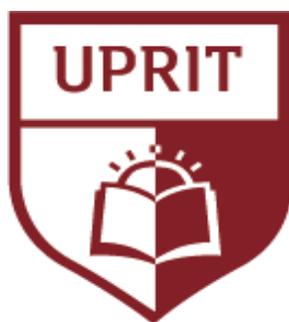


UNIVERSIDAD PRIVADA DE TRUJILLO

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO
DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE
OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018**

TESIS:

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR:

BACHILLER CARLOS MARTIN CARRILLO VEGA

ASESOR:

ING. JOSUALDO CARLOS VILLAR QUIROZ

**TRUJILLO – PERÚ
2019**



Aprobación de Tesis

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por el Bachiller **Carlos Martín Carrillo Vega**, denominada:

“ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018”

Ing. Enrique Manuel Durand Bazán

Jurado Presidente

Ing. Guido Robert Marín Cubas

Jurado

Ing. Josualdo Carlos Villar Quiroz

Jurado



Dedicatoria

*A mi Padre, Que está en el cielo, siendo
Que me bendice con su sabiduría para
Poder lograr los sueños de recibirme
Como Ingeniero Civil*

*A mi Familia, mi Madre, Hermanos e
Hijos por su apoyo incondicional y
Consejos*

Carlos Martin Carrillo Vega.



Agradecimiento

A Dios por bendecirme a lo largo de mí
Carrera profesional con bienestar y
Sabiduría para lograr esta meta.

A mi centro de estudios
“Universidad Privada de Trujillo”.
Por las Oportunidades brindadas y
Por Permitirme culminar mi carrera
Profesional satisfactoriamente.

A mis profesores y asesor de Tesis
Quienes, con sus enseñanzas, paciencia
y dedicación, han hecho posible la
Culminación satisfactoria de uno de mis
Metas más anheladas.

Carlos Martin Carrillo Vega

Índice de Contenidos

Dedicatoria	iii
Agradecimiento	iv
Índice de Contenidos	v
Índice de Figuras	xi
Resumen	xiii
Abstract	xiv
Introducción	1
1.1. Realidad problemática	1
1.2. Formulación del problema.....	10
1.3. Justificación.....	10
1.4. Objetivos.....	12
1.4.1. Objetivo General.....	12
1.4.2. Objetivos Específicos.....	12
1.5. Antecedentes	13
1.6. Bases Teóricas	17
1.6.1. Suelos cohesivos, naturaleza y problemática.....	17
1.6.1.1. <i>Comportamiento de los suelos cohesivos</i>	17
1.6.1.2. Problemas relacionados con los suelos cohesivos.....	20
1.6.2. Técnicas de mejoramiento de suelos.....	21
1.6.2.1. Sustitución.....	23
1.6.2.2. Impermeabilización.....	26
1.6.2.3. Remoldeo.....	26
1.6.2.4. Pre humedecimiento.....	26
1.6.2.5. Aislamiento o barreras verticales.....	26
1.6.2.6. Sobre excavación.....	26
1.6.2.7. Desplante profundo de la cimentación.....	27
1.6.2.8. Estabilización química.....	27
1.6.2.9. Compactación.....	27
1.6.2.10. Drenajes verticales.....	28
1.6.3. Método para el mejoramiento del suelo en campo.....	28
1.6.3.1. Compactación superficial.....	28



1.6.3.2. Estabilización de suelos con mezclas.	29
1.6.3.3. Compactación profunda.	30
1.6.3.4. Precarga.	30
1.6.3.5. Inyecciones (grouting).	30
1.6.4. Revisión del estado del arte de suelos fibra reforzados.	31
1.6.4.1. Tipos de fibras utilizadas en la literatura.	31
1.6.4.2. <i>Interacción del suelo y el refuerzo.</i>	35
1.6.4.3. <i>Mecanismos de interacción suelo-refuerzo tradicional.</i>	35
1.6.4.4. Mecanismo de interacción suelo-fibra.	36
1.6.4.5. <i>Análisis de la interface suelo-fibra.</i>	38
1.6.4.6. Posibles aplicaciones del concepto.	39
1.6.5. Polietileno tereftalato (PET)	39
1.6.5.1. Historia	40
1.6.5.2. Ventajas	40
1.6.5.3. Usos y aplicaciones	41
1.6.5.4. Impacto ambiental del PET	42
1.6.6. Conceptos.	44
1.6.6.1. Contenido de humedad.	44
1.6.6.2. Límites de Atterberg	45
1.6.6.3. Teoría de Mohr – Coulomb	46
1.6.6.4. Relación esfuerzo deformación	48
1.6.6.5. <i>Ensayo de compactación Proctor</i>	49
1.6.6.6. Pruebas de compresión rápidas	49
1.6.6.7. Resistencia al corte de suelos cohesivos.	51
1.6.7. Mezclado de inclusión – suelo	51
1.6.7.1. Mezclado en laboratorio	52
1.6.7.2. Mezclado en campo	53
1.7. Definición de términos básicos.	55
1.8. Formulación de la hipótesis.	58
1.8.1. Hipótesis general	58
1.8.2. Hipótesis específicas.	58
Material y Métodos.	59
2.1. Material:	59
2.2. Material de estudio.	59



2.2.1. Población.	59
2.2.2. Muestra.	60
2.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos.	62
2.3.1. Para recolectar datos.	62
2.3.2. Para procesar datos.	62
2.4. Operacionalización de variables.	64
Resultados	66
3.1. Caracterización Geotécnica del Suelo Cohesivo	66
3.1.1. Determinación de la granulometría del suelo	66
3.1.2. Clasificación del suelo	67
3.1.3. Gravedad específica	70
3.2. Máxima Densidad Seca y Humedad Óptima del Suelo Cohesivo.	71
3.3. Parámetros de Suelo Cohesivo Con y Sin Reforzamiento	73
3.3.1. Criterio de Mohr – Coulomb.	73
3.3.1.1. Círculos de Mohr para suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET.	73
3.3.1.2. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET de 30 mm	75
3.3.1.3. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET de 60 mm	76
3.3.1.4. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET de 30 mm	77
3.3.1.5. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET de 60 mm	78
3.3.1.6. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET de 30 mm	79
3.3.1.7. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET de 60 mm	80
3.3.1.8. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET de 30 mm	81
3.3.1.9. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET de 60 mm	82
3.3.2. Comportamiento esfuerzo – deformación.	83
3.3.3. Módulos de elasticidad.	88
3.3.4. Resistencia.	90

3.4. Capacidad de Soporte Relativo (CBR) del Suelo Con y Sin Reforzamiento.....	92
3.5. Evaluación Con Software Del Desempeño De Terraplenes Con Dimensiones Estándar.	93
Discusión.....	102
4.1. Caracterización Geotécnica del Suelo Cohesivo.....	102
4.2. Máxima Densidad Seca y Humedad Óptima del Suelo Cohesivo	102
4.3. Parámetros de Suelo Cohesivo Con y Sin Reforzamiento	103
4.4. Capacidad de Soporte Relativo (CBR) del Suelo Con y Sin Reforzamiento.....	107
4.5. Evaluación Con Software Del Desempeño De Terraplenes Con Dimensiones Estándar	107
Conclusiones.....	108
Recomendaciones.....	110
Referencias Bibliográficas	112
Anexos.....	114
Anexo N°1: Matriz de consistencia	114
Anexo N°2: Guía de observación de Calicatas.....	116
Anexo N°3: Guía de ensayo granulométrico.....	117
Anexo N°4: Guía de ensayo límites de consistencia.....	119
Anexo N°5: Guía de ensayo peso específico de sólidos en suelos – finos	121
Anexo N°6: Guía de ensayo peso específico de sólidos en suelos – gruesos.....	122
Anexo N°7: Guía de ensayo gravedad específica.....	123
Anexo N°8: Guía de ensayo contenido de humedad.....	124
Anexo N°9: Guía de ensayo Proctor modificado	125
Anexo N°10: Guía de ensayo CBR.....	127
Anexo N°11: Guía de ensayo compresión triaxial.	130



Índice de Tablas

Tabla 1: Tamaño de muestra requerido.	61
Tabla 2: Operacionalización de variables.....	64
Tabla 3: Resultados de la prueba de límite plástico.	67
Tabla 4: Resultados de la prueba de límite líquido.	68
Tabla 5: Resultados del gravedad específica.	70
Tabla 6: Determinación de la humedad óptima.....	71
Tabla 7: Resultados del peso volumétrico seco.....	71
Tabla 8: Resultados del peso volumétrico húmedo.....	72
Tabla 9: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR sin reforzamiento de fibras de PET.....	73
Tabla 10: Parámetros de resistencia para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.....	74
Tabla 11: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.4% de fibras DE PET (30mm).....	75
Tabla 12: Parámetros de resistencia para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET (30mm).	75
Tabla 13: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (60mm).	76
Tabla 14: Parámetros de resistencia para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).	76
Tabla 15: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).	77
Tabla 16: Parámetros de resistencia para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).	77
Tabla 17: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (60 mm).	78
Tabla 18: Parámetros de resistencia para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).	78
Tabla 19: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.2% de fibras de PE T (30 mm).	79
Tabla 20: Parámetros de resistencia para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).	79



Tabla 21: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.2% de fibras DE PE T (30 mm).....	80
Tabla 22: Parámetros de resistencia para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).	80
Tabla 23: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (30 mm).	81
Tabla 24: Parámetros de resistencia para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).	81
Tabla 25: Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.5% de fibras de PE T (60 mm).	82
Tabla 26: Parámetros de resistencia para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).	82
Tabla 27: Módulo de elasticidad para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.	89
Tabla 28: Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.	89
Tabla 29: Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET.	89
Tabla 30: Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET.	90
Tabla 31: Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET.	90
Tabla 32: Porcentajes de deformación usando 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% de PET.....	91
Tabla 33: Valor soporte de california de las muestras.	92
Tabla 34: Resultado de ecuaciones para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.	96
Tabla 35: Resultado de ecuaciones para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET.	97
Tabla 36: Resultado de ecuaciones para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET.	98
Tabla 37: Resultado de ecuaciones para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET.	99
Tabla 38: Resultado de ecuaciones para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET.	100
Tabla 39: Deformaciones esperadas en los bordos.....	101
Tabla 40: Comparativo de deformación en las probetas ensayadas menos favorables.	104
Tabla 41: Comparativo de deformación en las probetas ensayadas más favorables.	105

Índice de Figuras

Figura 1: Agua en una partícula arcillosa.	44
Figura 2: Círculo de Mohr-Coulomb.	47
Figura 3: Tipos de falla: a) Falla plástica, b) Falla frágil y c) Falla intermedia.	51
Figura 4:	60
Figura 5:	60
Figura 6: Composición granulométrica del material.	66
Figura 7: Límite Líquido.	68
Figura 8: Gráfica de Clasificación SUCS.	69
Figura 9: Dimensiones del cubo para determinar el peso específico del suelo.	70
Figura 10: Gráfica del Peso Volumétrico seco.	72
Figura 11: Gráfica del Peso Volumétrico Húmedo.	73
Figura 12: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas sin reforzamiento de fibras de PET.	74
Figura 13: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (30mm).	75
Figura 14 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (60mm).	76
Figura 15: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).	77
Figura 16: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).	78
Figura 17: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET (30 mm).	79
Figura 18: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET (60 mm).	80
Figura 19: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (30 mm).	81
Figura 20: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (60 mm).	82
Figura 21: Probeta de suelo natural con confinamiento de 0.5 kg/cm ²	83
Figura 22: Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.0 kg/cm ²	83
Figura 23: Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.5 kg/cm ²	84



Figura 24: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm². 84

Figura 25: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm². 84

Figura 26: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm². 85

Figura 27: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm². 85

Figura 28: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm². 85

Figura 29: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm². 86

Figura 30: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm². 86

Figura 31: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm². 86

Figura 32: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm². 87

Figura 33: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm². 87

Figura 34: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm². 87

Figura 35: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm². 88

Figura 36: Curvas carga-penetración obtenidas por CBR. 93

Figura 37: Sección Tipo. 94

Figura 38: Centro de radio y dovelas del talud para el caso sin fibras de PET. (SLIDE 6.0). . 95

Figura 39: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 0.4% de fibras de PET. (SLIDE 6.0). 96

Figura 40: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 0.8% de fibras de PET. (SLIDE 6.0). 97

Figura 41: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 1.2% de fibras de PET. (SLIDE 6.0) 98

Figura 42: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 1.5% de fibras de PET. (SLIDE 6.0). 99

Resumen

En esta tesis se estudió el uso y el reforzamiento de un suelo cohesivo de alta plasticidad extraído del kilómetro 52 de la carretera Trujillo-Ofusco, a la altura del sector Plazapampa, La Libertad. Se planteó la adición de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, con la finalidad de darle mayor resistencia y deformabilidad sin agrietarse al suelo en estudio para su uso en terraplenes de obras viales. El refuerzo del suelo se realizó a través de inclusiones aleatorias de fibras sintéticas discretas (PET), las cuales fueron distribuidas de manera homogénea en la masa de suelo. Previo muestreo, se realizó una caracterización geotécnica y posteriormente fue realizado un ensayo de compactación del tipo Proctor estándar para obtener los parámetros de peso específico seco máximo y contenido de agua óptimo para poder realizar el programa experimental bajo estos parámetros. Las variables que se tomaron en cuenta para el suelo fibro-reforzado fueron la longitud y el porcentaje de dosificación. Se utilizaron las longitudes de 30 y 60 mm bajo los porcentajes de adición de 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5%. Se evaluó el desempeño físico-mecánico de las diferentes combinaciones elaboradas de suelo-fibra, mediante los ensayos de capacidad de soporte relativo y pruebas triaxiales, con confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm². De los resultados de las pruebas se comprobó que el reforzamiento de suelos cohesivos con fibras PET mejoró hasta en un 60% la resistencia del suelo y aumentó su capacidad de deformación en un 40%, por lo cual, a través del análisis con el software SLIDE 6.0, se verificó la viabilidad de su uso en terraplenes de obras viales con un aumento de estabilidad de hasta un 20%.

Abstract

In this thesis the use and reinforcement of a cohesive soil of high plasticity extracted from kilometer 52 of the Trujillo-Otuzco highway, at the height of the Plazapampa sector, La Libertad, was studied. The addition of recycled polyethylene terephthalate (PET) fibers was proposed, to give it greater strength and deformability without cracking to the ground under study for use in road embankments. The reinforcement of the soil was carried out through random inclusions of discrete synthetic fibers (PET), which were distributed homogeneously in the soil mass. After the sampling, a geotechnical characterization was carried out and a compaction test of the standard Proctor type was carried out to obtain the parameters of maximum dry specific weight and optimum water content to be able to carry out the experimental program under these parameters. The variables that were taken into account for the fibro-reinforced soil were length and percentage of dosage. The lengths of 30 and 60 mm were used under the percentages of 0.4%, 0.8%, 1.2% and 1.5% addition. The physical-mechanical performance of the different soil-fiber combinations was evaluated, through tests of relative support capacity and triaxial tests, with confinements of 0.5 kg / cm², 1.0 kg / cm² and 1.5 kg / cm². From the results of the tests it was demonstrated that the reinforcement of the cohesive soils with PET fibers improved up to 60% the resistance of the soil and increased its capacity of deformation by 40%, therefore, through the analysis with the software SLIDE 6.0, the viability of its use was verified in road embankments with an increase in stability of up to 20%.

Introducción

1.1. Realidad problemática

La Geotecnia es la rama ingenieril que se encarga del estudio de las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes del medio geológico, siendo una de las ramas más relevantes dentro de la ingeniería civil. En la geotecnia se investigan el suelo y las rocas debajo de la superficie para determinar sus propiedades ingenieriles y diseñar las cimentaciones para estructuras tales como edificios, puentes, presas y centrales hidroeléctricas. Acciones en la rama vial como la estabilización de taludes, diseño y construcción de terraplenes, túneles y carreteras, diseño y construcción de cualquier tipo de estructura de contención para la prevención de riesgos geológicos, etc. (Duque Escobar 2013).

En las últimas décadas, el hombre ha desarrollado numerosos métodos para el mejoramiento de suelos que implican la adición de materiales de refuerzo. El refuerzo de suelos tiene como principal propósito incrementar la estabilidad, aumentar la capacidad de carga y reducir los asentamientos del suelo reforzado. Si bien el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras es una técnica antigua (un ejemplo de ello es el adobe), su estudio ha adquirido interés recién en los últimos 20 años. Con el propósito de mejora se ha recurrido al uso de materiales artificiales provenientes de los polímeros, se pueden encontrar las mallas sintéticas, los geotextiles y geogrillas, fabricadas con materia prima proveniente del plástico (C. Fernández Calvo 2006).

