedio de las dos probetas que más se asemejaran en carga y así en cada dosificación para finalmente determinar el porcentaje óptimo. Como resultado de este ensayo se obtuvieron los siguientes valores de carga:

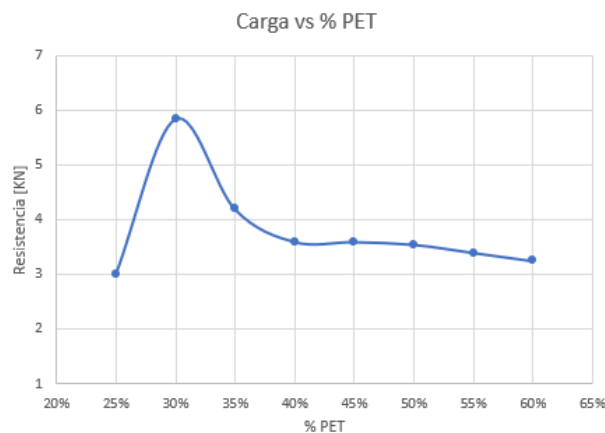
Tabla 11. Carga soportada de probetas con suelo y PET sometidas a tratamiento térmico.

Tiempo [h]	% PET	Carga soportada [KN]			Carga soportada [KN]
		probeta 1	probeta 2	probeta 3	
4	25%	2.9	3.1	3.6	3
	30%	4.7	5.9	5.8	5.85
	35%	4.2	4.2	3.7	4.2
	40%	3.9	3.3	3	3.6
	45%	3.9	3.4	3.3	3.6
	50%	3.6	3.5	3.4	3.55
	55%	3.4	3.6	3.4	3.4

Tiempo [h]	% PET	Carga soportada [KN]			Carga soportada [KN]
		probeta 1	probeta 2	probeta 3	
	60%	3.2	3.6	3.3	3.25
6	30%	3.9	3.5	3.5	3.5
	35%	2.3	1.7	2.8	2
	40%	2.5	2	1.9	1.95
	45%	quemadas	quemadas	quemadas	-

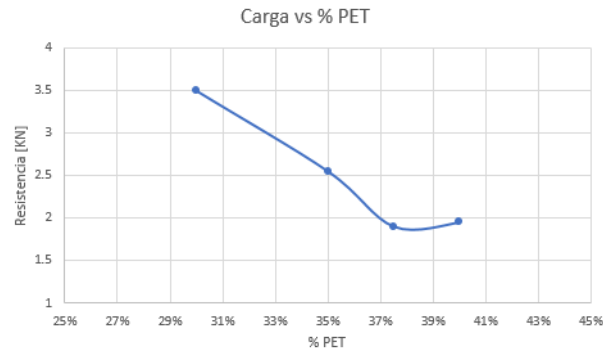
Representando estos resultados gráficamente (**Gráfica N° 2**), se puede observar el comportamiento de cómo varía la carga que soporta el material con respecto al porcentaje de PET en la mezcla sometida a cada tiempo en el horno.

Gráfica 2. Carga Vs % PET (4 horas)



Esta **Gráfica N° 2** muestra claramente una zona cóncava en donde se encuentra el valor máximo seguido por una segunda zona donde aparentemente tiende a mantenerse como función constante. Esa segunda zona muestra cómo independientemente del contenido de PET en la probeta su comportamiento a la compresión es casi igual, es decir, la resistencia es constante después de que el PET ha fluido.

Gráfica 3. Carga Vs % PET. (6 horas)



Los datos de 6 horas en el horno presentan una diferencia con respecto a 4 horas, no abarca todo el rango de porcentaje de PET establecidos, ya que tienden a quemarse cuando el porcentaje de PET supera el 40%.

La **Gráfica N° 3** intenta representar el mismo comportamiento que tuvo la probeta con 4 horas en diferentes porcentajes de PET, pero con una considerable reducción de resistencia y desfaseamiento en los porcentajes. Por esto, se deduce que el tiempo de 6 horas no representa una condición óptima de tiempo para la elaboración de probetas.

A partir de esto, se concluye que la resistencia máxima obtenida es el contenido del 30% del aditivo (PET) en la mezcla. Por este motivo, se ve reflejado en los cálculos el 25% de PET, debido a que la óptima resultó ser el rango inferior estimado inicialmente, por lo tanto, se procedió a estudiar el porcentaje inmediatamente anterior en el intervalo presupuestado para descartar que la óptima estuviera en un valor inferior.

PROBETAS DE SUELO LIMOSO Y 30% DE PET

Al concluir que el 30% es el porcentaje que representa la mayor resistencia, se procede a la realización de dichas probetas, pero variando su estadía en el horno con el fin de determinar la probeta óptima incluyendo ahora el tiempo.

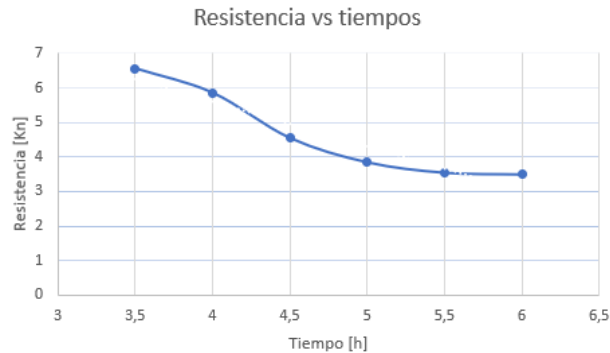
En medio del proceso de realización, se observó que el rango de tiempo en el cual el PET fluye dentro de la probeta y no se quema está entre [3 ½ h-6h] por lo que se decidió realizar probetas variando sus tiempos en intervalos de 30 minutos (3½h, 4h, 4½h, 5h, 5½h, 6h).

Tabla 12. Carga de Probetas con 30% de PET variando tiempos.

% PET	Tiempo [h]	Carga soportada [KN]			Carga soportada [KN]
		probeta 1	probeta 2	probeta 3	
30%	3	crudo	Crudo	Crudo	-
	3,5	3,9	6,2	6,9	6,55
	4	4,7	5,9	5,8	5,85
	4,5	3,7	4,7	4,4	4,55
	5	4,5	4	3,7	3,85
	5,5	2,8	3,4	3,7	3,55
	6	3,9	3,5	3,5	3,5

Representando gráficamente los resultados obtenidos de la compresión inconfiada (**Gráfica N° 4**), se puede observar el comportamiento de la variación de carga que soporta el material con respecto al tiempo de cocción.

Gráfica 4. Carga VS Tiempo



A partir de ello, se observa que el comportamiento de la mezcla una vez alcanzada la fluidez, es decreciente debido a que el PET al mantenerse más tiempo en el horno pierde resistencia.