Diversos investigadores han estudiado en los últimos años el comportamiento de suelos reforzados mediante la adición de fibras. En general, los diferentes estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al introducir fibras a la matriz de suelo. Sin embargo, no existe acuerdo respecto al efecto que la adición de fibras produce en la rigidez del suelo reforzado. Las diferencias en las conclusiones a las que arriban las diferentes investigaciones pueden ser explicadas por las numerosas variables involucradas en el estudio del suelo reforzado con fibras, y por los diferentes enfoques con que los estudios han sido conducidos. (Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá 2014)

Son escasos los estudios realizados sobre suelos cohesivos reforzados con fibras. Entre ellos vale mencionar la investigación liderada en Turquía, por Akbulut et al. (2007). En este

país se estudió el efecto que fibras sintéticas de polipropileno y polietileno tienen en el comportamiento de un suelo arcilloso. Se observó un claro aumento en los parámetros de resistencia al corte, siendo más notorio este incremento en el suelo reforzado con fibras de polipropileno.

Por su parte, investigadores de México llegaron a la conclusión que el incremento en la resistencia al corte del suelo reforzado tiende a un límite asintótico al aumentar el contenido de fibras (Almanza A. 2015). Además, estudios realizados sobre suelos cohesivos reforzados con fibras de poliéster mostraron que la resistencia a la compresión confinada aumenta con el contenido de fibras, y para un contenido de fibras constante, con la longitud de fibras (Rosales H. 2014).

Estados Unidos es uno de los países con mayor producción científica referente al tema de reforzamiento de suelos, además cuenta con dos proyectos exitosos de aplicación con este método. Uno de ellos, fue la construcción de la autopista “President George Bush Turnpike” en Dallas, Texas. El proyecto consistió en la construcción de un tramo de autopista de 6 carriles a través de una extensa área de suelos residuales. El terraplén de la autopista fue construido con el suelo del lugar, con taludes 4:1. A los fines de prevenir fallas superficiales en el terraplén, se reforzó la parte superior de los taludes con fibras. El segundo proyecto consistió en la reparación de 2000 m lineales de un terraplén a lo largo del lago Joe Pool en la ciudad de Grand Prairie, Texas. El terraplén había sido construido en la década del 80 por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, y estaba conformado por arcillas expansivas. Para el año 2003, las fallas en los taludes del terraplén eran importantes y comenzaron a dañar parte del pavimento. Se adoptó para la reparación del mismo el uso de suelos reforzados con fibras. Para ambos proyectos se utilizaron fibras de polipropileno con un tratamiento de carbono para limitar el daño por los rayos UV de la luz solar. (Andersland & Khattak 1979)

El reforzamiento de suelos con fibras en el Perú, tanto en investigación como en aplicación, es todavía un campo inexplorado, sin embargo, como concepto o como solución, se usa hace cientos de años; el ejemplo más tradicional es la inserción de paja en el barro para formar adobe, esto no es más que la inserción de fibras (naturales en este caso) dentro de un suelo para darle la resistencia a la tracción que este no posee. Por otro lado, el reforzamiento de suelos en el Perú se viene utilizando hace más de dos décadas, principalmente mediante el

uso de geosintéticos; el ingeniero Manuel Ferrer Santiago, Project Manager de Maccaferri Perú (2016), sostuvo que el reforzamiento de suelo en el país tiene muchas aplicaciones:

“Una de ellas es para lo que es intercambios viales y principalmente se utiliza para salvar esos desniveles donde se necesita conformar una vía, terraplén o un talud. En algunos casos en donde son alturas pequeñas (de 2 metros a 5 metros) se suelen usar muros de concreto armado, pero cuando se supera los cinco metros se tiende a utilizar el suelo reforzado porque representa un ahorro en costos de alrededor del 30% dependiendo de la altura”. Es así que en el país el reforzamiento de suelos con geosintéticos ha significado un avance tecnológico efectivo ante el problema de suelos carentes de propiedades necesarias para su uso como fundaciones, en pavimentos o para la construcción de estructuras terreas en obras viales. (Sherwell Betancourt 2014)

En el departamento La libertad, no existen referentes de investigación o aplicación de reforzamiento de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras sintéticas, sin embargo, se han venido estudiando otros tipos de mejoramiento de suelos no convencionales como el uso de cenizas volantes, escoria de alto horno y aditivos. Sin embargo, ante la prioridad de cerrar las brechas de infraestructura en la región, además de reducir el impacto ambiental producido por diversos desechos, se hace necesario investigar nuevos métodos de mejoramiento ecológicos de suelos como el reforzamiento con fibras de polímeros reciclados (PET) y así poder utilizar recursos terreos que un inicio no cumplían con características óptimas para la construcción de obras civiles.

El mejoramiento de suelos para su uso en obras civiles como estructuras terreas en carreteras (terraplenes en corte y relleno) se encuentran normados y regulados por el MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DEL PERÚ en el manual de carreteras de “Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos – Sección Suelos Y Pavimentos” (2013) y en el manual de carreteras de “Especificaciones Técnicas Generales para Construcción” (EG 2013). En estos documentos técnicos se especifica que para poder utilizar suelos cohesivos en terraplenes primero se tiene que aplicar algún mecanismo de mejoramiento, sin embargo, cabe mencionar que en el Perú el uso de fibras sintéticas para el reforzamiento de suelos y su uso en obras viales aún no se encuentra normado ni regulado, debido a la escasa investigación de dicha metodología.

Almanza (2015) investigo el uso de fibras de polietileno teraftalato reciclado para el

mejoramiento de suelos arcillosos con alto índice de plasticidad y su uso en bordos para protección de ríos. Concluyo que el reforzamiento de suelos con fibras de PET recicladas presenta una mejora bastante considerable, por lo cual el suelo reforzado permite que el bordo se adapte de manera continua a la deformación del suelo en el cual se desplanta sin sufrir agrietamiento y de esta manera reducir el riesgo de turificación y falla.

Rosales (2014) investigo el uso de fibras de polipropileno para el mejoramiento de suelos arcillosos expansivos. Concluyo que la dosificación de la fibra desempeña un papel importante en la resistencia a la compresión no confinada del composite, obteniéndose un mejor desempeño en general con mayores dosificaciones de fibra y que a pesar de que la longitud de la fibra no es una variable estadísticamente significativa en la obtención de mejores resultados, si lo es en el proceso de mezclado, teniéndose un mejor mezclado al ir disminuyendo la longitud de la fibra. Además, La inclusión de las fibras genera un comportamiento más dúctil ante pruebas de tensión en comparación al suelo sin refuerzo, el cual presenta una falla frágil. En general la inclusión de fibras en el suelo presenta mejoras en varios parámetros de resistencia mecánica, de mayor y menor magnitud dependiendo del ensayo, pero se puede considerar al fibro reforzamiento como una técnica competente y con ventajas técnicas.

Li et al. (2014) experimentaron con fibras de polipropileno para medir el efecto que causaban en la resistencia a tensión cuando se mezclaban con una arcilla de baja compresibilidad. Mezclaron el suelo con fibras de polipropileno de 12 mm de largo a cinco distintos porcentajes de dosificación ($f=0\%$, 0.05% , 0.1% , 0.15% y 0.2%) y lo compactaron a un mismo contenido de agua ($w=16.6\%$) y con el mismo peso específico seco (igual a $\gamma_d=1.7$ Mg/m³). Como también midieron el efecto del contenido de agua en la resistencia a tensión, utilizaron cuatro contenidos de agua distintos ($w=14.5\%$, 16.5% , 18.5% y 20.5%) utilizando la misma dosificación de fibras ($f=0.1\%$) y el mismo peso específico seco ($\gamma_d=1.7$ Mg/m³). A fin de investigar el efecto del peso específico seco del suelo en la resistencia a la tensión prepararon probetas compactadas a diferentes pesos específicos secos ($\gamma_d=1.4$, 1.5 , 1.6 y 1.7 Mg/m³) y con el mismo contenido de fibra ($f=0.1\%$) y el mismo contenido de agua ($w=16.6\%$).

Zaimoglu y Yetimoglu (2012) experimentaron con un limo de alta compresibilidad (MH) la cual reforzaron con fibras de polipropileno. Utilizaron los siguientes incrementos de

sustitución en cuanto a peso seco del suelo para la dosificación de la fibra; 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1%. Mezclaron las fibras con el suelo a su contenido de humedad óptimo determinado mediante el procedimiento de compactación Proctor estándar. De acuerdo a los autores, la orientación del refuerzo juega un papel importante en el proceso de refuerzo.

Chegenizadeh y Nikraz (2011) reforzaron un limo de baja compresibilidad con el caolín como mineral predominante con fibras macro estructurales de polipropileno, cabe resaltar que esta fibra es utilizada ampliamente como material de refuerzo secundario en el concreto, tiene gran aplicación en el colado de losas de piso en naves industriales, así como en la ingeniería de taludes y túneles como refuerzo del concreto lanzado. Sin embargo, en cuanto a su mezclado con el suelo, esta investigación es la única donde se pudo encontrar la utilización de fibras del tipo macro estructural. Se utilizaron fibras con longitudes de 10-20-30mm a 0.5%, 1% y 2%. Realizaron ensayos de compresión no confinada, encontrando mejoras en cuanto a la resistencia compresión no confinada al aumentar el contenido de fibra y al aumentar la relación de aspecto de la misma.

Viswanadham et al. (2009) realizaron un estudio para evaluar la factibilidad del uso de fibras en un suelo expansivo para reducir su potencial expansivo a través de pruebas de expansión consolidación unidimensional. Analizaron el comportamiento expansivo suelos no reforzados y lo compararon con el de suelos reforzados con fibras polipropileno. De las pruebas en el consolidómetro se determinó la expansión libre y el potencial de expansión del suelo. El diseño del experimento fue variar la geometría de la fibra respecto a las relaciones de aspecto (la razón de la longitud y el diámetro) de 15,30 y 45 con las dosificaciones de 0.25% y 0.5% (de peso de suelo seco).

Al-Akharas et al. (2008) investigó el efecto de las fibras naturales y sintéticas en la expansión de los suelos arcillosos. Concluyó que un incremento en el contenido de fibra de ambos tipos disminuía el potencial de expansión de los suelos arcillosos de forma significativa.

Kumar et al. (2006) investigaron el efecto de la adición de fibras de poliéster dentro de arcillas suaves. Realizaron ensayos de compresión inconfiada. Ellos reportaron que se presentó un incremento en la resistencia a la compresión inconfiada de la arcilla debido a la adición de las fibras de poliéster.

Consoli et al. (2003) utilizaron fibras de polipropileno de diferentes longitudes y

diámetros y varios contenidos de fibra para reforzar suelos arenosos. También concluyeron que con las fibras largas, los especímenes de suelo mostraron un comportamiento más resistente al final de los ensayos. Ellos también concluyeron que los esfuerzos desviadores se incrementaron con la longitud de la fibra, relación de aspecto de la fibra y contenido, mientras que decreció con el incremento del diámetro de la fibra.

Wang (1999) usó carpetas de fibras de desecho recicladas para reforzar el suelo y el concreto. El concluyó que estas incrementan la resistencia a la compresión y la ductilidad. También observó que los especímenes exhibieron un incremento significativo en la resistencia máxima, cercano al 303%.

Ghavami et al. (1999) introdujeron la aplicación de fibras de coco como material de refuerzo dentro del suelo. Ellos encontraron que la resistencia del espécimen reforzado se incrementó en un 4% con un contenido ligero de fibra pero la ductilidad creció de manera significativa, en la cual la deformación a la falla se incrementó de 4% a 25%.

Ranjan et al. (1996) investigaron el efecto de las fibras sintéticas y naturales colocadas de forma aleatoria en suelos arenosos. Los resultados de sus ensayos indicaron que por debajo de la presión de confinamiento crítica las fibras tienden a deslizarse. La presión de confinamiento crítica es función de la relación de aspecto de la fibra. También concluyeron que la resistencia al corte del suelo reforzado se incrementa con la inclusión de fibra.

Maher y Gray (1990) investigaron el efecto de la presión de confinamiento, la granulometría del suelo (tamaño de partícula, forma y gradación) y las propiedades de la fibra (contenido, relación de aspecto y módulo de elasticidad) en la respuesta de especímenes reforzados, ensayados bajo carga estática. Concluyeron que la presión crítica de confinamiento es función de la relación de aspecto de la fibra, el tamaño del grano y la gradación del contenido de fibra y de la cantidad de granos de tamaño medio. Encontraron que el máximo incremento en la resistencia de una arena reforzada ocurre a esfuerzos de confinamiento menores que el del valor de la presión crítica. La presión de confinamiento crítico disminuye con el incremento en la relación de aspecto de la fibra (l/d).

El reforzamiento de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras sintéticas ha venido siendo estudiado durante más de una década, teniendo resultados favorables en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de este tipo de suelos, que muchas veces debido a sus bajas prestaciones hace imposible su uso en obras civiles, tales como estructuras terreas en

obras viales (terraplenes). El aumento del ángulo de fricción y resistencia a la deformación lograda en la casi totalidad de estudios investigados con anterioridad, a diferentes longitudes de fibras y porcentajes de adición, permiten deducir que el uso de fibras sintéticas en el reforzamiento de suelos es una alternativa de bastante utilidad para la ingeniería civil, por lo cual merece la atención debida de los investigadores peruanos involucrados en el área de la construcción y geotecnia, para que con los estudios y experimentos necesarios se pueda lograr normar el uso de este tipo de metodologías y empezar su aplicación real en las obras civiles a nivel nacional. Por otro lado, el estudio de este tipo de mejoramiento de suelos con fibras, contribuye con una nueva alternativa de reciclaje al reutilizar como fibras a los desechos plásticos de consumo desmesurado como son el PET, de esta manera se consigue la disminución de la contaminación ambiental que hoy en día es un problema a nivel mundial.

En el Perú aún no se ha implementado el uso de reforzamiento de suelos utilizando fibras sintéticas de distribución aleatoria, por lo cual no existen casos de aplicación con esta metodología, sin embargo, el concepto de reforzamiento de suelos ha sido manejado en varios proyectos, a través del uso de geomallas, persiguiendo los mismos fines: mejorar la estabilidad y resistencia a las deformaciones de estructuras terreas, a continuación, se presentan dos casos:

PROYECTO 1: ESTABILIDAD Y CONTENCIÓN MURO DE SUELO REFORZADO CON GEOSINTÉTICOS SHOUGANG, como parte de la ampliación y mejora tecnología de la unidad minera Shougang Hierro Perú, se dispuso el diseño y la construcción de muros de suelo reforzado con geosintéticos dentro de tres plataformas. Las alturas de los muros a ser proyectados variaban desde 1 m. a 7 m. de altura, este trabajo fue realizado por la empresa TDM – Perú Group.

- FECHA DE EJECUCIÓN: 2015
- UBICACIÓN GEOGRÁFICA: DISTRITO DE MARCONA, PROVINCIA DE NASCA, DEPARTAMENTO DE ICA, Perú. a 100 msnm.
- ENTIDAD CONTRATANTE: SHOUGANG HIERRO PERÚ S.A.A
- CONTRATISTA: CONST. ABENGOA PERÚ
- PRODUCTOS UTILIZADOS: GEOMALLAS UNIAXIALES UX, GEOMANTA P300, GEOTEXTILNO TEJIDO GT, GEOMALLAS BIAXIALES BX,

GEOCOMPUESTO DE DRENAJE, TUBERÍAS DOBLE PARED HDPE.

PROYECTO 2: ESTABILIDAD Y CONTENCIÓN MUROS MINA DE RÍO CLARO SISTEMA SIERRA, OMNYA requería una plataforma de acceso para las volquetas con la finalidad de alimentar la tolva de su planta de trituración, la solución convencional correspondía a un muro en concreto reforzado, sin embargo, el espacio era insuficiente y los costos elevados. La solución fue un muro en tierra mecánicamente estabilizada mediante el sistema Sierra de Tensar, con el cual se pudo lograr la altura necesaria desde la base de la trituradora hasta la entrada de la misma que permitió el acceso de las volquetas, este trabajo fue realizado por la empresa Maccaferri – Perú.

- FECHA DE EJECUCIÓN: 2015
- UBICACIÓN GEOGRÁFICA: OCCIDENTE COLOMBIANO.
- ENTIDAD CONTRATANTE: MINAS DE RIO CLARO
- CONTRATISTA: CAC S.A.
- PRODUCTOS UTILIZADOS: GEOMALLAS UNIAXIALES TENSAR (UX 1500), GEOMALLASBIAXIALES (BX 30-30), GEOCOMPUESTO DE DRENAJE (GEODREN PLANAR), TUBERÍA DE DRENAJE (Conducción y descarga) Y ACCESORIOS EN HDPE, CANASTAS EN ACERO GALVANIZADO (FACHADA MURO).

Los suelos cohesivos generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de terraplenes o pavimentación, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza; este tipo de suelos presentan altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta el trabajo y su uso para construir obras viales. (Rosales H., 2014) Para el caso de los terraplenes de obras viales, es lógico y sustentable el utilizar el mismo suelo de la zona para su construcción (Almanza A., 2015), sin embargo, es común encontrar suelos cohesivos en los tramos carreteros proyectados, por lo cual para el empleo de estos suelos primero se tiene que utilizar procesos químicos o físicos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, o en su defecto hacer un reemplazo total del suelo cohesivo, lo cual demanda grandes inversiones económicas y de recursos naturales.

En el Perú se cuenta con una gran diversidad de tipologías terrestres, la cual es un factor determinante en la construcción de obras viales, además, dependiendo del lugar del proyecto es posible que no se cuenten con canteras de material granular para poder realizar las

mejoras necesarias en caso se tenga un suelo cohesivo, para solucionar este problema, según el MTC, se deben emplear alternativas de estabilización y reforzamiento para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados y en el caso de terraplenes: por el consumo y desecho excesivo de materia prima (incrementándose costos por movimiento de tierras); es así que se hace de interés nacional investigar nuevas metodologías de mejoramiento de suelos para la construcción de obras viales en caso se encuentra en una zona de suelos con bajas prestaciones ingenieriles. (López Ortiz 2006)

Por otro lado, en la actualidad es difícil prescindir de los plásticos, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera a casi todas las actividades industriales. En el Perú existen más de 100 mil recicladores pero su actividad está limitada por no haber un mercado de reúso de PET, esto debido a políticas restrictivas e informalidad (ONG Ciudad Saludable, 2016). Es por esto que se hace imperativo la necesidad de investigar nuevos métodos de reutilización de plásticos PET, a través de sus diversas formas de reciclaje como lo es su conversión a fibras de PET; las cuales pueden tener un alto valor de uso para la industria de la construcción.

En el Perú el empleo de fibras poliméricas (principalmente polipropileno) viene siendo investigado con óptimos resultados en el campo de la mejora del concreto hidráulico, así mismo, se tiene referentes históricos del uso de fibras orgánicas para el aumento de las prestaciones del adobe en construcción; sin embargo, el tema de reforzamiento de suelos con fibras sintéticas es un terreno prácticamente inexplorado, tanto a nivel de investigación como de aplicación; por otro lado, en nuestro país existe una amplia variedad de tipologías terrestres que hacen necesario la existencia de nuevos estudios que contribuyan con metodologías para el mejoramiento de los suelos que no cumplen con las características necesarias para ser utilizados en obras civiles. (Almanza Álvarez 2015)

Para terraplenes de obras viales, el principio general que debe presidir en su construcción consiste en utilizar al máximo posible los materiales disponibles de las excavaciones y obras complementarias; sin embargo, cuando las condiciones de los materiales no son óptimos, como es el caso de suelos cohesivos, y al no existir investigaciones de alternativas técnicas para su uso que aseguren la estabilidad, resistencia y deformabilidad sin

agrietarse de la estructura terrea conformada, se recurre al uso de material de préstamo para su construcción lo cual deriva en una sobreexplotación de recursos naturales.

Es así que en búsqueda de una solución integral, la presente investigación plantea mejorar las propiedades mecánicas de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado como material de refuerzo, mediante el estudio experimental en laboratorio con diferentes longitudes y porcentajes de adición de fibras PET, para luego evaluar matemáticamente el desempeño de los terraplenes con suelo reforzado a nivel de estabilidad y deformación ; de esta manera se contribuye con el estudio de una alternativa técnica para la problemática de construir terraplenes de obras viales cuando se tienen un suelo cohesivo, del mismo modo se busca dar a conocer una alternativa de reutilización y reciclaje para los residuos PET, contribuyendo así con la mitigación del impacto ambiental producido por dichos desechos.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) en el reforzamiento de suelos cohesivos para uso en terraplenes de obras viales?

1.3. Justificación

Los suelos cohesivos generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de terraplenes o pavimentación, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza; este tipo de suelos presentan altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta el trabajo y su uso para estructuras terreas. (Rosales H., 2014) Para el caso de los terraplenes de obras viales, es lógico y sustentable el utilizar el mismo suelo de la zona para su construcción (Almanza 2015), sin embargo, debido a que en el Perú se cuenta con una gran diversidad de tipologías terrestres, es común encontrar suelos cohesivos en los tramos carreteros proyectados, por lo cual para el empleo de estos suelos primero se tiene que utilizar procesos químicos o físicos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, o en su defecto hacer un reemplazo total del suelo cohesivo, lo cual demanda grandes inversiones económicas y sobreexplotación de recursos naturales; es así que se hace de interés nacional investigar nuevas metodologías de mejoramiento de suelos para la construcción terraplenes en caso se tenga que construir en una zona con suelos de bajas prestaciones ingenieriles.

Una de las técnicas de mejoramiento de suelos que ha estado cobrando auge en los últimos años es la de los suelos reforzados con fibras o también llamados fibro reforzados. Si

bien el refuerzo de los suelos u otros materiales mediante la adición de fibras es una técnica bastante antigua (Jones 1975; Silveira et al. 2012), ya sea en el refuerzo de ladrillos, muros o incluso en terraplenes, el auge de las industrias del procesamiento de fibras textiles, poliméricas y de acero abre nuevas posibilidades para la utilización de estas como una solución a distintos problemas geotécnicos. Cuando se refuerza algún material (en este caso el suelo), el material de refuerzo debe tener una o un conjunto de propiedades que hagan falta en el material original (Jones 1975).

Las fibras mejorarán aspectos mecánicos que el suelo en su estado natural no tendría, ya que, al ser introducidas de una manera aleatoria en el suelo, generarán un aumento en la resistencia del mismo, obteniendo así un terreno más apto para la construcción de terraplenes en obras viales.

En comparación con los geosintéticos convencionales (geomallas, geotextiles, etc.), algunas de las ventajas de usar fibras se pueden enumerar de la siguiente manera:

- 1) Las fibras discretas son simplemente adheridas y mezcladas con el suelo, como cualquier mezcla de suelo con cemento, cal o cualquier otro aditivo.
- 2) Las fibras distribuidas aleatoriamente limitan planos potenciales de debilitamiento que se puedan generar en dirección paralela al refuerzo convencional orientado horizontalmente.
- 3) La inclusión de fibras solo cambia las propiedades físicas del suelo y no tiene impacto en el ambiente.
- 4) El uso de fibras derivadas del reciclaje de polímeros PET u otros, contribuyen a la reducción del impacto ambiental asociado a su excesiva acumulación.

La investigación se centra en el estudio de nuevas alternativas técnicas para viabilizar el uso de suelos cohesivos en la construcción de terraplenes de obras viales. Esto mediante el mejoramiento de sus propiedades mecánicas del suelo a través de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) como material de refuerzo, realizando estudios experimentales en laboratorio con diferentes longitudes y porcentajes de adición de fibras PET, para luego evaluar matemáticamente con software especializado el desempeño de los terraplenes reforzados; asegurando la estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de la estructura terrea conformada, evitando así que se recurra al uso de material de préstamo, lo cual deriva en una sobreexplotación de recursos naturales.

Actualmente comienza a generarse una conciencia global acerca de la contaminación del planeta y del manejo coherente de los recursos. Conforme el tiempo avanza, cada vez se vuelve más difícil la obtención de ciertos minerales, así como de ciertas materias primas, lo que ha incentivado a los investigadores alrededor del mundo a la búsqueda de materiales alternativos, al reciclaje de materiales de desperdicio, así como a la búsqueda de nuevos campos de aplicación de materiales renovables ya existentes.

Es así como la presente investigación contribuye con el estudio de una alternativa técnica para la problemática de construir terraplenes de obras viales cuando se tienen un suelo cohesivo, del mismo modo que, busca dar a conocer una alternativa de reutilización y reciclaje para los residuos PET, contribuyendo así con la mitigación del impacto ambiental asociado a su consumo excesivo y acumulación.

Con este trabajo de investigación, se contribuye académicamente a la generación de nuevos conocimientos, modelos y conceptos, así como el desarrollo de una investigación sistematizada cuyos resultados pueden convertirse en antecedentes. El estudio también pretende generar información para que se pueda analizar la posibilidad de la utilización del suelo reforzado con fibras PET como suelo de fundación en una futura investigación, así como su conveniencia en aplicaciones geotécnicas de refuerzo como muros y taludes mecánicamente estabilizados o en el refuerzo de la subrasante en pavimentos flexibles. La simulación y los resultados de los estudios de desempeño del suelo reforzado en terraplenes pueden ser usados para explorar nuevas opciones en tamaños y tipos de fibras derivadas de materiales de desecho que puedan ser utilizadas, manteniendo en cada caso una buena relación costo-efectividad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Determinar cuál es el estudio de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) en el reforzamiento de suelos cohesivos para la viabilidad de su uso en terraplenes de obras viales.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- i Caracterizar geotécnicamente el suelo cohesivo en estado natural, así como evaluar sus propiedades mecánicas bajo las normas ASTM y MTC., a la Altura del Km. 52 del sector de Plazapampa.

- ii Conformar mezclas de suelos cohesivos reforzados variando el porcentaje de adición y la longitud de las fibras PET utilizadas.
- iii Determinar los parámetros geotécnicos de resistencia - deformación del suelo cohesivo en estado natural y las diferentes combinaciones de suelos cohesivos reforzados con fibras PET, realizando pruebas de compresión triaxial estática (no consolidada, no drenada) y ensayos de Capacidad de Soporte Relativo del suelo (CBR), bajo las normas ASTM y MTC.
- iv Evaluar el desempeño de terraplenes conformados por suelos cohesivos con y sin reforzamiento de fibras PET, a partir de los parámetros geotécnicos obtenidos, mediante el modelamiento y análisis matemático con el software SLIDE 6.0., bajo los parámetros de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse.
- v Determinar el porcentaje óptimo de fibras PET que se debe agregar a suelos cohesivos para viabilizar su uso en terraplenes, presentando una alternativa para el rehúso a gran escala de materiales de desecho, a partir de fibras derivadas del reciclaje del PET en obras geotécnicas, disminuyendo el impacto ambiental asociado.

1.5. Antecedentes

“ESTUDIO DEL USO DE POLIETILENO TEREFALATO COMO MATERIAL DE REFUERZO DE ESTRUCTURAS TÉRREAS CONFORMADAS POR SUELOS COHESIVOS”

AUTOR: (Almanza A., 2015). OBJETIVO: Utilizar fibras de polietileno tereftalato reciclado para el mejoramiento de suelos arcillosos con alto índice de plasticidad y aplicarlo en bordos para protección de ríos. METODOLOGÍA: Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo cohesivo, para luego encontrar el mezclado óptimo a diferentes porcentajes de adición entre el suelo y las fibras PET de 50 mm, a continuación, se hacen los ensayos de resistencia y desempeño, para finalmente, con los parámetros geotécnicos determinados, se modele numéricamente los terraplenes conformados por el suelo reforzado con fibras. RESULTADO: El reforzamiento de suelos cohesivos con fibras PET incrementa el ángulo de fricción y disminuye la cohesión, sin embargo, en el análisis de estabilidad y deformación del terraplén con suelo reforzado, se

cumple con los parámetros de seguridad. **CONCLUSIÓN:** El reforzamiento de suelos con fibras de PET recicladas presenta una mejora bastante considerable, por lo cual el suelo reforzado permite que el bordo se adapte de manera continua a la deformación del suelo en el cual se desplanta sin sufrir agrietamiento y de esta manera reducir el riesgo de tubificación y falla.

APORTE: La metodología sustentada es de gran utilidad para poder lograr un mezclado óptimo entre las fibras PET y el suelo a reforzar. Del mismo modo, permite tener una visualización más precisa del efecto que tiene el uso de suelo reforzado con fibras en estructuras térreas, siendo los porcentajes 0.6% y 1.0% los que reflejan un mejor resultado.

“MEJORAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS”

AUTOR: Rosales H., (2014). **OBJETIVO:** Utilizar fibras de polipropileno para el mejoramiento de suelos arcillosos expansivos. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo arcilloso expansivo obtenido de una zona de riesgo en México, para luego encontrar el mezclado óptimo a diferentes porcentajes de adición entre el suelo y las fibras de polipropileno de 20 mm, a continuación, se hacen los ensayos de resistencia y ensayos de cambio volumétrico, para finalmente, realizar una comparación entre los suelos con y sin refuerzo. **RESULTADO:** La dosificación de la fibra desempeña un papel importante en la resistencia a la compresión no confinada del composite, obteniéndose un mejor desempeño en general con mayores dosificaciones de fibra y que a pesar de que la longitud de la fibra no es una variable estadísticamente significativa en la obtención de mejores resultados, si lo es en el proceso de mezclado, teniéndose un mejor mezclado al ir disminuyendo la longitud de la fibra. Además, La inclusión de las fibras genera un comportamiento más dúctil ante pruebas de tensión en comparación al suelo sin refuerzo, el cual presenta una falla frágil. **CONCLUSIÓN:** La inclusión de fibras en el suelo presenta mejoras en varios parámetros de resistencia mecánica, de mayor y menor magnitud dependiendo del ensayo, pero se puede considerar al fibro reforzamiento como una técnica competente y con ventajas técnicas.

APORTE: Los resultados verifican que las adiciones de fibras sintéticas a base de polímeros mejoran considerablemente las propiedades de los suelos de bajas prestaciones ingenieriles, teniendo como parámetros de control: el tamaño de la fibra a utilizar y la cantidad de adición (no mayor a 2%, según recomendación de la tesis señalada).

“SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON MATERIALES DE PLÁSTICO RECICLADO (PET)”

AUTOR: López Ortiz, (2015). **OBJETIVO:** Analizar el cambio a la resistencia al corte de un suelo arcilloso cuando se adicionan fibras de materiales de plástico reciclado. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se hizo necesaria la caracterización geotécnica del suelo arcilloso, luego se elaboran manualmente las fibras de PET a partir de botellas recicladas, a continuación, se realiza el mezclado suelo- fibras PET de 30 mm y 50 mm a diferentes porcentajes. Finalmente se realizan ensayos de resistencia y desempeño. **RESULTADO:** Se observan mayores esfuerzos con fibras de longitud corta a mayor contenido de fibra, esto puede ser debido a que las longitudes largas con mayor contenido de fibra no se dejan moldear y se desmoronan fácilmente, generando poca adherencia entre las partículas del suelo.

APORTE: Con la presente tesis se demuestra que a medida que la cantidad de porcentaje de fibra aumenta la resistencia del suelo también aumenta al igual que la deformación, por tal razón los esfuerzos a cortante son mayores y la ductilidad crece. Además, para la aplicación en proyectos de ingeniería se puede tener en cuenta que los suelos pueden ser reforzados con plástico reciclado, para mejorar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos, con porcentajes ideales entre 0.2 y 2.0%.

“EFECTO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO MEDIANTE EL USO DE FIBRAS ARTIFICIALES”

AUTOR: Fresneda et al., (2014). **OBJETIVO:** Utilizar las fibras de polipropileno como técnica de reforzamiento para un suelo superficial característico de los depósitos coluviales del Valle de Aburrá. **METODOLOGÍA:** Para la realización de los diferentes ensayos se realizaron apiques de 80 cm de profundidad y se recolectaron muestras alteradas en bolsa y muestras inalteradas en tubo shelby. Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Facultad de Minas, para la ejecución de dichos ensayos. Se realizaron ensayos con el fin de hacer una caracterización física y mecánica del suelo en estado natural; y ensayos que permitieran determinar el aporte de las fibras en el comportamiento del suelo ante diferentes eventos de distribución de esfuerzos. Para el suelo reforzado con fibras se analizará el comportamiento ante la aplicación de esfuerzos axiales en condiciones confinada y confinada mediante el ensayo de Compresión simple y el índice de

CBR respectivamente, las pruebas proporcionan la información necesaria para llevar a cabo la comparación entre el suelo en estado natural y reforzado en las condiciones ya mencionadas. **RESULTADO:** Los resultados de esta investigación muestran una mayor capacidad de deformación al contener las fibras sintéticas, en estas condiciones el suelo alcanzó aproximadamente un aumento del 45% con respecto al suelo sin reforzar. Los resultados obtenidos en los ensayos para la determinación del Índice de CBR mostraron que las fibras no aportaron resistencias adicionales al ser incorporadas al suelo, situación que se atribuye a la poca adherencia entre las fibras laminares de textura lisa y el suelo. **CONCLUSIÓN:** La implementación de fibras de forma ondulada o que tengan una textura corrugada pueden favorecer la adherencia del material con el suelo, y por lo tanto ofrecer mayor resistencia a la tracción.

APORTE: En la presente investigación se verifica que las fibras no aportaron resistencias adicionales al ser incorporadas al suelo, situación que se atribuye a la poca adherencia entre las fibras laminares de textura lisa y el suelo, esta falta de adherencia no permite que se genere resistencia a la tracción. Por lo que se intuye que fibras más finas se distribuirían mejor en el suelo y podrían permitir que se presente mayor adhesión.

“SUELOS REFORZADOS CON FIBRAS: ESTADO DEL ARTE Y APLICACIONES”

AUTOR: Li C. (2005) **OBJETIVO:** Revisar y analizar la bibliografía existente sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Para vislumbrar el mecanismo de interacción entre las fibras y el suelo, y cómo éste modifica los parámetros de resistencia al corte y rigidez del suelo reforzado. **METODOLOGÍA:** Para lograr el objetivo de la investigación se empieza realizando la revisión bibliográfica sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Se analizan los tipos y contenidos usuales de fibras empleados tanto en suelos granulares como cohesivos. Asimismo, se describen algunos modelos predictivos desarrollados en la literatura. Se discuten los diferentes enfoques existentes en la bibliografía para abordar el tema. **RESULTADO:** Los diferentes estudios concuerdan en que la resistencia al corte se incrementa al introducir fibras a la matriz de suelo. Sin embargo, no existe acuerdo respecto al efecto que la adición de fibras produce en la rigidez del suelo reforzado. Las diferencias en las conclusiones a las que arriban las diferentes investigaciones pueden ser explicadas por las

numerosas variables involucradas en el estudio del suelo reforzado con fibras, y por los diferentes enfoques con que los estudios han sido conducidos. **CONCLUSIÓN:** La incorporación de fibras aumenta la resistencia al corte principalmente a grandes deformaciones. Son muchas las potenciales aplicaciones del suelo reforzado con fibras. **APORTE:** La presente investigación aporta con una base teórica que da a conocer que la adición de diferentes tipos de fibras sintéticas al suelo aumenta la resistencia al corte a grandes niveles de deformación. Por lo cual se avala su uso en el mejoramiento de suelos tanto cohesivos como granulares, así mismo, en la construcción de estructuras terreas y como estabilizador de taludes, al hacer un estudio de casos aplicativos de éxito.