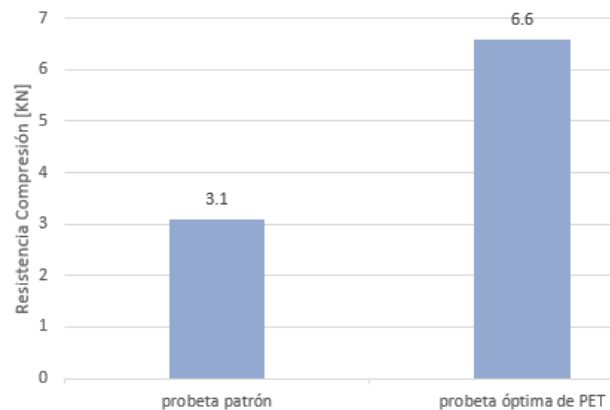
Un factor influyente en la pérdida de resistencia es el proceso de desencofrado, debido a que las probetas con mayor tiempo en el horno tendían a adherirse más a las paredes del molde, haciendo más complicado este procedimiento, lo que llevaba a usar un poco más de fuerza a la hora de ser extraídas del molde. Cabe anotar, que este proceso se realizó a fuerza debido a la carencia del equipo requerido para desencostrar correctamente.

En la **Gráfica N° 4** también se observa el valor de tiempo óptimo para la preparación del porcentaje de 30%. Este tiempo es 3 ½ horas, el cual fue el intervalo inferior de rangos de tiempos determinado, no pudiendo en este caso ser uno menor, debido a que la mezcla aún quedaba en estado crudo (**Imagen N° 10**). Por lo tanto, es correcto afirmar que la probeta óptima es la que contiene el 30% del material triturado PET sometida a un tratamiento térmico en el horno a 3½ horas.

PROBETAS DE SUELO-PET VERSUS PROBETA PATRÓN

Es necesaria la comparación entre probetas de solo suelo y la alterada con PET, debido a que es una forma que permite observar cómo cambian las propiedades del suelo inalterado con el suelo alterado con el material aditivo y a partir de ahí ver la viabilidad y factibilidad de presentar la alternativa de mejoramiento para subrasantes con los resultados arrojados en este estudio.

Gráfica 5. Comparación de probeta patrón Vs Probeta suelo-PET



Los resultados mediante el ensayo de compresión inconfiada arrojan que el suelo limoso soportó una carga axial de 3.1 KN, mientras que la probeta óptima con el material aditivo soportó una carga de 6.6 KN; lo que indica que sí mejora las condiciones de resistencia. Según estos datos lo mejora aproximadamente más de un 200%.

3.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Tabla 13. Esfuerzos cortantes y normales. Muestra con carga normal de 8 kg

CARGA NORMAL		8 Kg		
Lectura de deformación Horizontal	Lectura de Carga	Área corregida	Esfuerzo cortante	Esfuerzo Normal
mm	kg	cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
0.00	0.00	28.27	0.00	0.28
0.25	0.70	28.25	0.02	0.28
0.50	2.00	28.23	0.07	0.28
0.75	2.40	28.21	0.09	0.28
1.00	3.20	28.19	0.11	0.28
1.25	4.10	28.17	0.15	0.28
1.50	4.70	28.15	0.17	0.28
1.75	5.05	28.13	0.18	0.28
2.00	5.40	28.11	0.19	0.28
2.25	5.75	28.09	0.20	0.28
2.50	6.05	28.07	0.22	0.28
2.75	6.20	28.05	0.22	0.29
3.00	6.35	28.03	0.23	0.29
3.25	6.25	28.01	0.22	0.29
3.50	6.05	28.00	0.22	0.29
3.75	6.05	27.98	0.22	0.29
4.00	6.00	27.96	0.21	0.29
4.25	5.95	27.94	0.21	0.29
4.50	6.00	27.92	0.21	0.29
4.75	6.05	27.90	0.22	0.29
5.00	6.00	27.88	0.22	0.29
5.25	6.00	27.86	0.22	0.29
5.50	5.85	27.84	0.21	0.29
5.75	5.80	27.82	0.21	0.29
6.00	5.80	27.80	0.21	0.29
6.25	5.75	27.78	0.21	0.29
6.50	5.60	27.76	0.20	0.29

Tabla 14. Esfuerzos cortantes y normales. Muestra con carga normal de 16 kg

CARGA NORMAL		16 Kg		
Lectura deformación Horizontal	Lectura de Carga	Área corregida	Esfuerzo cortante	Esfuerzo Normal
mm	Kg	cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
0.00	0.00	28.27	0.00	0.57
0.25	14.80	28.25	0.52	0.57
0.50	21.15	28.23	0.75	0.57
0.75	19.00	28.21	0.67	0.57
1.00	15.35	28.19	0.54	0.57
1.25	13.00	28.17	0.46	0.57
1.50	9.50	28.15	0.34	0.57
1.75	9.10	28.13	0.32	0.57
2.00	9.15	28.11	0.33	0.57
2.25	9.25	28.09	0.33	0.57
2.50	9.25	28.07	0.33	0.57
2.75	9.25	28.05	0.33	0.57
3.00	9.05	28.03	0.32	0.57
3.25	9.00	28.01	0.32	0.57
3.50	9.00	28.00	0.32	0.57
3.75	9.00	27.98	0.32	0.57
4.00	8.85	27.96	0.32	0.57
4.25	8.75	27.94	0.31	0.57
4.50	8.65	27.92	0.31	0.57
4.75	8.40	27.90	0.30	0.57
5.00	8.30	27.88	0.30	0.57
5.25	8.30	27.86	0.30	0.57

Tabla 15. Esfuerzos cortantes y normales. Muestra con carga normal de 32 kg

CARGA NORMAL		32 Kg		
Lectura deformación Horizontal	Lectura de Carga	Área corregida	Esfuerzo cortante	Esfuerzo Normal
Mm	Kg	cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
0.00	0.00	28.27	0.00	1.13
0.25	15.30	28.25	0.54	1.13

CARGA NORMAL		32 Kg		
Lectura de deformación Horizontal	Lectura de Carga	Área corregida	Esfuerzo cortante	Esfuerzo Normal
Mm	Kg	cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
0.50	24.15	28.23	0.86	1.13
0.75	24.70	28.21	0.88	1.13
1.00	22.10	28.19	0.78	1.14
1.25	20.20	28.17	0.72	1.14
1.50	20.05	28.15	0.71	1.14
1.75	20.54	28.13	0.73	1.14
2.00	21.40	28.11	0.76	1.14
2.25	21.45	28.09	0.76	1.14
2.50	21.50	28.07	0.77	1.14
2.75	21.45	28.05	0.76	1.14
3.00	21.45	28.03	0.77	1.14
3.25	21.60	28.01	0.77	1.14
3.50	21.85	28.00	0.78	1.14
3.75	22.05	27.98	0.79	1.14
4.00	22.05	27.96	0.79	1.14
4.25	22.15	27.94	0.79	1.15
4.50	22.10	27.92	0.79	1.15
4.75	22.20	27.90	0.80	1.15
5.00	22.30	27.88	0.80	1.15
5.25	22.40	27.86	0.80	1.15
5.50	22.45	27.84	0.81	1.15
5.75	22.30	27.82	0.80	1.15
6.00	22.10	27.80	0.79	1.15
6.25	21.85	27.78	0.79	1.15
6.50	21.80	27.76	0.79	1.15
6.75	21.7	27.74	0.78	1.15
7.00	21.15	27.72	0.76	1.15
7.25	19.85	27.70	0.72	1.16
7.50	18.8	27.68	0.68	1.16
7.75	18.2	27.66	0.66	1.16
8.00	18.05	27.64	0.65	1.16

NOTA: Ver anexo G

Gráfica 6. Comparación de Esfuerzo cortante Vs deformación de las diferentes cargas normales.



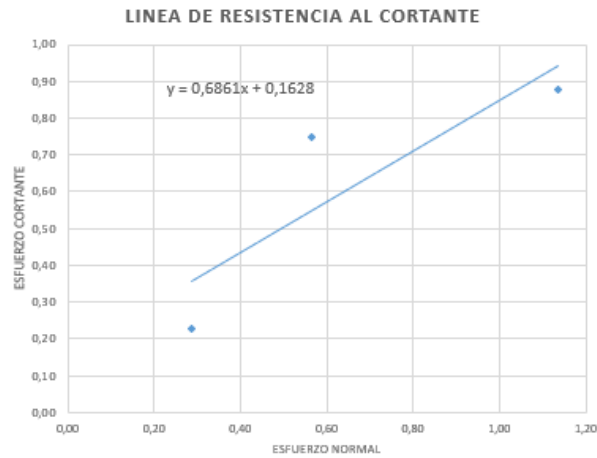
De cada muestra con sus diferentes cargas normales y lecturas tomadas, se toma la carga máxima registrada que determinará el esfuerzo cortante máximo, del mismo modo se toma el esfuerzo normal.

Tabla 16. Valores Máximos de cada muestra

Carga Normal	Carga horizontal	Esfuerzo cortante	Esfuerzo Normal
kg	kg	[kg/cm2]	[kg/cm2]
8.00	6.35	0.2265	0.2854
16.00	21.15	0.7492	0.5668
32.00	24.7	0.8755	1.1343

Se realiza un diagrama de esfuerzo normal Vs esfuerzo cortante que representa los puntos principales de la línea de resistencia al cortante. Para determinar la envolvente de falla se traza una línea de tendencia y se obtendrá su respectiva ecuación de movimiento.

Gráfica 7. Envolvente de falla ensayo Corte directo.



De la ecuación arrojada por la regresión lineal, se obtienen los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción (Φ) de la muestra.

La cohesión me representa el esfuerzo cortante donde en esfuerzo normal es cero y el ángulo de fricción la pendiente de la envolvente de falla.

$$C = 0.1628 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

$$C = 15.97 [kPa]$$

$$\tan \Phi = 0.6861$$

$$\Phi = 34.45^\circ$$

3.3 ENSAYO TRIAXIAL ESTÁTICO

De la basta y completa información de resultados que arroja el ensayo triaxial estático, se tomaron los valores más importantes para determinar los parámetros de la probeta suelo-PET.

Se ensayaron dos probetas con el porcentaje óptimo de PET (30%) variando la presión de confinamiento y dejando saturar la muestra a más del 85% durante largos periodos de tiempo.

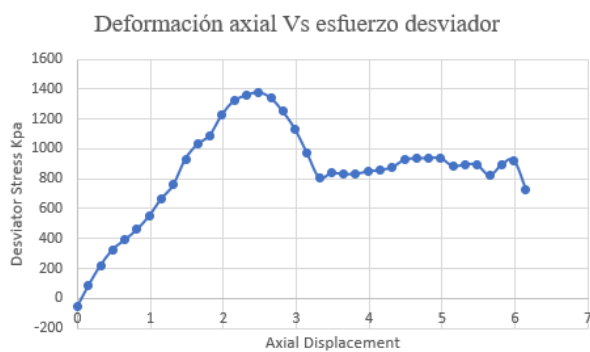
Tabla 17. Datos del ensayo Triaxial estático. Presión de confinamiento = 100 kPa

Desplazamiento axial	Esfuerzo desviador	Esfuerzo axial	Presión de poros
mm	kPa	kPa	kPa
0.00	-57.35	43.65	5.18
0.15	81.99	179.99	5.81
0.32	218.87	317.87	5.98
0.48	325.42	424.42	6.80
0.65	391.68	489.68	7.40
0.82	459.50	558.50	7.59
0.98	550.48	648.48	7.94
1.15	664.45	763.45	8.44
1.32	758.93	857.93	9.48
1.48	933.06	1032.06	10.37
1.65	1031.78	1130.78	10.67
1.82	1091.19	1190.19	11.16
1.98	1229.12	1328.12	12.51
2.15	1321.64	1420.64	13.15
2.32	1358.67	1458.67	12.47
2.48	1378.54	1478.54	13.38
2.65	1342.06	1442.06	13.58
2.82	1251.76	1352.76	13.55
2.98	1133.45	1234.45	13.19
3.15	971.99	1072.99	12.92
3.32	808.71	909.71	12.13
3.48	839.02	940.02	12.40
3.65	832.19	932.19	12.14
3.82	833.70	934.70	12.13
3.98	849.85	949.85	12.00
4.15	860.12	961.12	11.26

Desplazamiento axial	Esfuerzo desviador	Esfuerzo axial	Presión de poros
mm	kPa	kPa	kPa
4.32	877.74	978.74	11.52
4.48	928.48	1029.48	11.13
4.65	937.71	1038.71	11.21
4.82	939.46	1039.46	10.79
4.98	937.75	1037.75	10.77
5.15	884.56	985.56	10.64
5.32	897.85	998.85	10.81
5.48	892.05	992.05	10.39
5.65	822.58	923.58	10.11
5.82	895.88	996.88	9.72
5.98	923.29	1023.29	9.66
6.15	727.73	828.73	9.63

El comportamiento de los diferentes esfuerzos se representa gráficamente respecto a su deformación axial.

Gráfica 8. Comportamiento deformación Vs Esfuerzo desviador. Presión de confinamiento=100 kPa



Gráfica 9. Comportamiento deformación Vs Esfuerzo Normal. P. confinamiento=100 Kpa



Se buscó el valor máximo que representa el esfuerzo desviador y esfuerzo normal y además se corroboró la presión de confinamiento como se observa en la **Tabla N° 20 y Tabla N° 21**.

Tabla 18. Resultados muestra 1. Presión de confinamiento = 100 Kpa

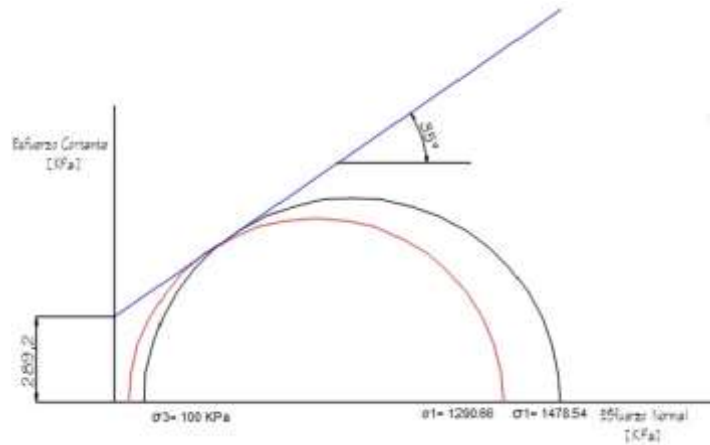
$\sigma_1 - \sigma_3$	Esfuerzo desviador	1378.535	kPa
σ_1	Esfuerzo axial	1478.535	kPa
σ_3	Presión de confinamiento	100	kPa

Tabla 19. Resultados muestra 2. Presión de confinamiento = 50 kPa

$\sigma_1 - \sigma_3$	Esfuerzo desviador	1241.658	kPa
σ_1	Esfuerzo axial	1290.658	kPa
σ_3	Presión de confinamiento	49	kPa

Una vez obtenidos los esfuerzos principales se realiza el gráfico del círculo de Mohr respetando las respectivas escalas. Se decide a realizarlo en el programa de AUTOCAD-2016 por facilidad y exactitud de medidas.