1.6. Bases Teóricas

1.6.1. Suelos cohesivos, naturaleza y problemática.

1.6.1.1. *Comportamiento de los suelos cohesivos.*

Los factores medioambientales del área en la que se sitúen los suelos cohesivos juegan un papel importante en el comportamiento de estos mismos. La frecuencia de la lluvia, la tasa de evaporación, así como la profundidad y la actividad de la arcilla, son parámetros importantes en el desarrollo de las propiedades ingenieriles del suelo. (Juárez Badillo, 2007)

El daño en las estructuras terreas es causado principalmente por deformaciones y expansiones internas en el suelo cohesivo conformante. La expansión diferencial en los suelos cohesivos está en función de numerosas variables, tales como, el espesor del estrato arcilloso, variaciones en el contenido de agua debajo de la estructura, la heterogeneidad del estrato y otras causas más relacionadas con el uso de la estructura en particular. También pueden ser causados por cambios en las situaciones locales, tales como los rompimientos de drenaje o tubería de agua potable, el regado de jardines y también el diseño pobre en el drenaje superficial (Gromko 1974).

El mineral arcilloso juega un papel importante en la determinación de la expansión en suelos cohesivos. De los tres tipos principales de minerales arcillosos –illita, kaolinita, montomorillonita- la última posee la característica de expandir más que las otras. El potencial de expandir del mineral depende de la estructura cristalina de la hoja, la estructura del conjunto de hojas, y la capacidad de cambio de cationes del mineral.

Las partículas de la arcilla son muy pequeñas y su forma está determinada por el arreglo de capas delgadas de láminas cristalinas, junto con otros elementos que pueden ser incorporados en la estructura del mineral de arcilla (hidrógeno, sodio, calcio, magnesio, azufre). La presencia y abundancia de estos iones disueltos puede tener un gran impacto en el comportamiento de los minerales de arcilla. En una arcilla expansiva la estructura molecular y el arreglo de las láminas cristalinas tiene una afinidad particular a atraer y mantener moléculas de agua entre las láminas cristalinas en un enlace fuerte teniendo un efecto como de “sándwich”. A causa de la estructura eléctrica dipolar de las moléculas del agua, tienen una atracción electroquímica a las láminas de arcilla. El mecanismo por el cual estas moléculas se juntan unas con otras se llama adsorción. El mineral arcilloso montmorillonita, que es parte de la familia de las smectitas, puede adsorber grandes cantidades de moléculas de agua entre sus láminas, y por lo tanto tiene un gran potencial de expansión y contracción (Mitchel y Soga, 2005).

Las bajas propiedades ingenieriles del suelo cohesivo dependen de los siguientes factores (Gromko 1974):

- Tipo de mineral y cantidad: El tipo de mineral se puede determinar mediante el microscopio óptico y de electrones, difracción de rayos x, análisis térmico diferencial, análisis infrarrojo, absorción de colorante, y técnicas de análisis químicos. La expansión también depende de ion intercambiable y la estructura laminar. Partículas menores permiten mayor absorción de agua por unidad de volumen de la partícula de arcilla.
- Densidad: Las arcillas densas expandirán más cuando se humedezcan, comparadas con la misma arcilla a una menor densidad y con el mismo contenido de agua.
- Condiciones de carga: Las sobrecargas estructurales reducirán la expansión a tal grado que se puede inhibir en la presencia de agua. Permitir una pequeña cantidad de expansión reduce ampliamente las presiones de expansión.
- Estructura del suelo: La historia de esfuerzos influencia la expansión. Arcillas expansivas inalteradas o cementadas poseen alta resistencia a la deformación y pueden absorber parte de la presión de expansión. Las arcillas remoldeadas expanden más que las anteriores bajo condiciones idénticas. Remoldear arcillas

inalteradas reduce la rigidez inicial a alto esfuerzo cortante, y alinea preferencialmente los granos planos en dirección normal a las fuerzas de compactación. Los suelos con partículas alineadas preferencialmente expanden más en dirección normal a las láminas minerales que en dirección paralela.

- Tiempo: La transmisión de humedad es lenta y requiere semanas e incluso años para saturarse, esto depende de la permeabilidad y del espesor del estrato.
- Fluido en poros: Un alto pH favorece la disociación de cationes. Concentraciones altas de sal en el agua libre pueden causar menos absorción de agua y por lo tanto menor expansión.
- Contenido de agua: Las arcillas secas expandirán más que sus contrapartes húmedas debido a la relación directa entre el contenido de agua y las presiones de succión.

En general, el rendimiento a largo plazo de cualquier estructura geotécnica depende de la solidez de los suelos subyacentes. Los suelos inestables / expansivos pueden crear problemas importantes para pavimentos o estructuras. El suelo de algodón negro es un suelo expansivo con poca resistencia capacidad cuando se somete a humedad, tiene la capacidad de absorber y disipar agua con cambio subsecuente en el volumen. La construcción de cualquier estructura en este tipo de suelo requiere ya sea la sustitución del suelo por la importación de una mejor extranjera o mediante la adición de productos químicos que mejorará el suelo hacia la propiedad deseada. (Wang 1999)

La construcción exitosa de carreteras requiere la construcción de una estructura que sea capaz de soportar las cargas de tráfico impuestas. Una de las capas más importantes de la carretera es la base real, o subrasante. El suelo de subrasante forma la parte integral del pavimento de la carretera estructura ya que proporciona el soporte al pavimento desde abajo. La función principal de la subrasante es para dar soporte adecuado al pavimento y para esto; la subrasante debería poseer suficiente estabilidad bajo clima adverso y condiciones de carga. Si estas estructuras se basan en suelos con baja capacidad de carga, es probable que fallen durante o después construcción, con o sin aplicación de carga de ruedas sobre ellos. Donde el pavimento sea construido en un suelo inherentemente débil, este material será normalmente eliminado y reemplazado con un material granular más fuerte o mejorando el suelo hacia la

propiedad deseada por adición de productos químicos (Christopher 2010).

Esta técnica de eliminación y reemplazo puede ser costosa y lenta. Donde los agregados son escasos, el uso de estos recursos no renovables se considera insostenible, particularmente si las distancias de acarreo son significativas.

Una alternativa a la opción de extracción y reemplazo es estabilizar químicamente el material encontrado. Esto elimina la necesidad de reemplazar el material y garantiza las características ingenieriles y mejora el rendimiento del material de acogida para permitir su uso dentro de la estructura del pavimento (Christopher 2010).

1.6.1.2. Problemas relacionados con los suelos cohesivos.

Los suelos cohesivos generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para un proyecto de terraplenes o pavimentación, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad debido a su naturaleza; este tipo de suelos presentan altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta el trabajo y su uso para construir obras viales. (Rosales H., 2014)

Está bien documentado en la literatura los daños que causan a distintos tipos de estructuras, entre las que se pueden citar: estructuras ligeras, autopistas, vías férreas, aeropistas, canales de agua, tuberías, muros de retención, presas y puentes (Ikizler et al., 2010).

Tan solo en los Estados Unidos, se estima que los daños totales causados por suelos cohesivos tienen un costo anual de \$US15 billones, más del doble que los daños por inundaciones, huracanes, tornados y terremotos combinados. El costo anual de daños por estos suelos en China se estima también en \$US15 billones aproximadamente, mientras que la Asociación de Aseguradores Británicos estiman que el costo promedio anual asociado al daño por suelos cohesivos es cercano a los 400 millones de libras, lo que los convierte en el peligro geológico más dañino en el Reino Unido (Li et al., 2014).

Para el caso de los terraplenes de obras viales, es lógico y sustentable el utilizar el mismo suelo de la zona para su construcción (Almanza 2015), sin embargo, es común encontrar suelos cohesivos en los tramos carreteros proyectados, por lo cual para el empleo de estos suelos primero se tiene que utilizar procesos químicos o físicos para el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, o en su defecto hacer un reemplazo total del suelo cohesivo, lo cual demanda grandes inversiones económicas y de recursos naturales. (Al-Refeai, 1991).

El suelo expansivo es un problema recurrente en todo el mundo principalmente en regiones áridas. Se han reportado daños causados por estos suelos en regiones tan diversas

como África, Australia, Canadá, India, Israel, Rusia, España y los Estados Unidos (Popescu, 1979); Perú no es la excepción y su presencia se ha detectado en numerosos departamentos como San Martín, La Libertad, Lima, Loreto, etc.

En el Perú se cuenta con una gran diversidad de tipologías terrestres, la cual es un factor determinante en la construcción de obras viales, además, dependiendo del lugar del proyecto es posible que no se cuenten con canteras de material granular para poder realizar las mejoras necesarias en caso se tenga un suelo cohesivo, para solucionar este problema, según el MTC, se deben emplear alternativas de estabilización y reforzamiento para el mejoramiento de las características mecánicas del material evitando elevados costos de obra por los grandes espesores de pavimento a ser proyectados y en el caso de terraplenes: por el consumo y desecho excesivo de materia prima (incrementándose costos por movimiento de tierras). En diferentes universidades del país los suelos cohesivos han sido motivo de estudio y se han desarrollado proyectos de investigación con objetivos diversos como lo son la caracterización, el modelado de suelos no saturados, la estabilización y el mejoramiento. (Consoli & Prietto, 1998).

1.6.2. Técnicas de mejoramiento de suelos.

Se entiende por mejoramiento de suelos al procedimiento mecánico y artificial mediante el cual se busca obtener un material que cumpla con los requerimientos mínimos de resistencia, permeabilidad y estabilidad volumétrica (Zepeda et al., 2004). Debe insistirse en que no es una herramienta ventajosa en todos los casos y, desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas, el esfuerzo y dinero que en ello habrá de invertirse, también recordar que la técnica de mejoramiento para un tipo de suelo podría perjudicar a otro.

A continuación, se da una breve descripción de las propiedades del suelo más susceptibles a ser mejoradas (Rico y Del Castillo 1982):

- **Estabilidad volumétrica:**

Se refiere por lo general a los problemas relacionados por los cambios del contenido de agua del suelo. Se entiende por suelo expansivo como aquel que es susceptible de sufrir cambios volumétricos por cambios de humedad. Puede decirse que los suelos expansivos son

un fenómeno que se origina por la presencia de un suelo arcilloso con mineral montmorillonita y un clima semiárido, donde el evo transpiración potencial media anual es mayor que la precipitación media anual (Zepeda et al., 2004). Una gran parte de daños estructurales ha sido atribuida a suelos expansivos.

La estabilización suele ofrecer una alternativa de tratamiento para transformar la masa de la arcilla expansiva por tratamientos químicos o térmicos. La experiencia, muy orientada por factores económicos, ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie del terreno, en tanto que los tratamientos térmicos se han aplicado más bien a arcillas más profundas. (Villalaz 2004)

- **Resistencia:**

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. Todos estos métodos parecen perder mucho de su poder en el momento en que se tienen grandes cantidades de materia orgánica. La compactación es una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos.

- **Permeabilidad:**

No suele ser muy difícil modificar substancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación, la inyección, etc. En materiales arcillosos, el uso de defloculantes puede reducir la permeabilidad también significativamente. En términos generales, y eliminando la estabilización mecánica, los métodos de estabilización para influir en la permeabilidad de los suelos suelen estar bastante desligados de los métodos con los que se busca variar la estabilidad volumétrica o la resistencia.

- **Compresibilidad:**

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos, sin embargo, no es la única forma de estabilización que influye en la compresibilidad y, de hecho, puede decirse que todos los métodos de estabilización tienen influencia en dicho concepto.

- **Durabilidad:**

Suelen involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia al interperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico. No existen tantos criterios de campo o

laboratorio que permitan establecer con seguridad cuál va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado y éste es un motivo que contribuye a que el concepto durabilidad sea de los más difíciles de analizar, por lo menos cuantitativamente.

A continuación, se describen brevemente algunos de los procedimientos de mejoramiento del terreno (Zepeda et al. 2004):

1.6.2.1. Sustitución.

Una solución simple y fácil para zapatas y losas de cimentación desplantadas en suelos expansivos consiste en sustituir el suelo de cimentación con suelos no expansivos. La experiencia indica que si el subsuelo está formado por una capa de más de metro y medio de suelos granulares (SC-SP), desplantada sobre suelos altamente expansivos, no hay peligro de movimientos en las cimentaciones cuando la estructura está colocada sobre los suelos granulares. La mecánica y la trayectoria de las aguas superficiales filtradas a través de la capa superior del suelo granular no es clara. Se ha concluido que puede ser que el agua filtrada nunca llega al suelo expansivo o que su expansión es tan uniforme que los movimientos estructurales no se notan. (Rosales Hurtado 2014).

Por razones económicas, la extensión del relleno seleccionado debe limitarse a un máximo de 3 metros más allá de la línea de construcción. Por lo tanto, la posibilidad de filtraciones por los límites del relleno existe. No se ha establecido ninguna pauta en cuanto al requisito de espesor del relleno seleccionado, sin embargo, se insiste en un mínimo de 1 metro, aunque sería preferible de 1.5 metros. Esta magnitud se refiere al espesor del relleno seleccionado bajo la parte inferior de las zapatas o las losas de cimentación.

Los requisitos pertinentes que se deben considerar para la sustitución del suelo son el tipo de material con el que se hará el relleno, así como la profundidad y la extensión a las que se realizará la sustitución.

- **Tipo de material:**

Evidentemente, el primer requisito para la sustitución de suelos es que este no sea expansivo. Todos los suelos granulares que van de los GW (grava bien graduada) a SC (arena arcillosa) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos pueden cumplir el requisito de no expansividad. Sin embargo, en suelos tipo GW y SP el agua superficial puede viajar libremente a través del suelo y causar humedecimiento en los suelos expansivos a mayor profundidad. En el otro extremo, los suelos clasificados como SC con un alto porcentaje de

arcillas plásticas pueden presentar potencial expansivo.

Aparentemente cualquier relleno seleccionado será satisfactorio mientras no sea expansivo. Sin embargo, las pruebas de expansividad son el único método confiable para determinar la expansividad de un material, los límites solo son indicativos, por consiguiente, en caso de duda, tales pruebas deben realizarse en lugar de confiar solo en el límite líquido.

Se ha dado un gran énfasis a la posibilidad de mezclar los suelos granulares con los suelos expansivos del sitio, lo que reduce la cantidad del material de relleno requerido. Teóricamente, este método es razonable, pero en la práctica es difícil incorporar los suelos granulares con arcillas expansivas secas y duras. Roturadores y aradores serán necesarios para romper la arcilla en terrones de tamaño razonables, lo cual probablemente lo volverá un método tan caro como los métodos de estabilización química.

- **Profundidad de la sustitución:**

La profundidad de influencia es una cuestión más complicada que debe ser respondida cuando se lidia con el tratamiento del suelo debajo de las cimentaciones. ¿A qué profundidad debe ser compactado el suelo natural?, ¿Cuántos metros cúbicos del material de sustitución deben ser requeridos? Estas preguntas no pueden ser inteligentemente respondidas hasta que la cantidad de movimiento que pueda ocurrir bajo las cimentaciones pueda ser determinada.

En teoría la cantidad de expansión puede ser evaluada de datos derivados de las pruebas de expansión y de los métodos de distribución de presiones, aunque ya se ha concluido que las expansiones reales en campo son de solo un tercio de las estimadas de los resultados de las pruebas de laboratorio (Gizienski y Lee 1965).

También se puede señalar lo siguiente:

1. El potencial de expansión vertical de una masa de suelo bajo condiciones de saturación uniforme, puede ser menor a aquél de la misma masa de suelo solo bajo saturación local. El humedecimiento uniforme tiende a igualar el levantamiento.
2. Definitivamente hay una ganancia en cimentar la estructura sobre una capa de suelos no expansivos. Incluso si el suelo más profundo se expande, el movimiento será más uniforme y consecuentemente más tolerable.
3. La profundidad del relleno seleccionado no deberá ser menor a 1 m y preferiblemente a 1.2 m. Se debe remarcar que con 1.2 m de relleno más el peso del concreto, una presión uniforme de aproximadamente 3 t/m² es aplicada a la

superficie del suelo expansivo. Para suelos moderadamente expansivos, tal sobrecarga puede ser importante en prevenir la presión de expansión.

4. La falla del método de sustitución generalmente ocurre durante la construcción. Si la excavación se moja excesivamente antes de la colocación del relleno el agua atrapada causará expansión. El ingeniero geotecnista debe tener la oportunidad de supervisar la colocación del relleno o tal método no se debe adoptar.
5. El espesor del relleno puede ser reducido si se combina la compactación del suelo original y el método de sustitución.
6. El grado de compactación del relleno seleccionado depende del tipo de estructura a soportar. Para losas de cimentación el 90% de la prueba Proctor estándar debería ser adecuado. Para zapatas un grado de compactación del 95% al 100% debe ser alcanzado (Chen 1975).

- **Extensión de la sustitución:**

La principal razón por la que el relleno artificial seleccionado es menos efectivo que una capa natural de suelo granular es que en condiciones naturales, la capa se extiende sobre un área larga, mucho más larga que en la condición artificial. En una situación de relleno artificial, siempre es posible que el agua superficial se infiltre a los estratos más profundos de suelos expansivos por los bordes del mismo. Por lo tanto, entre más área de extensión, más efectivo el relleno.

La sustitución del suelo se puede considerar como el mejor método para obtener un suelo para cimentación apto. Las siguientes son algunas consideraciones que deben ser consideradas como incentivos o requisitos al optar por el método de sustitución de suelos (Chen, 1975):

- a. El costo de la sustitución del suelo es relativamente barato comparado con la estabilización química, además de que no se requiere maquinaria de construcción especial.
- b. La capa de suelo granular también sirve como una barrera efectiva contra la ascensión capilar del suelo.
- c. El drenaje superficial alrededor del edificio debe ser mantenido propiamente para que el agua no tenga oportunidad de llegar a los suelos expansivos debajo del relleno seleccionado.

1.6.2.2. Impermeabilización.

Se trata de utilizar recubrimientos plásticos o asfálticos entre la cimentación y el suelo para impedir el aumento del contenido de agua del terreno de apoyo, en general es difícil asegurar que el terreno permanecerá realmente protegido (Trejo 1986).

1.6.2.3. Remoldeo.

Este método consiste en remoldear cierto espesor de suelo (romper su estructura) y volverlo a colocar compactado con un contenido de agua mayor que el original y con un peso volumétrico menor que el que tenía en su estado original. El sobresaturar el suelo podría traer como consecuencia cambios importantes que afectarían sus propiedades mecánicas disminuyéndolas (Romero-Cervantes y Pérez-Rea 2008).

1.6.2.4. Pre humedecimiento.

El pre humedecimiento del suelo por medio de la técnica de la inundación se ha utilizado algunas veces para minimizar el cambio volumétrico del suelo, su objetivo es tratar de aumentar el contenido de agua del suelo hasta el valor representativo de la condición de equilibrio. Una vez que se concluye la obra, debe hacerse notar que este tratamiento no es eficaz si el suelo de cimentación está sujeto al secado y humedecimiento repetidos. Además, cuando se utilice este método se recomienda que se lleve a cabo un análisis previo del grado de saturación logrado para prevenir principalmente asentamientos. De la misma manera, este método genera una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante lo que sobre eleva los costos en la cimentación.

1.6.2.5. Aislamiento o barreras verticales.

Consiste en aislar el terreno de pérdidas o aumentos de humedad, esto se logra mediante la construcción de banquetas, pavimentos, drenaje y barreras. Las banquetas se construirán en el perímetro de las estructuras, las cuales deben tener el ancho de una vez y media la profundidad de la capa activa, debe asegurarse que las banquetas no se agrieten para que no se permita el paso de agua. También pueden ser utilizadas las geomembranas impermeables a manera de cajeo.

1.6.2.6. Sobre excavación.

Este método consiste en sobre excavar la sección de trabajo en la cimentación y en rellenar el espacio generado con material inerte en cantidad suficiente como para impedir la

expansión por el peso del relleno y la estructura. La utilidad del método depende de la presión de expansión del suelo.

1.6.2.7. Desplante profundo de la cimentación.

La influencia atmosférica sobre la deformación del subsuelo disminuye gradualmente con el aumento de la profundidad, la cimentación se puede desplantar hasta el nivel en el que el cambio de humedad sea imperceptible. Esta profundidad de desplante generalmente es de 1.2 a 1.5 m.

1.6.2.8. Estabilización química.

Se realiza generalmente con el fin de obtener una de las siguientes mejoras del suelo:

1. Aumento de la resistencia y la durabilidad.
2. Impermeabilización del suelo.
3. Disminución del potencial de cambio de volumen del suelo debido a una contracción o una expansión.
4. Manejabilidad del suelo.

Entre los aditivos que pueden utilizarse se incluyen el cemento, la cal, los materiales bituminosos, etc. Las sales han sido estudiadas, con fines de estabilización, desde hace varias décadas, entre las que se pueden citar el cloruro de potasio, el cloruro de magnesio, cloruro de bario, nitrato de sodio, carbonato de sodio, cloruro de calcio, cloruro de sodio, entre otros, sin embargo, solo algunas de ellas, por razones económicas, han podido ser aplicadas a la estabilización de terracerías. Particularmente, el cloruro de sodio por su bajo costo, es de los que más se han empleado en carreteras, en algunos casos con mayor o menor éxito dependiendo de las condiciones particulares del caso que se trate (Garnica et al, 2002).

Existen otros métodos como la estabilización del suelo con cal, la cual reduce drásticamente el índice plástico y aumenta el límite de contracción de las arcillas montmorillonita (Holtz 1969), estabilidad por drenaje, por medios eléctricos (como electroósmosis y pilotes electro metálicos), por calor y calcinamiento, por mencionar algunos.

1.6.2.9. Compactación.

La compactación del suelo es el proceso mediante el cual el suelo es mecánicamente comprimido a través de una reducción de su relación de vacíos. Se mide en términos de la densidad en seco o la cantidad de materia sólida por unidad de volumen. Para una cantidad constante de compactación, todos los suelos tienen un contenido de humedad

óptimo y un peso específico seco máximo. En el campo, la compactación se realiza con diferentes tipos de rodillos o vibradores. Uno de los principales laboratorios británicos recomienda el uso de vibro-compactadores de rodillo liso para compactación de suelos granulares, para compactación de suelos arcillosos húmedos los compactadores neumáticos de repetición y para los suelos secos arcillosos los rodillos tipo pata de cabra.

1.6.2.10. Drenajes verticales.

La aplicación de drenajes prefabricados verticales combinados con vacío y la precarga es considerada como una de las técnicas más respetuosas del medio ambiente dentro de los métodos de mejoramiento de suelo. La presión atmosférica natural se utiliza para generar la succión a través de una bomba de vacío. En comparación con otros métodos de mejoramiento de suelo tales como los pilotes profundos, este método no sólo ahorra un gasto sustancial en el mantenimiento de carreteras y terraplenes de ferrocarril, sino que también aumenta la velocidad de la construcción de carreteras costeras y vías de ferrocarril, así como su capacidad para resistir una mayor carga por tráfico. Además, como el método no requiere productos químicos, el suelo y la química de las aguas subterráneas no van a cambiar, a diferencia de los métodos de mejoramiento donde se utiliza cemento o cal. Este método también reduce el impacto sobre el medio ambiente, reduciendo al mínimo las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de la explotación de canteras de arena natural y la grava (Indraratna et al. 2010).

1.6.3. Método para el mejoramiento del suelo en campo.

Existen varios métodos para mejorar el suelo, a continuación, se mencionan los más comunes: (Ranjan, Vasan, & Charan 1996).

1.6.3.1. Compactación superficial.

Es el proceso mecánico por el cual se busca mejorar las propiedades mecánicas de los suelos (resistencia, compresibilidad, permeabilidad) y sus características.

Existen varios aspectos que afectan el proceso de compactación:

- Naturaleza del suelo
- Método de compactación
- Energía específica
- Contenido de agua del suelo

- Contenido de agua inicial del suelo
- Recompactación
- Temperatura
- Granulometría
- Forma de las partículas
- Los procesos de compactación en campo son:
- Por impacto: Rodillo apisonador (Tamper) y pisón
- Por presión: Rodillo liso y neumático
- Por amasado: Rodillo pata de cabra
- Por vibración: Rodillo y placas vibratorias
- Por métodos mixtos: Combinación de los anteriores

Los métodos de compactación en laboratorio son:

- Por impacto: Prueba Proctor (AASHTO) estándar y modificada
- Por carga estática: Prueba Porter
- Por amasado: Prueba Harvard miniatura
- Por vibración: Mesa vibradora

Se hace mención del tipo de pruebas en laboratorio ya que para la elaboración de probetas se usará la prueba Proctor modificada.

1.6.3.2. Estabilización de suelos con mezclas.

La estabilización de suelos con mezclas depende de:

- Granulometría
- Peso volumétrico
- Cohesión
- Fricción interna

Los principales tipos de mezclas son:

- Suelo-suelo
- Suelo-cal
- Suelo-cemento

1.6.3.3. Compactación profunda.

Existen diversos tipos, como:

- Compactación dinámica
- Vibro flotación
- Vibro compactación
- Densificación con explosivos

1.6.3.4. Precarga.

Consiste en aplicar una carga al subsuelo previamente a la construcción de una estructura o instalación, para provocar la consolidación de aquel, se aplica en suelos compresibles.

Se deben considerar los siguientes factores:

Deformabilidad y resistencia al corte del suelo

- Tiempo de consolidación
- Tiempo disponible para la obra
- Factores económicos

Los métodos de precarga son:

- Con materiales térreos
- Con agua (en tanques durante la prueba hidrostática)
- Con bombeo, abatiendo el nivel freático (y por tanto la presión de poro en el subsuelo)

Se debe hacer una revisión de estabilidad, el espesor de las capas de materiales térreos que se coloquen como precarga no deben ocasionar falla por resistencia al corte de los suelos subyacentes. Los espesores de las capas iniciales usualmente se limitan a 1-2 metros.

1.6.3.5. Inyecciones (grouting).

- **Convencionales:**

Las inyecciones convencionales son el conjunto de operaciones consistentes en la introducción de un fluido, a presión, a través de perforaciones, para rellenar huecos y fisuras no accesibles. El fluido posteriormente se solidifica.

Su objetivo es:

- Mejorar la resistencia y reducir la deformabilidad de la formación: Inyecciones de

“consolidación”.

- Disminuir la permeabilidad de la formación: Inyecciones de impermeabilización.

- **Jet grouting:**

Consiste en inyectar un mortero (lechada de cemento o cal), mediante chiflones (chorros de alta presión) especiales, dirigidos lateralmente a las paredes de una perforación mientras esta se realiza. Los chorros excavan y mezclan simultáneamente el suelo con mortero. Para mejorar la acción de corte se añade aire a presión. La lechada se mezcla con los suelos del sitio para formar columnas circulares (pilas) de suelo-mortero (suelo, cemento, o suelo-cal), de dimensiones y propiedades mecánicas específicas. El método común de aplicación consta de dos etapas: perforación y retracción de la herramienta con inyección simultánea.

- **Deep mixing (Mezclado profundo):**

Consiste en mezclar mecánicamente el suelo in situ con un agente cementante en forma de lechada o polvo, dando como resultado columnas solidificadas.

- Se usan los siguientes agentes cementantes:
- Cal viva o hidratada
- Cemento sin o con aditivos (escoria, ceniza).
- Escoria granular de horno, mezclada con cal o cemento
- Yeso, solo o combinado con cal o cemento.

1.6.4. Revisión del estado del arte de suelos fibra reforzados.

El término suelo reforzado describe cualquier masa de suelo a la cual se le mejora su resistencia al corte combinándola con elementos resistentes. Tradicionalmente, los elementos resistentes, o de refuerzo han tomado la forma de barras, tiras de metal, mallas u hojas. Históricamente la técnica se podría considerar milenaria, sin embargo, no es hasta que se patentó en Francia como el sistema de Tierra Reforzada por Vidal (1969), que el suelo reforzado se volvió una técnica usada mundialmente. Este hecho es considerado por muchos como un catalizador que llevó a una rápida expansión del uso, desarrollo e investigación del concepto de suelo reforzado (Pedley 1990).

1.6.4.1. Tipos de fibras utilizadas en la literatura.

Dentro de las literaturas existentes de los suelos fibra reforzadas, es fácil distinguir las

dos principales ramas en lo que respecta al tipo de fibras utilizadas, una corresponde a las fibras naturales y la otra a las hechas por el hombre o mejor conocidas como fibras sintéticas. Las fibras naturales son aquellas obtenidas de la naturaleza sin la necesidad de llevar a cabo un proceso industrial y, por otra parte, las fibras hechas por el hombre comúnmente provienen de un elaborado proceso industrial o del reciclaje de desechos de productos industriales. (Al-Akhras, Attom, Al-Akhras, & Malkawi 2008)

De las fibras naturales que han sido utilizadas para el refuerzo del suelo o en el desarrollo de investigación se encuentran las fibras de coco, sisal, palma, yute, lino, paja y bambú.

- Fibra de la cáscara del coco

Es la que se utiliza. Normalmente las fibras van de los 50 a los 350 mm de longitud y con un diámetro entre 0.1 y 0.6 mm, están compuestas de lignina, tanino, celulosa, pectina y otras sustancias solubles al agua. Dado su alto contenido en lignina son menos degradables que otras fibras, llegando a ser utilizadas en varios sistemas de taludes reforzados con terminado vegetal. Tienen una gran capacidad para absorber agua y han mostrado ser eficaces para disminuir la tendencia expansiva de los suelos (Hejazi et al. 2012) tiene menor absorción de agua en comparación con la fibra de coco.

- **Fibras de sisal.**

Usada como refuerzo para las hojas de tableros de yeso (como Tablaroca®), con un diámetro que varía de 0.06 a 0.4 mm, mientras el largo varía ya que depende del tamaño de la hoja de donde es obtenida. Al ser adherida al suelo, mejora la ductilidad del composite así como incrementa en menor medida su resistencia a la compresión así como su resistencia al cortante (Ghavami et al. 1999).

- **Fibras de palma.**

Las fibras de palma suelen ser ligeras y resisten al deterioro por lo que son duraderas. Se han reportado mejoras significativas en los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante (cohesión y ángulo de fricción), mediante una trabazón entre las fibras de palma y las partículas del suelo.

- **Fibras de yute.**

El yute crece de manera abundante en países como China, India, Bangladesh y

Tailandia. El jute es actualmente utilizado para producir geotextiles porosos para aplicaciones en filtración, drenaje y estabilización de suelos. La investigación ha demostrado que al adherir yute al suelo reduce el peso volumétrico seco máximo mientras que aumenta el contenido de humedad óptima (Aggarwal y Sharma 2010).

- **Fibras de lino.**

El lino es una de las fibras textiles más antiguas conocidas por el hombre, proviene de una flor azul, con longitudes de fibra en promedio de 85 mm. Como fibra ha sido adicionada para mejorar la ductilidad de composites suelo cemento. Como algunas otras fibras, ha sido revestida con sustancias para tratar de mejorar su unión con las partículas de suelo (Segetin 2007).

- **Fibras de paja.**

La paja es cosechada alrededor de todo el mundo, puede ser usada para construir ladrillos reforzados para mejorar su comportamiento. Es sabido a través de la arqueología que en el antiguo Egipto la paja era utilizada en la fabricación de ladrillos y también se sabe fue utilizado a lo largo de la historia por distintas civilizaciones sin que tuvieron contacto unas con otras necesariamente. Este es un material composite conocido en Latinoamérica y el sur de los Estados Unidos como adobe. En algunas regiones de México, esta técnica de suelo reforzado sigue siendo utilizada en la fabricación de vivienda de medio rural ya que representa una técnica efectiva, de bajo costo y con materiales que se encuentran en el medio. Aparte de ser de bajo costo, el adobe es considerado un material con ventajas térmicas al crear temperaturas más placenteras dentro de las viviendas.

El adherir paja al suelo, muestra efectos positivos en términos de las propiedades mecánicas del composite, tales como: la reducción de la contracción y del tiempo de curado, así como de mejorar la resistencia a la compresión y al esfuerzo cortante (Bouhicha et al. 2005).

- **Fibras de bambú.**

Es una fibra con altos contenidos de celulosa, tiene una buena resistencia a la tensión, pero un módulo de elasticidad bajo alrededor de los 33-40kN/mm², con una absorción de agua menor a aquella de la fibra de coco. La fibra de bambú ha sido aplicada en el refuerzo del concreto, pero en suelos puede considerarse un campo fértil para la investigación.

La industria de las fibras sintéticas es una industria ya desde hace años consolidada, que desarrolla fibras y aplicaciones para todos los distintos tipos de industria. En lo que respecta al refuerzo de los suelos, las fibras más utilizadas han sido las de polipropileno, poliéster, polietileno, nylon y de vidrio.

- **Fibras de polipropileno (PP fibers).**

Las fibras de polipropileno son ampliamente usadas para el refuerzo del concreto a edades tempranas para evitar el migro agrietamiento causado por el fraguado, también sirven para mejorar su resistencia al fuego. En lo que respecta a los suelos fibro reforzados son también con las que mayor investigación se ha desarrollado. Se ha reportado que mejoran la resistencia a la compresión no confinada y que reducen la contracción volumétrica así como la presión de expansión de las arcillas expansivas (Puppala y Musenda 2000).