Gráfica 10. Círculo de Mohr



Del gráfico realizado se obtuvieron los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción (Φ) de la probeta óptima mediante la envolvente de falla. La envolvente de falla es la tangente a cada círculo obtenido por los esfuerzos (σ_1, σ_3).

$$C = 288.2 \text{ [Kpa]}$$

$$\phi = 35^\circ$$

Aplicando la ley de Coulomb y tomando esfuerzos normales máximos para comparar la resistencia al cortante se obtuvo:

Tabla 20. Comparación de resistencia al cortante de probeta patrón Vs probeta óptima

	Probeta patrón	Probeta óptima
Cohesión [kPa]	15,97	288,2
Ángulo de fricción [°]	34,45	35
σ . Máximo [kPa]	115,00	1478,535
τ .Máximo [kPa]	95,00	1323,48

Los ensayos de corte directo y triaxial son los más usados para determinar la resistencia al cortante de un suelo, siendo el triaxial un ensayo de mayor exactitud debido a que en este la superficie de falla depende de las propiedades del suelo.

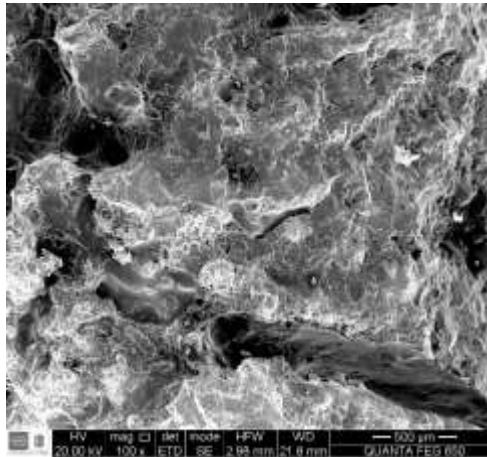
Comparando los valores de resistencia al cortante de cada probeta, tanto de la óptima como la patrón, se concluye que debido a los valores grandes de cohesión que arroja la probeta con la mezcla indica que el PET al llegar a su fluidez se comporta como un muy buen cementante adhiriendo aún más las partículas, aportando al aumento de resistencia al cizallamiento, mientras que la probeta patrón tiene valores más pequeños debido a que es el valor aproximado que en su naturaleza los limos pueden tener siendo un suelo fino cohesivo. Es decir, el PET sí mejora la resistencia y se puede utilizar como alternativa de uso para mejoramiento, en este caso, la resistencia al cortante.

Respecto al ángulo de fricción es aproximadamente el mismo, corroborando que este depende de las propiedades físicas del suelo, afectando entonces este aditivo la cohesión, la cual aumenta la adherencia entre partículas.

3.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

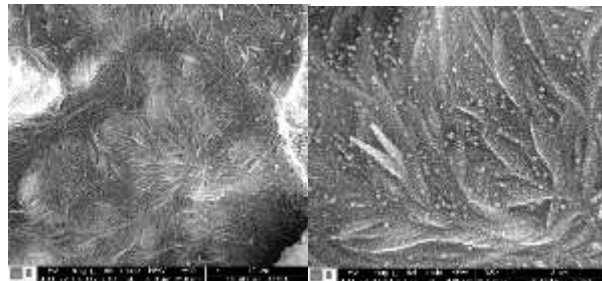
Las imágenes arrojadas por el microscopio electrónico de barrido permiten observar los vacíos formados dentro de la muestra de suelo-PET, lo que quiere decir que a pesar de que el PET fluye no los ocupa en un 100%.

Imagen 13. Muestra de PET-suelo



Las partículas de plástico triturada al pasar por un tratamiento térmico empiezan a deshacerse formando una red de hilos que se reparten en la mezcla, quedando las partículas de suelo atrapadas en medio de ellas. (*Imagen N°14*).

Imagen 14. Partículas de suelo en la red de PET fluido



4. CONCLUSIONES

Por los resultados arrojados en los ensayos de resistencia a la compresión se puede afirmar que el material aditivo mejora las propiedades mecánicas del suelo en un 200%, lo que permite corroborar que puede ser una alternativa de uso de mejoramiento. En este caso particular para subrasantes de suelo limoso. Para dicho mejoramiento se requiere un 30% en volumen de material reciclado PET, sometido a un tratamiento térmico de 3 ½ horas.

El material PET al ser sometido a altas temperaturas, llega a un punto de fluidez y a partir de ahí comienza su proceso de quemado en donde lentamente empieza a perder resistencia a la compresión hasta que se vuelve constante.

En cuanto al cortante el PET aumenta en gran magnitud la cohesión, acrecentando así en forma directa la resistencia. El ángulo de fricción resulta ser aproximadamente el mismo, debido a que este depende de las propiedades físicas del suelo.

A menor tamaño de partículas de PET se puede ocupar mejor los vacíos de la probeta, aportando así mayor resistencia debido a que las partículas tienen mejor adherencia.

5. RECOMENDACIONES

- Se realizó una probeta con el porcentaje de PET óptimo con un PET ya no en estado triturado sino molido. Se le aplicó exactamente el mismo procedimiento, pero solo se ensayó bajo la compresión inconfiada.

Esta probeta presentó características muchísimas menos porosas, superficialmente se observa muy rígida debido a su compactación, ya que por las partículas ser de menor tamaño, se condensaba mejor al suelo.

Tabla 21. Resistencia PET molido

Tiempo [h]	% PET	Carga soportada [KN]			Carga soportada [KN]
		probeta 1	probeta 2	probeta 3	
3 1/2	30%	13.3	15.8	15.4	15.6

La carga soportada fue de 15. 6 KN que al comparada con la óptima mejora en más de un 200% la resistencia a la compresión y en un 500% a la probeta patrón.

- Se decidió realizar una sobrecarga de una tonelada a la probeta óptima a manera de prueba con el fin de lograr una mejor compactación y reducir vacíos, pero los resultados no cumplieron con lo deseado ya que los resultados de resistencia a la compresión fueron similares.

Tabla 22. Resistencia con aplicación de sobrecarga

Tiempo [h]	% PET	Carga soportada [KN]
3 1/2	30%	5.8

Se observó, que en la probeta aumentaba su volumen después del tiempo de cocción, de tal forma que superaba el anillo de extensión, pero no repercutía en gran manera a la resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ PABÓN, Jorge A. ESTABILIZACIÓN DE SUBRASANTES. Colombia.
Página 58. Visto en línea:
http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Estabilizacion_de_Suelos/Estab.Doc.Colombiano,varios%20insumos,Cal.2010-F_Upload.pdf

ASPECTOS POSITIVOS DEL USO DEL PET. PDF. Página 3. Visto en línea:
<http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/15405/ANEXO%201-PET.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

CLUB ENSAYOS. Productos PET. Visto en línea:
<https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Productos-Pet/81965.html>

CRUZ VELAZCO, Lucio Gerardo. Resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. Univesidad del Cauca-Facultad de Ingeniería Civil.