- **Fibras de poliéster.**

Se ha reportado que las inclusiones de fibra de poliéster pueden mejorar en arenas finas su resistencia pico y su resistencia residual, dependiendo en gran medida de la longitud de la fibra, así como de su contenido, teniéndose mejores resultados en tanto que aumenta su longitud y su contenido en porcentaje de peso seco del suelo, siendo una tendencia momentánea ya que hasta cierto punto se comienzan a obtener resultados menos favorables (Tang et al. 2007).

- **Fibras de polietileno.**

La adición de fibras de polietileno al suelo mejora sus capacidades de resistencia mecánica. Dentro de las mejoras se encuentra el aumento de la energía de fractura del suelo. La tenacidad del suelo aumenta resultado de una mayor capacidad de deformación, esta mejora en el comportamiento esfuerzo deformación es ganada ya que las fibras desarrollan tensión (Sobhan y Mashnad, 2002). Otras de las mejoras son el aumento de la resistencia a la compresión no confinada, así como del valor CBR.

- **Fibras de vidrio.**

Las fibras de vidrio mejoran la resistencia pico en arenas limosas, incrementan el esfuerzo desviador y reducen la fragilidad en el composite teniendo un comportamiento más dúctil. Como se ha visto en las otras fibras, las fibras de vidrio también mejoran la resistencia a la compresión no confinada.

- **Fibras de nylon.**

En lo que respecta a las fibras de nylon, mezclas de las mismas con fibras de yute han mostrado mejoras de hasta el 50% en el valor de CBR comparado con el suelo no reforzado (Gosavi y Patil 2004).

1.6.4.2. Interacción del suelo y el refuerzo.

En el concepto tradicional del suelo reforzado (inclusiones planares), los mecanismos de interacción entre el suelo y la inclusión han sido estudiados ampliamente, formando de esta manera una fuerte base teórica que sustenta el éxito y la vasta aplicación del concepto. Sin embargo, los mecanismos de funcionamiento del suelo fibro-reforzado son materia de discusión y estudio, y hasta el momento no se ha llegado a un consenso general. En este capítulo se mencionan algunas hipótesis propuestas por algunos autores acerca del funcionamiento de estos materiales.

1.6.4.3. Mecanismos de interacción suelo-refuerzo tradicional.

La masa de suelo reforzado es de alguna manera análoga al concreto reforzado ya que las propiedades mecánicas de la masa se mejoran por refuerzos paralelos a la dirección principal de deformación para compensar la falta de resistencia a la tensión del suelo. Las propiedades de resistencia a la tensión mejoradas son el resultado de la interacción entre el suelo y el refuerzo. El material composite tiene las siguientes características (Elías et al. 2001):

- La transferencia de esfuerzos entre el suelo y el refuerzo sucede de manera continua a lo largo del refuerzo.
- El refuerzo se distribuye a través de toda la masa de suelo con un grado de regularidad y no debe ser solamente local.
- Los esfuerzos se transfieren al refuerzo por fricción o por resistencia pasiva dependiendo de la geometría del refuerzo.
- La fricción se desarrolla en lugares donde hay desplazamientos relativos de cortante y corresponden al esfuerzo cortante entre el suelo y la superficie del refuerzo. Los elementos de refuerzo donde la fricción es importante deben estar alineados con la dirección relativa de desplazamiento. Ejemplos de ese tipo de refuerzo son las barras de metal, geotextiles y geomallas.

- La resistencia pasiva ocurre mediante el desarrollo de esfuerzos en las secciones transversales del refuerzo normales a la dirección del movimiento relativo del refuerzo. La resistencia pasiva es generalmente considerada ser el mecanismo de interacción primario en geomallas rígidas, malla electro soldada, etc. Las crestas transversales en las tiras de metal o en las geomallas triaxiales también proporcionan resistencia pasiva.
- La contribución de cada mecanismo de transferencia para un refuerzo en particular dependerá de la rugosidad de la superficie (fricción en la piel), esfuerzo normal efectivo, dimensión de las aberturas de la malla, espesor de los miembros transversales, y características de elongación del refuerzo. Igualmente, importante para el desarrollo de la interacción son las características del suelo, incluyendo tamaño del grano, distribución del tamaño de grano, forma de la partícula, densidad, contenido de agua, cohesión y rigidez.
- La función principal del refuerzo es restringir las deformaciones del suelo. Al hacerlo, los esfuerzos se transfieren del suelo al refuerzo. Estos esfuerzos son soportados por el refuerzo de dos maneras: en tensión o corte y flexión.
- La tensión es el modo de acción más común para restringir las deformaciones en el suelo. Todos los elementos de refuerzo longitudinales (elementos de refuerzo alineados en la dirección de la extensión del suelo) son generalmente sometidos a altos esfuerzos de tensión. Los esfuerzos de tensión también se desarrollan en refuerzos flexibles que cruzan planos de corte.
- Los elementos de refuerzo transversales que tienen cierta rigidez, pueden soportar esfuerzos cortantes y momentos flexionantes.

1.6.4.4. Mecanismo de interacción suelo-fibra.

El mecanismo de interacción entre el suelo y la fibra es similar en algunos aspectos al mecanismo de interacción del concepto tradicional de suelo reforzado.

Diambra et al. (2013) estudiaron a fondo el efecto de las fibras en las arenas al realizar ensayos triaxiales de compresión y extensión ante variados esfuerzos confinantes y a distintos contenidos de fibra. Con base en sus resultados mencionan lo que consideran los aspectos más importantes a tener en cuenta en el análisis de los mecanismos de funcionamiento de los

suelos fibroreforzados:

- Contenido de fibra. Para condiciones de compresión triaxial, el incremento de resistencia movilizada inducida por la adición de fibras es notable y altamente dependiente del contenido de fibras.
- Dependencia del nivel de deformación. La rigidez inicial del suelo composite no está influenciada por la presencia de fibras, en otras palabras, sobre el dominio de esfuerzos pequeños el comportamiento del composite es solamente gobernado por la matriz de suelo. El comportamiento a compresión de un suelo reforzado diverge del no reforzado conforme la prueba continua, por lo tanto, el mecanismo de interacción arena-fibra es dependiente del nivel de deformación.
- Efecto de unión. La observación de los especímenes ensayados no muestra visiblemente algún signo de deformación plástica en las fibras, lo que sugiere que, a pesar de que la unión entre las fibras y la arena está totalmente activa, algún deslizamiento relativo parcial puede estar ocurriendo.
- Mecanismo de extracción. La observación de los especímenes ensayados no muestra signos de rompimiento o de deformación plástica en las fibras. Lo que sugiere que a altas deformaciones, la unión entre las fibras y la arena se puede perder, y la extracción completa de la fibra ocurre.
- Orientación de la fibra. En las pruebas triaxiales que realizaron a extensión hubo una mejora despreciable lo que demostró que los planos preferenciales horizontales de las fibras inducidos por la técnica de compactación mediante apisonado pueden ser considerada responsable por esta respuesta con cierto grado de anisotropía.
- Efecto volumétrico. En el plano de deformaciones volumétricas, el comportamiento de contracción de los especímenes no reforzados se vuelve más dilatado cuando las fibras son adheridas para ambas condiciones de contracción y extensión. El decremento en relación de vacíos debido a la adición de fibras es típicamente menor a 0.05, y este cambio en la densidad puede explicar solo parcialmente la dilatación incrementada observada en el composite. Asimismo, se puede esperar que la pronunciada contribución a tensión de las fibras proporcione un confinamiento de la matriz mejorado y por lo tanto una mayor respuesta a contracción. Así, un efecto

adicional en el mecanismo de interacción arena-fibra debe ser considerado para explicar el incremento en la dilatación.

De la misma manera, Diambra et al. (2012) proponen las siguientes hipótesis para estimar la contribución de las fibras al suelo:

- Las fibras están distribuidas homogéneamente a través de la matriz de arena. El estado de esfuerzo y deformación del material composite se derivan de un procedimiento de promedio volumétrico del estado de esfuerzo deformación de ambos constituyentes.
- Las fibras se consideran mono-dimensionales, discretas (no continuas), elementos elásticos con solo resistencia a la tensión que se moviliza por las deformaciones por tensión que se desarrollan en el suelo reforzado.
- Durante la carga, ocurren desplazamientos relativos parciales entre las fibras y los granos de arena.
- Las fibras pueden ser extraídas de la matriz de arena.
- La orientación de las fibras debe ser considerada.
- La presencia de las fibras afecta la aglomeración de la matriz de arena.

1.6.4.5. *Análisis de la interface suelo-fibra.*

La interface entre los materiales de construcción y el suelo juegan un papel importante en muchos sistemas geotécnicos incluyendo las cimentaciones con pilas, los muros de retención y especialmente los sistemas de suelo reforzado. Tang et al. (2010) utilizaron el microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope) a probetas de suelo fibro reforzado, después de la compactación, la fibra es envuelta y trabada por partículas de suelo. Después de que la fibra es sometida a la prueba de extracción, algunas partículas se quedan adheridas a la misma. Esto indica que la estructura de la interface es perturbada e incluso rota durante el proceso de corte. Por lo tanto, cuando ocurre el corte, la fricción en la interface depende en gran manera de la resistencia de las partículas de suelo. Entre más estén empacadas y trabadas las fibras con el suelo, se tendrá una mayor resistencia en la interface al cortante. (Gray & Al-Refai 1986)

La resistencia a la rotación de las partículas, así como la penetración de las mismas sobre la fibra pueden incrementar la resistencia a la extracción de las fibras. También se puede

mencionar que se puede desarrollar succión mátrica debido a la capilaridad entre el agua, las partículas de suelo y la superficie de la fibra, lo que daría un incremento al esfuerzo efectivo en la interface suelo fibra.

El aumento en el contenido de agua significaría un decremento en la succión mátrica así como podría jugar un papel importante como una capa lubricante en la interface que facilite la rotación de las partículas con la fibra, facilitando la extracción de la misma y por consiguiente, reduciendo la resistencia mecánica del compuesto.

Generalmente, hay dos pruebas mecánicas principales que han sido desarrolladas para evaluar las propiedades de la interface: la prueba de corte directo y la prueba de la extracción (del inglés pull out). Sin embargo, cuando se trata de analizar la estabilidad interna y las interacciones de interface, la prueba de la extracción parece ser la más apropiada (Tang et al., 2010).

De manera análoga, Lopes y Ladeira (1996) indicaron que cualquier incremento en el esfuerzo confinante, el peso específico seco o la tasa de desplazamiento incrementaban la resistencia a la extracción de una geomalla. También influyen la longitud embebida y el esfuerzo vertical efectivo en el comportamiento a la extracción.

Comparada con la Resistencia al corte o a compresión, básicamente la resistencia a tensión del suelo siempre es asumida como cero en la práctica de la ingeniería geotécnica dado su valor bajo. De hecho, es difícil medir precisamente la resistencia a tensión del suelo debido a la falta de técnicas de laboratorio satisfactorias.

1.6.4.6. Posibles aplicaciones del concepto.

Los suelos cohesivos son aplicados en distintas estructuras térreas, tales como barreras impermeables en los rellenos sanitarios y en corazones impermeables en bordos y presas, de la misma manera, los suelos cohesivos que son excavados para deshecho pueden ser reutilizados como material de relleno en algunas estructuras.

La mayor aplicabilidad del compuesto puede ser en terraplenes, sub rasantes, sub bases y en problemas de estabilidad de taludes. También se propone extrapolar el concepto a la creación de materiales de construcción tradicional tales como los blocks cerámicos para muros.

1.6.5. Polietileno tereftalato (PET)

El polietileno tereftalato, más conocido por sus siglas en inglés como PET, es un tipo

de plástico muy usado en envases de bebidas y en textiles. (Gray & Ohashi 1983)

Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres.

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de fibras textiles y en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente botellas, bandejas, charolas y láminas.

1.6.5.1. Historia

Fue producido por primera vez en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. En esa época su país estaba en guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto.

A partir de 1946 se empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se comenzó a emplear en forma de filme para envasar alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976. Pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para la fabricación de botellas para bebidas poco sensibles al oxígeno como por ejemplo el agua mineral y los refrescos carbonatados. Esto último se menciona porque en este trabajo se busca reducir la gran cantidad de contaminación que se produce con el PET y los envases de plástico son la principal fuente para la fabricación de fibras que se usarán en las probetas de prueba.

Producción mundial de poliéster de fibra cortada: Actualmente China domina la producción de poliéster de fibra cortada a nivel mundial, ya que fabricó el 65 % del total global en 2010. También se muestra la proyección a futuro de cuanto fabricará. (Kumar, Walia, & Mohan 2006)

1.6.5.2. Ventajas

Como algunos de los aspectos positivos que encontramos para el uso de este material, podemos destacar:

- Que actúa como barrera para los gases, como el CO₂, O₂ y para la humedad.

- Es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes
- Liviano
- Impermeable
- No tóxico, a cierto grado, ya que todos los plásticos tienen cierto grado de toxicidad, cualidad necesaria para este tipo de productos que están al alcance del público en general
- (Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con alimentos)
- Inerte (al contenido)
- Resistencia a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza
- Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee poca deformabilidad al calor
- Totalmente reciclable
- Estabilidad a la intemperie
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.

Para la fabricación del PET, se han implementado algunas estrategias para minimizar los impactos adversos al ambiente durante la producción, como la utilización del gas natural como fuente de energía, así como el control de emisiones a la atmósfera a través de oxidantes térmicos y el tratamiento de las aguas residuales. (Maher & Gray 1990)

1.6.5.3. Usos y aplicaciones

Las fibras de PET son 50% cristalinas y el ángulo de sus moléculas puede variar. Sus propiedades son muy sensibles a los procesos termodinámicos. Básicamente el poliéster, a través de modificaciones químicas y físicas, puede ser adaptado hacia el uso final que se le va a dar, como puede ser fibra de ropa, textiles, para el hogar o simplemente filamentos o hilos. (Ghavami, Romildo, Toledo, & Normando 1999)

Estos son algunos ejemplos de lo que se puede fabricar con PET:

- Fabricación de envases para bebidas
- Fabricación de vasijas de ingeniería, medicina, agricultura, etc.
- Fijación ósea o sustituciones de fragmentos óseos (biomedicina).

- Fabricación de juguetes, agentes adhesivos, colorantes y pinturas.
- Fabricación de componentes eléctricos y electrónicos.
- Fabricación de cintas adhesivas, hilos de refuerzo para neumáticos.
- Fabricación de carcasas, interruptores y capacitadores.
- Fabricación de pinzas para la industria textil
- (Según su mezcla empleada para la fabricación de tejidos para camisería, para pantalones, faldas, hilos trajes completos, ropa de cama y mesa, género de punto, etc.)
- Artículos que no cambien mucho de forma como ropa interior o para ropa exterior ya que tiene que mostrar alta estabilidad y forma consistente.

1.6.5.4. Impacto ambiental del PET

En la actualidad es difícil prescindir de los plásticos PET, no sólo por su utilidad sino también por la importancia económica que tienen. Esto se refleja en los índices de crecimiento de esta industria que, desde principios del siglo pasado, supera a casi todas las actividades industriales.

Los plásticos PET se utilizan para embalajes, para envasar, conservar y distribuir alimentos, medicamentos, bebidas, agua, artículos de limpieza, de tocador, cosmetología y un gran número de otros productos que pueden llegar a la población en forma segura, higiénica y práctica.

Su uso cada vez más creciente se debe a las características de los plásticos PET. Debido a que son livianos, resultan de fácil manipulación y optimización de costos. Los envases plásticos son capaces de adoptar diferentes formas como bolsas, botellas, frascos, películas finas y tuberías, entre otros. Son aislantes térmicos y eléctricos, resisten a la corrosión y otros factores químicos y son fáciles de manejar. Los plásticos tienen afinidad entre sí y con otros materiales, admitiendo diversas combinaciones (por ejemplo, los envases multicapa).

En función de las propiedades de los plásticos PET, la estructura del mercado ha crecido considerablemente. La producción global de plásticos se ha disparado en los últimos 50 años, y en especial en las últimas décadas. Entre 2002-2013 aumentó un 50%: de 204 millones de toneladas en 2002, a 299 millones de toneladas en 2013. Se estima que en 2020 se

superarán los 500 millones de toneladas anuales, lo que supondría un 900% más que los niveles de 1980.

A pesar de su indiscutible utilidad en la vida cotidiana, una vez que los plásticos se han utilizado se convierten en residuos que forman parte de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados en grandes cantidades. Los RSU originan problemas de contaminación del agua, aire y suelo, que impactan directamente al ambiente y a la salud.

A nivel mundial, se calcula que 25 millones de toneladas de plásticos se acumulan en el ambiente cada año y pueden permanecer inalterables por un periodo de entre 100 y 500 años. Esto se debe a que su degradación es muy lenta y consiste principalmente en su fragmentación en partículas más pequeñas, mismas que se distribuyen en los mares (en estos se han encontrado entre 3 a 30 kg/km²), ríos, sedimentos y suelos, entre otros. Es común observar paisajes en caminos, áreas naturales protegidas, carreteras, lagos, entre otros, con plásticos tirados como parte de lo mismo.

Debido a la necesidad de seguir utilizando plásticos, pero por otro lado se producen impactos al ambiente, el reciclaje es una alternativa para contribuir con la solución de este problema. El reciclaje se define como la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos.