FOLLETO DE LABORATORIO DE MICROSCOPIA LabMIC. Guatiguará, parque tecnológico. Universidad Industrial de Santander.

GÓMEZ MAQUERA, Thalia Maribel. Clasificación de suelos. 2016. Visto en línea:
<https://prezi.com/4eawqd9c0gjj/clasificacion-de-suelos/>

HERRERA RESÉNDIZ, Juan Roberto y ESTRADA MONJE, Anayansi. Depolimerización de botellas de poli (tereftalato de etileno) (pet) post- consumo mediante glicosilación. efecto del catalizador y del tipo de glicol. Volumen 13(3). 2012. Visto en línea: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/JUL12/herrera.pdf>

PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE COMPRESIÓN TRIAXIAL. Instituto Nacional de Vías (INV E-153-07)

REVISTA SEMANA SOSTENIBLE. PET un plástico amigable pero no inofensivo. Visto en línea: <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/plastico-pet-un-amigable-pero-no-inofensivo/36282>

RODRÍGUEZ, Daniela. Suelo limoso, caracterización y usos. Visto en línea: <https://www.lifeder.com/suelo-limoso/>

ROMÁN GARCÍA, Elvira. RECICLAJE. Visto en línea: <https://www.uv.mx/orizaba/cosustenta/files/2014/05/RECICLAJE-Elvira-Roman.pdf>

SÁNCHEZ SIERRA, María y PAREDES QUIROGA, Pedro. Estudio de viabilidad técnica de la implementación del polietileno tereftalato como material para estabilización de taludes. Visto en línea: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1703/1/ESTUDIO%20DE%20VIABILIDAD%20T%C3%89CNICA%20DE%20LA%20IMPLEMENTACI%C3%93N%20DEL%20POLIETILENO%20TEREFTALATO%20COMO%20MATERIAL%20PARA%20ESTABILIZACI%C3%93N%20DE%20TALUD~1.pdf>

SUÁREZ, Jaime. Deslizamientos-Análisis geotécnico. Resistencia al cortante. Capítulo 3.

SUELOS LIMOSOS. Tendencia. Revista digital en español. Visto en línea: https://tendencias.com/eco/tipos-de-suelos/#/Suelos_limosos<http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=6329>

ANEXOS

Anexo A: Procedimiento de ensayo de GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL SUELO. INV E 128-13

- ❖ Se selecciona la muestra a partir del suelo que pase por el tamiz de abertura 4.75 mm (N. 4)
- ❖ Se nivela el picnómetro
- ❖ Se le agrega agua al picnómetro hasta el aforo y se lleva a la balanza para obtener su masa.
- ❖ Se saca agua del picnómetro dejándola hasta aproximadamente la mitad de la altura del balón.
- ❖ Se agrega la cantidad de sólidos en estado seco al picnómetro mediante un embudo (para el suelo limoso se tomó una muestra de 500 gramos).
- ❖ Se agitó la muestra hasta formar una pasta y se completó con agua hasta llegar al aforo, sin dejar partículas en las paredes del picnómetro
- ❖ Se midió la masa del picnómetro con la pasta
- ❖ Se extrajeron los sólidos agregados y se secaron hasta formar una masa constante llevándola al horno.
- ❖ Se procedió a medir la masa seca de los sólidos.

Imagen No 15. Picnómetro



Imagen No 16. Picnómetro más agua



Imagen No 17. Picnómetro con suelo y agua



DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)(A)	652.9	Gramos
Peso de la Muestra (En el Aire)(B)	500	Gramos
Peso de la muestra + Frasco + Agua hasta la marca .(C)	933.7	Gramos
Peso dela Muestra Seca (D)	435.7	Gramos

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

$$\text{Gravedad Especifica Real} = \frac{D}{A - C + D}$$

$$\text{Gravedad Especifica Aparente} = \frac{D}{A + B - C}$$

$$\text{Gravedad Especifica aparente. S. S. S.} = \frac{B}{A + B - C}$$

Gravedad específica real	2.81
Gravedad específica aparente	1.99
Gravedad específica aparente S.S.S	2.281

Anexo B: Procedimiento de ensayo de proctor modificado.

- ❖ Se definió el método a utilizar según la norma INV E 142-13. En este caso se seleccionó el método A y se tomó una muestra de suelo inalterada que pasase por el tamiz de abertura 4.75mm (N.4).
- ❖ Se tomó la lectura del peso del molde más la base sin suelo.
- ❖ Se prepararon cuatro muestras con distintas humedades para conformar la curva de compactación y a partir de ahí definir la humedad óptima que llevaría a la densidad seca máxima (**Grafica N° 1**).
- ❖ A la primera muestra, para hallar su humedad, se le iba agregando controladamente agua y a la misma vez esparciéndola en el suelo hasta lograr que al apretar una porción de dicha mezcla en la mano, se adhiriera entre sí.
- ❖ Conociendo ya la cantidad de agua de la primera muestra, a la segunda se le adicionaba 50 ml más de lo que fue necesario en la primera y así sucesivamente hasta que al pesar el molde con la muestra, diese menor al valor anterior.
- ❖ A medida que se iba teniendo la humedad óptima en cada muestra, se agregaba la mezcla al molde para su proceso de compactación.
- ❖ Siguiendo la norma, este proceso se realizó con 5 capas y 25 golpes en cada una de ellas con el martillo definido.
- ❖ Se enrazó la muestra a la altura del molde y se llevó a la balanza para obtener su masa.
- ❖ Se extrajo la probeta mediante un gato mecánico y a partir de ahí se sacó una pequeña muestra de ella para ser secada en el horno.
- ❖ Por último, se lee la masa de la muestra seca en la balanza.

Imagen N° 18. Molde más la base.



Imagen N° 19. Molde más la base y el suelo compactado.



Imagen N° 20. Probeta extraída del Proctor.



PROCTOR MODIFICADO	
Tipo de ensayo	Modificado
Numero de capas	5
Número de golpes por capa	25
Diámetro molde(m)	0.1016
Altura molde (m)	0.12
Volumen del molde (m3)	0.000943

DATOS DE HUMEDAD OBTENIDOS:

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4	
Peso tara (g)	5.6	8.4	5.4	4.5	5,4	5,6	8,4	5,6
W tara + S.h (g)	39.9	47.5	34.6	40.7	48,8	49,9	50,3	41,3
W tara + S.S (g)	37.5	44.6	32	37.5	43,7	45,5	44,8	36,6
% Humedad	7.5	8.0	9.8	9.7	13,3	11,0	15,1	15,2
Promedio humedad %	7.75		9.74		12.17		15.14	

CÁLCULO TIPO DE LA HUMEDAD

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(W \text{ tara} + Ws.h) - (W \text{ tara} + Ws.s)}{(W \text{ tara} + Ws.s) - W \text{ tara}} * 100\%$$

Donde:

$W \text{ tara}$ = Peso de la tara

$Ws.h$ = Peso del suelo húmedo

$Ws.s$ = Peso del suelo seco

Ensayo 1

Para la Muestra 1

$$\% \text{ Humedad M1} = \frac{39.9 - 37.5}{37.5 - 5.6} * 100\% = 7.5 \%$$

Para la muestra 2

$$\% \text{ Humedad } M2 = \frac{47.5 - 44.6}{44.6 - 8.4} * 100\% = 8 \%$$

Humedad para el Ensayo 1

$$\% \text{ Humedad Promedio} = \frac{7.5 + 8.0}{2} = 7.75 \%$$

DATOS PARA DENSIDAD OBTENIDOS:

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Peso molde (Kg)	4.3016	4.3016	4.3016	4.3016
W molde + S.h (Kg)	6.138	6.2505	6.3291	6.2883
W del S.h (Kg)	1.836	1.949	2.028	1.987
Densidad H (Kg/m3)	1947.4	2066.7	2150.1	2106.8
Densidad S (Kg/m3)	1807.3	1883.3	1916.8	1829.8

CÁLCULO TIPO DE LA DENSIDAD

$$\text{Densidad humeda} = \frac{\text{Peso del suelo húmedo}}{\text{Volumen del molde}}$$

$$\text{Densidad seca} = \frac{\text{Densidad humeda}}{1 + \frac{\text{humedad de la probeta}}{100}}$$

Ensayo 1

$$\text{Densidad humeda} = \frac{1.836}{0.000943} = 1947.4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$Densidad\ seca = \frac{1947.4}{1 + \frac{7.75}{100}} = 1807.3 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

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 (**Gráfica N° 1**) que proporciona la humedad óptima y la densidad seca máxima.

Densidad Seca Máxima = 1.92 gr/cm³

Humedad Óptima = 12 %

COMPROBACIÓN DE HUMEDAD ÓPTIMA DEL SUELO

A modo de comprobación se calculó la densidad seca máxima que podría tener el suelo en el molde de la probeta de trabajo, tomando como humedad el valor del 12% y el número de golpes por capa recalculado.

Tipo de ensayo	Modificado
Numero de capas	5
Número de golpes por capa	8
Diámetro molde(m)	0.05
Altura molde (m)	0.104
Volumen de molde (m ³)	0.0002042

Peso molde (Kg)	1.8112
W molde + Wsh (Kg)	2.251
W sh(Kg)	0.4398
Densidad suelo húmedo (Kg/m ³)	2153.7
Densidad suelo seco (Kg/m ³)	1923.0

$$\% Error = \left| \frac{Densidad\ seca\ real - Densidad\ seca\ exp}{Densidad\ seca\ real} \right| * 100\%$$

$$\% Error = \left| \frac{1916.8 - 1923}{1923} \right| * 100\%$$

$$\% Error = 0.32\%$$

Anexo C: Procedimiento para determinar la gravedad específica del pet(terftalato de polietileno).

- ❖ Se selecciona la muestra a partir del suelo que pase por el tamiz de abertura 4.75 mm (N. 4)
- ❖ Se nivela el picnómetro
- ❖ Se le agrega agua al picnómetro hasta el aforo y se lleva a la balanza para obtener su masa (**Imagen N° 21**).
- ❖ Se saca agua del picnómetro dejándola hasta aproximadamente la mitad de la altura del balón.
- ❖ Se agrega la cantidad de sólidos en estado seco al picnómetro mediante un embudo. Para el PET se tomó una muestra de 100 gramos (**Imagen N° 22**).
- ❖ Se agitó la muestra hasta formar una pasta y se completó con agua hasta llegar al aforo y sin dejar partículas en las paredes del picnómetro
- ❖ Se midió la masa del picnómetro con la pasta
- ❖ Se extrajeron los sólidos agregados y se secaron hasta formar una masa constante exponiéndolo al aire libre.
- ❖ Se procedió a medir la masa seca de los sólidos.

Imagen N° 21. Picnómetro más agua



Imagen N° 22. Picnómetro con PET y agua



DATOS OBTENIDOS:

Peso del Frasco + Agua hasta la marca (En el Aire)(A)	653.3	Gramos
Peso de la Muestra (En el Aire)(B)	100	Gramos
Peso de la muestra + Frasco + Agua hasta la marca .(C)	675.2	Gramos
Peso dela Muestra Seca (D)	91.5	Gramos

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

$$\text{Gravedad Especifica Real} = \frac{D}{A - C + D}$$

$$\text{Gravedad Especifica Aparente} = \frac{D}{A + B - C}$$

$$\text{Gravedad Especifica aparente. S. S. S.} = \frac{B}{A + B - C}$$

Gravedad específica real	1.315
Gravedad específica aparente	1.172
Gravedad específica aparente S.S.S	1.28

Anexo D: Procedimiento de elaboración de probetas

- ❖ Engrasado de moldes. Se usó grasa resistente a altas temperaturas (***Imagen N° 23***)
- ❖ Armado de moldes previamente engrasados (***Imagen N° 24***).
- ❖ Medición de dosificación de los materiales a utilizar (suelo, PET y agua)
- ❖ Se mezcla el suelo limoso y PET en seco para luego ir agregando agua gradualmente hasta obtener una mezcla homogénea. (***Imagen N° 25***)
- ❖ Compactación de la mezcla en los moldes. Siguiendo el procedimiento del Proctor: 5 capas y 8 golpes por capa con el martillo del Proctor Estándar.
- ❖ Ingresar los moldes al horno. El horno deberá estar caliente, para esto se debe encender con una hora de anticipación.
- ❖ Pasado el tiempo establecido de cocción de las probetas se sacan del horno y se dejan enfriar al aire.
- ❖ Desencofrado de las probetas. Requiere de golpeteo controlado para separar la probeta del molde.
- ❖ Limpieza de los moldes para su futura reutilización.

Imagen N° 23. Grasa Motorkote 3W



Imagen N° 24. Moldes engrasados y armados



Imagen N° 25. Mezcla seca y húmeda



Anexo E: Recálculo de número de golpes y cálculo de energía de compactación

$$V.molde = \pi * r^2 * H = \pi * 5.08^2 * 10.4 = 204.2 \text{ cm}^3$$

$$Energía de Compactación = \frac{n * N * W * h}{V}$$

n: Número de Golpes

N: Número de capas

W: Peso del Martillo

h: Altura de caída libre martillo

V: Volumen del Molde

$$Energía de Compactación \cong 27 \text{ Kg} - \text{cm/cm}^3$$

$$n = \frac{V.molde * Energia.compactación}{N * W * h}$$

$$n = \frac{204.2 * 27}{5 * 2.6 * 56} = 7.57 \cong 8 \text{ golpes}$$

Anexo F: Procedimiento para determinar las dosificaciones de suelo limoso y pET.

Conociendo el volumen del molde a trabajar y sabiendo las densidades de los respectivos materiales, se calcula la cantidad de cada material que se va a necesitar en la elaboración de las probetas.

La densidad del suelo limoso establecida para trabajar fue obtenida del ensayo de Proctor modificado, donde con el porcentaje de humedad óptimo y número de golpes recalculado por capa se obtendría un valor de peso específico seco máximo, llamada también densidad específica máxima. Ésta, simula el comportamiento que se quiere obtener en la elaboración de cada probeta ya que está teniendo en cuenta el coeficiente de expansión del suelo.