Por ejemplo, Japón registró una tasa de reciclaje de botellas de PET (volumen total de recolección/volumen de botellas vendidas) de 77,9 % en 2009, según datos del Consejo de Reciclaje de Botellas de PET de ese país. Por su parte, Europa tiene cifras consolidadas de 48,3%, de acuerdo con la Asociación Europea de Reciclaje de Contenedores de PET (Petcore), y Estados Unidos de 28%, según la Asociación de Resinas de PET (Petra). Brasil es el líder con una tasa de 55,6%, seguido por Argentina con 34%, según reportes de la Asociación Brasileña de la Industria del PET (Abipet).

Pero la gran sorpresa la representa México ya que desde hace siete años se ha convertido en el país que más PET recicla en el mundo. De hecho, se estima que su posición está por encima incluso de países más desarrollados de la Unión Europea, Estados Unidos y Japón debido a que cuenta con la planta de reciclaje más grande del planeta, y un alto porcentaje lo dedica a fabricar nuevos envases, la solución más sostenible para este tipo de

residuos.

En el Perú, se producen unos 3,500 millones de botellas de plástico cada año, las cuales menos del 50 % son recicladas, explica Albina Ruiz, de la ONG Ciudad Saludable. El tema del acopio es crítico para la industria de reciclaje en América Latina, donde no hay una cultura de separación en la fuente. Aun así, las cifras de recuperación muestran un gran potencial.

1.6.6. Conceptos.

1.6.6.1. Contenido de humedad.

El contenido de humedad de un suelo, se asume como la cantidad de agua dentro de los espacios/poros entre los granos del suelo, el cual se quita por secado en horno a 105-110°C. Cuando el suelo se calienta por un periodo de 12-24 horas y se denomina al suelo como seco.

En suelos granulares no cohesivos este procedimiento remueve toda el agua presente. En la siguiente ilustración se muestra de forma simple las zonas que el agua rodea de la partícula de arcilla y se determinan por la consideración de las cinco categorías del agua, explicadas a continuación e indicadas en la figura:

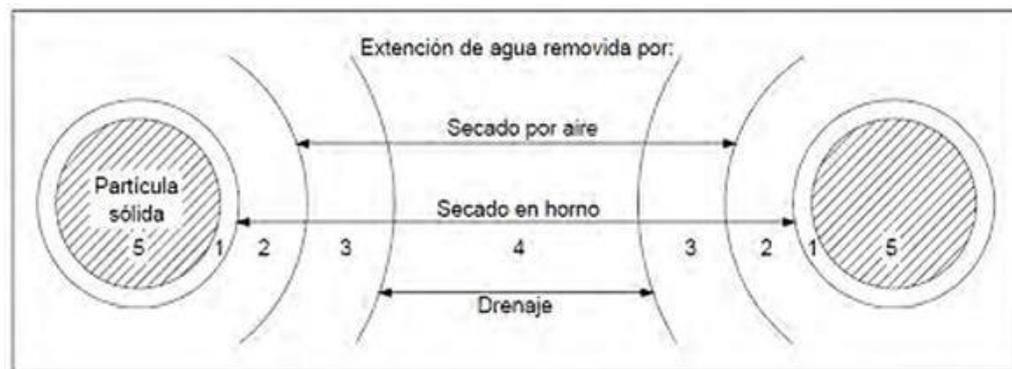


Figura 1: Agua en una partícula arcillosa.

- 1) Agua absorbida, retenida en la superficie de la partícula por grandes fuerzas de atracción eléctricas y virtualmente en un estado sólido. Esta capa es de un espesor muy pequeño, del orden de 0.005µm. Esta agua no se puede remover por secado en horno a 110°C, por lo que se considera parte del grano del suelo sólido.
- 2) Agua que no está fuertemente retenida y puede ser removida por secado en horno, pero no por secado al aire (humedad higroscópica)

- 3) Agua capilar, retenida por tensión superficial, generalmente removible por secado al aire.
- 4) Agua gravitacional, la cual se puede mover entre los espacios vacíos de los granos del suelo, se remueve por drenaje.
- 5) Agua combinada químicamente. Crea hidratación dentro de la estructura cristalina, exceptuando el yeso y otras arcillas tropicales. Esta agua generalmente no se remueve por secado en horno.

Para los ensayos en el suelo se considera el contenido de humedad que se remueve a 105-110°C. El agua mencionada en la categoría 1 no se toma en cuenta en la determinación de contenido de humedad. El contenido de humedad se expresa usualmente como porcentaje, pero siempre en base a la masa del suelo secado a horno. Si la masa de agua removida por secado en horno se denota por m_W y la masa del suelo seco por m_D , el contenido de agua w se obtiene por la siguiente ecuación:

$$w(\%) = \frac{m_W}{m_D} (100)$$

Ecuación 1: Contenido de Humedad

1.6.6.2. Límites de Atterberg

También conocidos como límites de consistencia, es una medida básica de la naturaleza de un suelo granular fino. El científico sueco Albert Mauritz Atterberg fue quien definió estas medidas, las cuales fueron mejoradas posteriormente por Arthur Casagrande.

Estos límites se basan en el concepto de que en un suelo solo pueden existir cuatro estados de consistencia dependiendo del contenido de agua o contenido de humedad que este tenga: sólido, semisólido, plástico y líquido. La consistencia y comportamiento del suelo en cada estado es diferente, por lo que sus propiedades mecánicas también.

Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado a otro son los denominados límites de Atterberg. Estos se utilizan para distinguir los diferentes tipos de suelo.

Estos límites se usan para caracterizar suelos arcillosos o limosos, ya que en éstos existe la contracción y la expansión del suelo dependiendo su contenido de humedad, provocando variaciones en su resistencia al corte.

El cambio de una fase a otra no se puede observar en límites precisos, pero toman lugar como una transición gradual. Sin embargo, tres límites específicos se han establecido empíricamente y son universalmente reconocidos.

- Límite líquido LL (WL).
- Límite plástico PL (WP).
- Límite de contracción SL (WS)

1.6.6.3. Teoría de Mohr – Coulomb

La relación entre la resistencia máxima al corte y el esfuerzo normal de un suelo es representada por la siguiente ecuación:

$$\tau = c_u + \sigma \tan \varphi$$

Ecuación 2 Resistencia al corte

Esta ecuación lineal indica la relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal que existe en un suelo, la cual fue inicialmente desarrollada por Charles- Augustin de Coulomb en el año 1773.

Pero a finales del siglo XIX Christian Otto Mohr desarrolló una forma generalizada de la teoría anterior en donde por medio de una circunferencia presentada en una gráfica bidimensional indica los esfuerzos máximos que presenta un material para condiciones específicas. Dicha forma generalizada afectó la interpretación del criterio, pero no la esencia de la teoría de Coulomb. Para la mayoría de los propósitos prácticos en suelos, esta relación lineal mantiene y representa el criterio de falla más aceptado. La curva graficada de dicha ecuación es conocida como la “envolvente de falla”

De los círculos de Mohr se tiene que:

$$\sigma = \sigma_m - \tau_m (\sin \varphi)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

Ecuación 3 Envolvente de falla

Siendo:

- σ_1 : el esfuerzo principal mayor y σ_3 el esfuerzo principal menor.
 τ_m : Esfuerzo tangencial
 Φ : Angulo de
 σ_m : Esfuerzo

Para el criterio de Mohr – Coulomb (FIGURA 2) se puede observar en términos simples que la resistencia al corte de los suelos se realiza generalmente por dos componentes:

- Fricción ($\tan\phi$): es debida al entrelace de las partículas y la fricción entre ellas cuando son sometidas a un esfuerzo normal.
- Cohesión (c_u): es debida a fuerzas internas que mantienen las partículas del suelo juntas en una masa sólida.

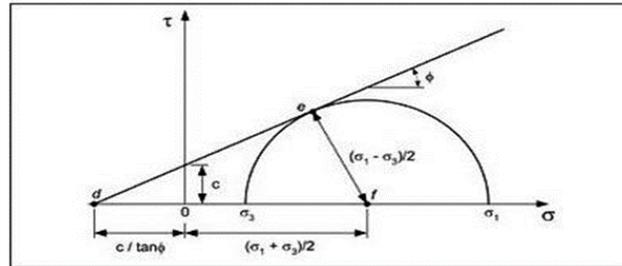


Figura 2: Círculo de Mohr-Coulomb.

Sin embargo, la ecuación anterior no condujo siempre a diseños satisfactorios para estructuras de suelo hasta que Karl von Terzaghi se percató de que el agua no puede soportar esfuerzos cortantes substanciales, por lo que la resistencia al corte de un suelo debe ser el resultado únicamente de la resistencia a la fricción que se produce en los puntos de contacto entre partículas; la magnitud de ésta depende solo de la magnitud de los esfuerzos efectivos que soporta el esqueleto de suelo. Por lo que la ecuación de Coulomb que se muestra anteriormente es aplicable únicamente para esfuerzos totales.

Siendo así que Terzaghi publicó el principio de esfuerzos efectivos, donde dice que el esfuerzo total ejercido en un suelo es la adición del esfuerzo que soporta el esqueleto del suelo (esfuerzo efectivo) con la presión que ejercen los poros del mismo suelo:

$$\sigma = \sigma' + u$$

Ecuación 4 Esfuerzo efectivo

Donde:

- σ : esfuerzo total
 σ' : esfuerzo efectivo
 u : presión de poros

Cuando se consideran esfuerzos efectivos, esta ecuación tiene que ser modificada para tomar en cuenta las presiones de poro. Dicha ecuación es:

$$\tau = c_u' + \sigma' \tan \phi'$$

Ecuación 5 Esfuerzo efectivo

En la cual los parámetros c_u' y ϕ' son propiedad del esqueleto de suelo, denominados cohesión efectiva y ángulo de fricción efectiva, respectivamente.

El componente friccionante aumenta conforme aumenta el esfuerzo normal, pero la componente de cohesión permanece constante. Si no hay esfuerzo normal la fricción desaparece.

Los suelos pueden clasificarse en tres categorías relacionadas con sus propiedades de resistencia:

- 1) Suelos friccionantes o no cohesivos: suelos granulares. Estos suelos no poseen cohesión ($c_u=0$), pero deriva su resistencia al corte gracias a la fricción intergranular. Su envolvente de falla pasa por el origen.
- 2) Suelos cohesivos: como las arcillas saturadas, las cuales presentan cohesión, pero si no ocurre un cambio de contenido de agua durante un ensaye la envolvente de falla será virtualmente horizontal ($\phi=0$).
- 3) Suelos cohesivos-friccionantes: los cuales poseen cohesión tanto como fricción.

1.6.6.4. Relación esfuerzo deformación

Cuando un suelo es sujeto a esfuerzos, se generan deformaciones. Para determinar la relación esfuerzo – deformación comúnmente se traza la curva esfuerzo – deformación.

El grado de deformación producido por un esfuerzo dependerá de la composición, relación de vacíos, esfuerzo aplicado, módulo de elasticidad, etc.

Una simplificación común es la de asumir que el suelo es un material isotrópico y elástico para facilitar el análisis de su comportamiento cuando es sometido a cargas externas.

Esto es válido para ciertas condiciones de análisis dependiendo.

1.6.6.5. Ensayo de compactación Proctor

El ensayo de compactación Proctor, desarrollado por el ingeniero Ralph R. Proctor, es uno de los procedimientos más usados para el control de la compactación de suelos. Éste consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es alcanzar una densidad específica con cierto contenido de agua, con el fin de garantizar y obtener la densidad máxima o requerida del suelo.

Es sabido que al aumentar la humedad de un suelo su densidad se incrementa hasta alcanzar un punto máximo denominado humedad óptima. Al llegar a ese punto, cualquier aumento de humedad no contribuirá a una mayor densificación del suelo, por el contrario, existirá una reducción en esta.

Los ensayos más comunes son el Proctor estándar (ASTM D-698) y modificado (ASTM D1557). En ambos ensayos se usa el suelo mezclado con diferentes cantidades de agua, colocándolas en un molde con medidas específicas y compactándolas con un pisón, registrando las humedades y densidades secas correspondientes. Estos valores se colocan en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad (%) y la ordenada a la densidad seca, pudiendo con éstos trazar una curva en la que se define el punto máximo de densidad seca y con él la humedad óptima para dicho suelo.

La diferencia entre la prueba Proctor estándar y la modificada es la energía de compactación utilizada. En la estándar se deja caer un peso de 2.49 kg de una altura de 30.5cm compactando el suelo en tres capas con 25 golpes; y en el modificado se utiliza un peso de 4.54 kg a una altura de 45.7 cm compactando el suelo en 5 capas con 50 golpes a cada una. Esta diferencia se debe a la evolución de los equipos de compactación con mayor peso, lo que permite densidades más altas en el campo. En resumen, la calidad de compactación depende del contenido de humedad, método de compactación y energía de compactación.

1.6.6.6. Pruebas de compresión rápidas

Las pruebas que se describirán son rápidas y simples, donde no se permite el cambio en contenido de humedad del espécimen cilíndrico durante el ensaye de compresión axial.

Estas pruebas se dividen en dos categorías:

- Pruebas de compresión uniaxial o no confinadas.

- Pruebas de compresión triaxial.

La primera prueba es un caso especial de la compresión triaxial donde el esfuerzo de confinamiento es nulo, en el cual no se requiere de un aparato que aplique confinamiento.

Para que una prueba de compresión esté dentro de la clasificación “rápida”, debe de cumplir con los siguientes requisitos:

- A un espécimen cilíndrico de suelo se le aplica un incremento de carga axial hasta que sucede la falla. En la prueba no confinada, la carga axial es la única fuerza o esfuerzo aplicado al espécimen. En una prueba triaxial se aplica al espécimen una presión de confinamiento inicial, la cual se mantiene constante mientras se incrementa la carga axial.
- No se permite el drenaje del espécimen durante la aplicación de la presión de confinamiento ni durante la carga axial. Es por ello que estas pruebas se denominan como pruebas “no drenadas”, por lo que no existe cambio en el contenido de humedad ni el volumen de la probeta.
- La proporción altura: Para las normas ASTM es permisible la proporción 3:1. Si la proporción es menor que 2:1, los resultados pueden ser influenciados por las condiciones de la frontera. Si la proporción es mayor que 3:1 puede ocurrir que el espécimen falle por deformación excesiva.
- Existe un control de la deformación por medio de la aplicación de una velocidad constante de compresión, usualmente es del 2% de deformación de la altura del espécimen por minuto. Rangos del 0.3%-10% deformación/min de deformación dan pequeñas diferencias en los resultados, pero el 2% deformación/min es una velocidad aceptada como estándar.
- La falla normalmente implica la condición donde el espécimen no soporta más incremento en el esfuerzo o la deformación alcanza cierto porcentaje.

Tipos de fallas:

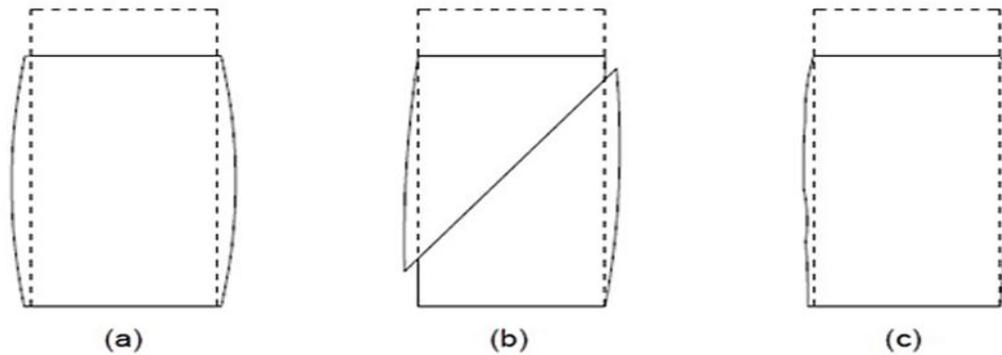


Figura 3: Tipos de falla: a) Falla plástica, b) Falla frágil y c) Falla intermedia.

- a) Falla plástica, en la cual el espécimen experimenta una deformación lateral (en forma de barril) sin la generación de fisuras.
- b) Falla frágil, donde el espécimen experimenta una fisura diagonal, debido a los esfuerzos cortantes sobre una o más superficies bien definidas.
- c) Falla intermedia o compuesta donde también el espécimen experimenta fisuras.

1.6.6.7. Resistencia al corte de suelos cohesivos

Lo ideal es determinar parámetros del suelo por medio de pruebas triaxiales con especímenes inalterados. La resistencia al corte de los suelos cohesivos depende de diferentes factores, tales como su composición mineralógica, tamaño de las partículas, forma, textura, estructura de los granos y su contenido de humedad.

1.6.7. Mezclado de inclusión – suelo

El refuerzo de un suelo por medio de fibras discretas parte de la teoría de que éstas se encuentran distribuidas aleatoriamente en el espécimen para que no se presenten planos de debilidad y así poder absorber la energía aplicada al suelo bajo cualquier condición de carga incrementando la estabilidad en el espécimen.

Para lograr lo anterior, la estabilidad de un suelo reforzado por fibras aleatoriamente distribuidas está en función del adecuado proceso de mezclado. Para cada tipo de suelo, dependiendo de sus propiedades físicas y cantidad de suelo que se requiera mezclar, el procedimiento podrá ser diferente y no se cuenta con un protocolo estandarizado a seguir.