Volúmen del molde (cm ³)	204.2
Densidad del suelo limoso (g/ cm ³)	1,92
Densidad del PET (g/ cm ³)	1,28

Primeramente, se necesita conocer la cantidad de suelo limoso que debería contener cada una de las probetas que se va elaborar dependiendo del porcentaje que éstas contengan.

$$Masa\ de\ Suelo = Densidad * Volumen * (1 - \%PET)$$

CÁLCULO TIPO PROBETA 25% DE PET

Dosificación para tres probetas de cada porcentaje

$$\text{Masa de Suelo} = 1.92 * 204.2 * (1 - 0.25)$$

$$\text{Masa de Suelo} = 294.048 \text{ g}$$

$$\text{Masa de suelo total} = 294.048 * 3$$

$$\text{Masa de suelo total} = 882.14 \text{ g}$$

Teniendo en cuenta las pérdidas al compactar (desperdicio) y que la última capa compactada debe sobrepasar al anillo de extensión (con el fin de enrasar la superficie), se utilizó un factor de mayoración (FM) de 1.2 con el fin de contrarrestar estos problemas.

$$\text{Masa de Suelo} = \text{Masa de suelo real} * \text{FM}$$

$$\text{Masa de Suelo} = 882.14 * 1.2$$

$$\text{Masa de suelo total} = 1058.6 \text{ g} \cong 1100 \text{ g}$$

Dosificación suelo limoso respecto al %PET

% PET	Masa de suelo real [g]	Masa de suelo a usar [g]
25%	1058.57	1100
30%	988.00	1000
35%	917.43	930
40%	846.86	860
45%	776.29	800
50%	705.72	730
55%	635.14	660
60%	564.57	600

Con la cantidad de suelo limoso establecido se calculó la cantidad de material reciclado PET que dicho porcentaje requiere.

$$Cantidad\ de\ PET = \frac{M_s * \% PET}{\frac{\rho_s}{\rho_{PET}} * (1 - \% PET)}$$

La ecuación anterior parte del concepto que un porcentaje de un material es la relación de peso de este (W_m) versus el peso total (W_t) de la muestra en una condición de peso:

$$\%Material = \frac{W_m}{W_t} * 100\%$$

En este caso particular, el peso total será la suma del material de PET y suelo limoso.

Para una conversión por volumen se hace necesario la utilización de las densidades de los materiales, llevando el peso de un material a otro material por la relación de sus densidades.

$$\%PET = \frac{W_{PET} * \frac{\rho_{suelo\ Limoso}}{\rho_{PET}}}{M_s + W_{PET} * \frac{\rho_{suelo\ Limoso}}{\rho_{PET}}}$$

De la ecuación se despejó la incógnita que teníamos que era la cantidad de PET.

CÁLCULO TIPO PROBETA 25% DE PET

$$Cantidad\ de\ PET = \frac{1100\ gr * 25\%}{\frac{1.92\ gr/cm^3}{1.28\ gr/cm^3} * (1 - 25\%)}$$

$$Cantidad\ de\ PET = 244.4\ g$$

Cantidades de PET

% PET	Masa de suelo a usar [g]	Cantidad de PET [g]
25%	1100	244,4
30%	1000	285,7
35%	930	333,8
40%	860	382,2
45%	800	436,4
50%	730	486,7
55%	660	537,8
60%	600	600,0

Por último, se determinó las cantidades de agua que se necesitaría para que estos dos materiales se compacten de la mejor manera y obtengan la densidad seca máxima.

Conociendo el valor de humedad óptima del material del suelo limoso que es 12% en proporción a su peso, se consideró que el material reciclado PET necesitaría cierta cantidad de agua para que sus partículas se humedezcan y se adhieran con mayor facilidad a las partículas de suelo limoso sin afectar la humedad de suelo. Se estableció un rango entre [10%-15%] para dicho material de PET usado, por simplicidad, y por ser un dato intermedio se tomó el mismo porcentaje de humedad que tiene el suelo limoso.

$$Vol. Agua = \frac{(W_{PET} + W_{Suelo}) * \%humedad}{\rho. agua}$$

CÁLCULO TIPO PROBETA 25% DE PET

Siendo $\rho. agua = 1.0 \text{ gr/ml}$ y la humedad óptima tanto del suelo como del PET de 12%.

$$Vol. Agua = \frac{(244.4 + 1100) * 12\%}{1}$$

$$Vol. Agua = 161.3 \text{ ml}$$

Determinación de cantidad de agua

% PET	Masa de suelo a usar [g]	Cantidad de PET [g]	Cantidad de Agua [ml]
25%	1100	244,4	161,3
30%	1000	285,7	154,3
35%	930	333,8	151,7
40%	860	382,2	149,1
45%	800	436,4	148,4
50%	730	486,7	146,0
55%	660	537,8	143,7
60%	600	600,0	144,0

Anexo G: Procedimiento ensayo corte directo.

- ❖ Primeramente, se elaboraron tres probetas con una muestra de suelo con la humedad óptima del 12% adoptada del ensayo de Proctor modificado.
- ❖ Se realizó una probeta de Proctor modificado para extraer de ésta las muestras, introduciendo a presión el anillo y así tener un acercamiento de las densidades a la probeta patrón.
- ❖ Se enrasó la muestra y se tomó la lectura de su peso en la balanza.
- ❖ Se instaló en la caja de corte con la presencia de piedras porosas debido a que la muestra se saturó para llevar a cabo el drenaje.
- ❖ Seguidamente se implementó en el equipo, se inundó y simultáneamente se le aplicó una carga con el fin de confinarla. (La carga normal aplicada fue de 8 Kg para la primera muestra, para la segunda, fue el doble de ella (16 Kg) y la para la tercera, el doble de la anterior (32 Kg)). Este proceso tardó aproximadamente dos horas por cada probeta.
- ❖ Terminado dicho tiempo se empezó con el proceso de falla aplicando una fuerza cortante a una velocidad de 1 mm/min (considerando ésta una velocidad baja para evitar el desarrollo de presiones de poros en la muestra).
- ❖ Finalmente, se anotó los datos de deformación vertical y horizontal y la carga horizontal aplicada.

Imagen N° 26. Muestras compactas



Imagen N° 27. Máquina de corte directo



Con los valores de peso del anillo, peso de la muestra con el anillo y las dimensiones del molde se establece la densidad de la probeta de prueba sobre el molde de corte directo para obtener un comparativo con las condiciones de densidad de la probeta patrón.

Datos ensayo corte directo

Tipo de Suelo	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Masa del Anillo (g)	109.60	107.30	107.30
Diámetro de la muestra Lo (cm)	6	6	6
Altura (cm)	2.30	2.30	2.30
Área (cm²)	28.27	28.27	28.27
Volumen Inicial (cm³)	65.03	65.03	65.03
Masa Húmeda + Anillo (g)	242,1	249.6	248.60
% Humedad	12%	12%	12%
Densidad Máxima Seca (g/cm³)	1.82	1.95	1.94

Se leyeron resultados de carga y deformación vertical del ensayo de corte directo cada 0.25 mm respecto a la deformación horizontal después de dos horas de saturación y consolidación de la muestra con la masa de 8, 16 y 32 Kg que representaban la magnitud de la carga normal aplicada.

Lectura de carga para carga normal de 8 kg

CARGA NORMAL	8 KG
Lectura Deformación Horizontal	Lectura de Carga
mm	kg
0.00	0.00
0.25	0.70
0.50	2.00
0.75	2.40
1.00	3.20
1.25	4.10
1.50	4.70
1.75	5.05
2.00	5.40
2.25	5.75
2.50	6.05
2.75	6.20
3.00	6.35
3.25	6.25
3.50	6.05
3.75	6.05
4.00	6.00
4.25	5.95
4.50	6.00
4.75	6.05
5.00	6.00

Con los datos obtenidos. primeramente. se hace la corrección del área de la muestra, la cual sufre variación debido a las deformaciones horizontales que se generan en el ensayo.

$$Area_{corregida} = A_o * \left(1 - \frac{\Delta L}{(L_o)^2}\right)$$

Donde:

A_o = Área inicial de la muestra

L_o = Diámetro inicial de la muestra.

ΔL = Deformación Horizontal

CÁLCULO TIPO DEFORMACIÓN HORIZONTAL DE 3 MILIMETROS

$$Area_{corregida} = 28.27 * \left(1 - \frac{\frac{3}{10}}{(6)^2}\right) = 28.03 \text{ cm}^2$$

Cálculo de esfuerzo cortante y esfuerzo normal.

$$Esfuerzo \text{ Cortante} = \frac{Carga \text{ Horizontal}}{Área_{corregida}} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

$$Esfuerzo \text{ Normal} = \frac{Carga \text{ Normal}}{Área_{corregida}} \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

CÁLCULO TIPO DEFORMACIÓN HORIZONTAL DE 3 MILIMETROS

$$Esfuerzo \text{ Cortante} = \frac{6.35}{28.03} = 0.2265 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

$$Esfuerzo\ Cortante \cong 22.22\ kPa$$

$$Esfuerzo\ Normal = \frac{8}{28.03} = 0.2854 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

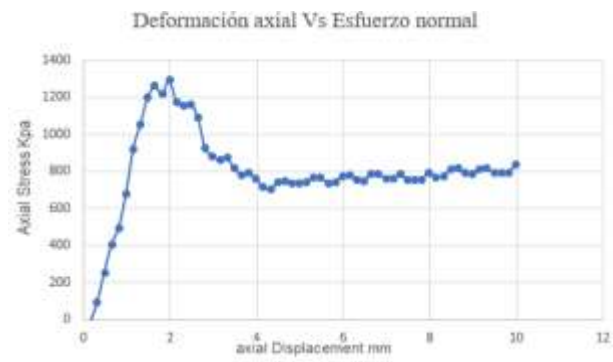
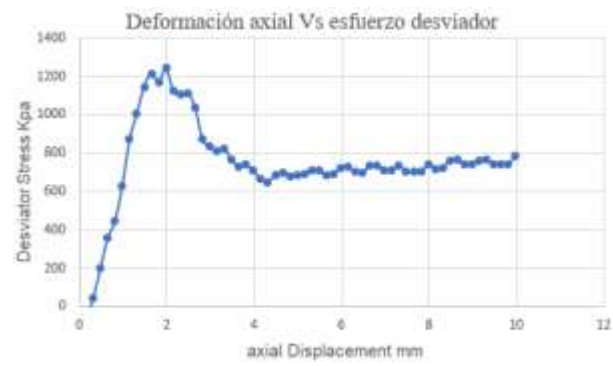
$$Esfuerzo\ Normal \cong 27.99\ kPa$$

Anexo H: Procedimiento de ensayo triaxial estático

Datos Triaxial. Presión de confinamiento de 50 Kpa

desplazamiento axial	Esfuerzo desviador	Esfuerzo axial	presión de poros
mm	Kpa	Kpa	Kpa
0.00	-113.68	-64.68	-7.08
0.15	-66.01	-17.01	-6.12
0.32	42.34	91.34	-4.90
0.48	201.89	250.89	-4.54
0.65	355.30	404.30	-3.33
0.82	447.17	495.17	-2.51
0.98	628.24	676.24	-1.35
1.15	870.10	918.10	-1.05
1.32	1005.33	1054.33	-0.13
1.48	1146.37	1195.37	0.76
1.65	1212.67	1260.67	1.34
1.82	1167.60	1216.60	1.65
1.98	1241.66	1290.66	2.31
2.15	1123.83	1174.83	2.17
2.32	1102.78	1152.78	2.32
2.48	1112.26	1162.26	2.49
2.65	1038.74	1088.74	2.28
2.82	870.99	921.99	2.14
2.98	832.71	882.71	1.99
3.15	808.47	858.47	1.73
3.32	821.13	872.13	1.36
3.48	766.78	817.78	1.49
3.65	729.99	780.99	1.37
3.82	738.88	790.88	0.92
3.98	708.61	759.61	0.69
4.15	664.37	715.37	0.05

desplazamiento axial	Esfuerzo desviador	Esfuerzo axial	presión de poros
4.32	649.60	700.60	0.46
4.48	687.01	738.01	0.00
4.65	697.63	748.63	-0.67
4.82	681.05	733.05	-0.65
4.98	682.23	733.23	-1.04
5.15	689.35	740.35	-1.32
5.32	710.94	762.94	-1.41
5.48	711.76	763.76	-1.76
5.65	683.56	734.56	-1.95
5.82	687.79	738.79	-2.30
5.98	724.50	775.50	-2.66
6.15	728.77	778.77	-2.92
6.32	700.94	751.94	-3.42
6.48	698.68	749.68	-3.22
6.65	733.80	784.80	-4.17
6.82	736.36	787.36	-4.27
6.98	711.35	762.35	-4.59
7.15	708.21	759.21	-4.27
7.32	733.59	784.59	-4.26
7.48	702.83	752.83	-4.94
7.65	702.42	752.42	-5.31
7.82	702.39	753.39	-5.36
7.98	739.68	791.68	-5.82
8.15	716.74	767.74	-5.74
8.32	723.47	774.47	-6.42
8.48	760.44	810.44	-6.26
8.65	764.90	815.90	-6.12
8.82	739.86	789.86	-7.14
8.98	738.09	788.09	-6.44
9.15	757.46	808.46	-7.35
9.32	765.53	816.53	-7.58
9.48	740.87	790.87	-8.14
9.65	743.14	793.14	-7.80
9.82	743.90	793.90	-7.49
9.98	782.66	833.66	-8.27



Anexo I: Microscopía electrónica de barrido

El ensayo consistió en poner tres muestras del porcentaje óptimo en tres tiempos diferentes sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón (**Imagen N° 28**), luego se llevó al equipo Quorum 150 para generar gran vacío en la muestra y le hiciera cierto recubrimiento con carbón (**Imagen N° 29**).

A partir de ahí, se llevaron al microscopio FEG Quanta 650 para la toma de imágenes mediante el haz de electrones que éste le genera a la muestra (**Imagen N° 30**), utilizando un voltaje de aceleración de 20 kV mediante los detectores de electrones secundarios (SE) y electrones retrodispersados (BSE).

Imagen N° 28. Muestras sobre stubs metálicos



Imagen N° 29. Recubrimiento de carbón en Quorum 150



Imagen N° 30. Ingreso de muestras al microscopio electrónico