Diferentes autores relacionados han propuesto diversos métodos para el mezclado de suelos cohesivos con inclusión de fibras:

- Andersland O.B. et al. (1979) Secaron las fibras de pulpa y las mezclaron con caolinita igualmente seca en concentraciones previamente determinadas. Agregaron agua en cantidad necesaria hasta formar una suspensión acuosa. Esta suspensión se consolidó hasta que la masa formara un cilindro blando, de la cual pequeñas muestras podían ser cortadas en tamaños deseados para realizar las pruebas. Una cortadora rotativa de alta velocidad minimizó los problemas con los cortes realizados a la mezcla de suelo-fibra.
- M. Mirzababaei et al. Con el fin de preparar una mezcla uniforme de la arcilla con la fibra, se llevaron a cabo varias pruebas. Para la realización de los ensayos triaxiales adoptaron la siguiente metodología para obtener una mezcla suelo-fibra uniforme. Primero, la cantidad de fibra requerida, basada en el peso seco del suelo, es pesada y mezclada con agua hasta que todas las fibras estén húmedas. Para crear la muestra se esparce sobre las fibras mojadas un 20% del suelo requerido y se mezclan uniformemente hasta que las fibras sean cubiertas por una fina capa de suelo. La mezcla preparada se coloca en horno a una temperatura de 105°C. Cuando la mezcla esté completamente seca, se tritura el suelo hasta que tenga forma de polvo y las fibras se dejan intactas. Se le agrega la cantidad requerida de agua para satisfacer que tenga la humedad predeterminada y al final se mezcla con el suelo restante.
- Pradhan P.K. et al. Realizaron procedimientos de mezclado para sus pruebas triaxiales, donde las fibras fueron cortadas en longitudes promedio de 15, 20 y 25 mm, las cuales se consideraron para tres diferentes porcentajes en la investigación. El suelo seco se hizo pasar por un tamiz de 2 mm. Las fibras se agregaron a dicho suelo, variando sus porcentajes entre 0 - 1% del peso del suelo.

1.6.7.1. Mezclado en laboratorio

El mezclado del suelo con fibras de PET realizado en laboratorio presenta limitaciones para contenidos de fibra superiores al 1.5%, debido a que se forman grumos. Por esta razón, se decidió no sobrepasar $q=1.5\%$ del contenido de fibra.

El mezclado de suelo-fibra-agua fue hecho sobre una bandeja metálica no porosa para evitar la pérdida de agua. La mezcla se realizó manualmente hasta alcanzar la homogeneidad.

Es importante mencionar, que éste procedimiento es una alternativa al descrito por otros autores. Se experimentó con tres diferentes tipos de mezclado:

1) Capa de suelo seco + Capa de agua + Capa de PET.

Los 3 elementos separados en capas en el orden mencionado. Al mezclar de esta forma no es muy buena la homogenización de los materiales, ya que cuesta más trabajo mezclar el agua con el suelo para que obtenga la humedad óptima y las fibras de PET no son capaces de mezclarse totalmente con el suelo.

2) Capas proporcionales.

En esta prueba se separó en 6 capas la cantidad completa necesaria para formar 1 probeta, siendo la distribución de esta forma:

120 gramos de suelo / 6 capas = 20 grs de suelo por capa

49.20 gramos de agua / 6 capas = 8.2 grs de agua por capa

12 grs de PET / 6 capas = 2 grs de PET por capa

Esta técnica tiene el mismo resultado que la primera técnica propuesta y el agua se evapora de forma más rápida.

3) Mezcla de agua con suelo y posteriormente adiciones de las fibras de PET.

Esta técnica tiene mejores resultados que los dos mencionados anteriormente, la mezcla de suelo y agua se puede hacer de forma muy fácil, alcanzando rápidamente el porcentaje de humedad óptimo. Una vez mezclado el suelo con el agua se agregan las fibras de PET disgregadas y se vuelve a mezclar, esta vez se puede observar que el PET tiene mejor adherencia con el suelo ya mezclado.

La técnica 3 fue la que se usó para elaborar todas las probetas de esta investigación.

1.6.7.2. Mezclado en campo

En esta tesis se describirá un procedimiento constructivo usando fibras de P.E.T. con suelo.

Fernández Loaiza Carlos (1992) describe un método adicional en su libro “Mejoramiento y estabilización de suelos”, el cual se presenta a continuación:

1) Disgregación:

Para disgregar las arcillas se pueden emplear arados de discos o de rastras.

2) Mezclado:

De acuerdo al peso seco del suelo, se le agrega la proporción de la inclusión

previamente determinada. El mezclado se realiza en parte durante el proceso de disgregación, aplicando una tercera parte del refuerzo al suelo, para posteriormente mezclar parcialmente con una Motoconformadora, repitiendo lo anterior dos veces sucesivas, empleando en cada vez un tercio del refuerzo total, buscando la homogeneidad.

Si el suelo cohesivo está saturado, la mezcla de éste con la inclusión podrá dificultarse, por lo que se recomienda utilizar revolvedoras que funcionen como hornos para secar el suelo arcilloso y obtener una mezcla homogénea. No se deberá realizar la mezcla en situación de viento excesivo para evitar pérdidas del material de refuerzo y contaminación de la zona.

3) Adición de agua de compactación:

Esta es una operación que deberá controlarse de forma continua, ya que durante el tiempo caluroso puede evaporarse el agua de compactación rápidamente, por lo cual es conveniente que las etapas de construcción posteriores a la adición del agua se lleven a cabo lo más rápidamente posible, e inclusive se puede llegar a requerir que dichas etapas se realicen durante la noche. Es necesario cuidar la cantidad de agua que se usará para lograr la humedad óptima, ya que se obtendrán resultados deficientes al compactar. Se debe humedecer y escarificar a las superficies expuestas del suelo antes de colocar una capa para lograr una mejor adhesión y compactar.

4) Suelo de apoyo de la capa estabilizada:

El suelo sobre el cual se va a colocar la capa estabilizada deberá estar previamente nivelado y compactado. Cuando se juzgue necesario, deberá colocarse una capa de material granular que sirva para cortar la ascensión capilar.

5) Mezclado extendido del material:

El mezclado del suelo con el agua puede efectuarse con Motoconformadora, repitiendo las operaciones todas las veces que se juzgue necesario hasta obtener un material uniforme y homogéneo. Así mismo, la Motoconformadora sirve para el extendido del material, debiéndose comprobar en diferentes puntos, la uniformidad en los espesores tendidos.

6) Compactación:

La operación de compactación puede llevarse a cabo en cualquier forma convencional existente. El rodillo pata de cabra resulta adecuado en el caso de suelos finos y generalmente se ha recomendado lastrarlos para lograr mayor eficiencia. Se recomienda su empleo en la compactación inicial utilizando presiones de contacto de 5 a 9 kg/cm² para suelos limosos o

finos sin cohesión, de 7 a 14 kg/cm² para suelos con arcilla de plasticidad alta. Se recomienda asimismo no compactar por capas con espesores superiores a los 15 cm.

Para tener una mezcla en campo lo más uniforme posible, se recomienda seguir los siguientes procesos: Alcanzar, salvo criterios específicos de la obra, densidades del orden del 95% del Proctor estándar.

A la fecha se han aplicado con éxito y eficiencia algunas máquinas que en forma automática recogen el material acamellonado que generalmente en una sola pasada pulverizan, mezclan en seco con otro material, humedecen, vuelven a mezclar en húmedo y finalmente distribuyen el compuesto. Estas máquinas, en general, son móviles y realizan su trabajo in situ, aunque también existen instalaciones fijas que fabrican la mezcla de un punto del cual se recoge en camiones que la trasladan al lugar para su colocación.

1.7. Definición de términos básicos.

- **SUELOS COHESIVOS:** Suelo constituido por partículas muy pequeñas donde predominan los efectos electroquímicos superficiales. Las partículas tienden a juntarse (interacción agua/partícula) en suelos plásticos como las arcillas, ocasionando que se adhieran entre sí. Cuando el suelo es más cohesivo, es porque tiene mayor cantidad de arcilla. Presentan baja capacidad de soporte, altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta su uso para construir estructuras terreas. (Duque Escobar 2013).
- **POLIETILENO TEREFTALATO (PET):** Es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante extrusión, inyección, inyección y soplado, soplado de preforma y termo conformado. Para evitar el crecimiento excesivo de las esferulitas y lamelas de cristales, este material debe ser rápidamente enfriado, con lo que se logra una mayor transparencia. El PET está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se hace combinando el ácido tereftálico y el etilenglicol. (Ministerio del Ambiente, México 2015).

- **FIBRAS SINTÉTICAS:** La fibra sintética es una fibra textil que proviene de diversos productos derivados del petróleo. Las fibras artificiales no son sintéticas, pues estas proceden de materiales naturales, básicamente celulosa. Algunas veces la expresión “fibras químicas” se utiliza para referirse a las fibras artificiales y a las sintéticas en conjunto, en contraposición a fibras naturales. Así, las fibras sintéticas son enteramente químicas: tanto la síntesis de la materia prima como la fabricación de la hebra o filamento son producto del ser humano. Con la aparición y desarrollo de las fibras sintéticas la industria textil ha conseguido hilos que satisfacen la demanda que plantean las nuevas técnicas de tejeduría y los consumidores. (Udale 2008).
- **FIBRAS PET:** Son fibras sintéticas de material termoplástico (a presiones y temperaturas adecuadas puede ser fundido y moldeado nuevamente) obtenidas del reciclaje o directamente del polietileno tereftalato PET. Están constituidas por petróleo crudo, gas y aire. (Ministerio del Ambiente, México, 2015).
- **REFORZAMIENTO DE SUELOS:** Método para el mejoramiento de suelos que implica la adición de materiales de refuerzo. El refuerzo de suelos tiene como principal propósito incrementar la estabilidad, aumentar la capacidad de carga y reducir los asentamientos del suelo reforzado. Para el reforzamiento de suelos se puede hacer uso de materiales sintéticos provenientes de los polímeros como son las mallas sintéticas, los geotextiles y geogrillas, fabricadas con materia prima proveniente del plástico como son las fibras sintéticas de polietileno tereftalato. (Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá 2014).
- **TERRAPLENES:** El término terraplén tenemos que comenzar exponiendo que deriva del francés, concretamente de la suma de dos palabras “terre” (tierra) y “plein” (lleno). No obstante, no hay que pasar por alto tampoco que precisamente esa voz gala había sido tomada de un verbo italiano del siglo XVI: “terrapienare”, que puede traducirse como “llenar de tierra”. Dicha expresión se convirtió, en nuestra lengua, en terraplén: la tierra que se emplea para construir un camino o una estructura defensiva, o que se utiliza con el objetivo de rellenar algún espacio. La noción también se usa con referencia a un desnivel. En ingeniería civil se denomina

terraplén a la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra. (Real Academia de Ingeniería de España 2014).

- **PRUEBA DE COMPRESIÓN TRAXIAL:** Su principal finalidad es obtener parámetros del suelo y la relación esfuerzo deformación a través de la determinación del esfuerzo cortante. Es un ensayo complejo, pero la información que entrega es la más representativa del esfuerzo cortante que sufre una masa de suelo al ser cargada. Consiste en colocar una muestra cilíndrica de suelo dentro de una membrana de caucho o goma, que se introduce en una cámara especial y se le aplica una presión igual en todo sentido y dirección. Alcanzado ese estado de equilibrio, se aumenta la presión normal ó axial (σ), sin modificar la presión lateral aplicada (σ_3), hasta que se produzca la falla. Realizando por lo menos 3 pruebas, con presiones laterales diferentes, en un gráfico se dibujan los círculos de Mohr que representan los esfuerzos de falla de cada muestra y trazando una tangente o envolvente a éstos, se determinan los parámetros ϕ y c del suelo. Dependiendo del tipo de suelo y las condiciones en que este trabajará, las alternativas para realizar el ensayo serán consolidados no drenado (CU), no consolidado no drenado (UU) o consolidado drenado (CD). (Almanza Álvarez 2015)
- **CÍRCULOS DE MOHR:** Es una técnica usada en ingeniería y geofísica para representar gráficamente un tensor simétrico (de 2x2 o de 3x3) y calcular con ella momentos de inercia, deformaciones y tensiones, adaptando los mismos a las características de una circunferencia (radio, centro, etc). También es posible el cálculo del esfuerzo cortante máximo absoluto y la deformación máxima absoluta. Este método fue desarrollado hacia 1882 por el ingeniero civil alemán Christian Otto Mohr (1835-1918). (Li et al. 2014).

1.8. Formulación de la hipótesis.

1.8.1. Hipótesis general

El reforzamiento de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET), incrementaran los valores de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de terraplenes de obras viales conformados por este suelo, lo cual hará viable su empleo en este tipo de estructuras terreas.

1.8.2. Hipótesis específicas

El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) de 15 μm de diámetro y 30 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, incrementaran progresivamente los valores de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales conformados por suelos cohesivos; alcanzándose los mejores resultados con el porcentaje de adición al 1.5%, además debido al tamaño de las fibras se logrará un mezclado más uniforme y de fácil trabajabilidad manteniéndose una cohesión casi inalterada.

El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) de 15 μm de diámetro y 60 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, incrementarán progresivamente los valores de resistencia y deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales, pero disminuirán su estabilidad, debido a la pérdida de cohesión ocasionada por el aumento de longitud de las fibras de refuerzo utilizadas, sin embargo, la estabilidad seguirá estando por encima de los límites permitidos, lo cual haría aún viable su empleo en este tipo de estructuras terreas.

Material y Métodos

2.1. Material:

a) Materiales

- **Materiales de escritorio**
 - Hojas de papel bond
 - Lapiceros
 - Laptop
- **Instrumentos secundarios o auxiliares**
 - Palanas
 - Cinta métrica
 - Jalones
- **Software**
 - Excel office 2010
 - Word office 2010
 - AutoCAD 2018
 - S10
- **Fuentes**
 - Reglamento nacional de edificaciones
 - Libros
 - Tesis
 - informes

b) Humano.

Carlos Martin Carrillo Vega.

Josualdo Carlos Villar Quiroz.

c) Servicios.

Para la presente investigación no se requerirá servicios adicionales.

d) Otros

2.2. Material de estudio.

2.2.1. Población.

Toda la población contemplada en la presente investigación consta de 312 kilogramos de suelo cohesivo extraído de tres puntos de investigación (calicatas) en la carretera de acceso a la sierra Liberteña, en la progresiva KM 52 + 000.00, a la altura del sector Plazapampa, Otuzco, departamento de La Libertad. Estos suelos extraídos serán reforzados con diferentes porcentajes de adición de fibras de tereftalato PET, para luego ser caracterizados y evaluados según su desempeño mediante ensayos de laboratorio.



Figura 4:



Figura 5:

2.2.2. Muestra.

Muestra no probabilística e intencional, Porque se escoge sus unidades no en forma fortuita, sino en forma arbitraria, designando a cada unidad según características que al investigador resulten de relevancia (Sabino 1996).

Tamaño de la muestra: Son 312 kg de suelo cohesivo extraído de tres puntos de investigación (calicatas) en la carretera de acceso a la sierra, a la altura del kilómetro 52, en el sector Plazapampa, Otuzco, departamento de La Libertad. Se realizó tres puntos diferentes, con el propósito de alcanzar la cantidad de muestra necesaria con las características de suelo

requeridas para llevar por buen término la investigación. El suelo cohesivo extraído será reforzado con fibras PET de 30 mm y 60 mm al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5%. y se utilizará en su totalidad para la realización del presente estudio experimental según el detalle siguiente:

Tabla 1:

Tamaño de muestra requerido.

ENSAYOS	NORMA	N° DE ENSAYOS	CANTIDAD POR ENSAYO (Kg)	TAMAÑO DE MUESTRA TOTAL (kg)
PROPIEDADES FÍSICAS				
Análisis Granulométrico	MTC E-204	1	0.2	0.2
Contenido de Humedad	MTC E-108	3	0.5	1.5
Límite Líquido	MTC E-111	4	0.2	0.8
Límite Plástico	MTC E-111	4	0.2	0.8
Gravedad Específica	MTC E-113	3	0.5	1.5
PROPIEDADES MECÁNICAS				
Proctor Modificado	MTC E-114	27	3	81
Relación Soporte (CBR)	MTC E-117	27	5	135
Prueba de compresión triaxial estática (no consolidada, no drenada) con confinamientos de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm ²	MTC E-131	81	0.6	48.6
TOTAL:				271
Factor de corrección por desperdicio				1.15
TOTAL REQUERIDO:				312

Para todos y cada uno de los ensayos a realizar en esta investigación se hará el uso de las herramientas y equipos detallados en las normas y procedimientos para cada experimento que se ha de realizar.

Los ensayos de laboratorio se realizarán en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Privada de Trujillo.

Al terminar, se hizo el traslado de la muestra al laboratorio de Mecánica de Suelos de La Universidad Privada Trujillo para realizar el análisis de características físicas y mecánicas del suelo.

Al terminar, se hizo el traslado de la muestra al laboratorio de Mecánica de Suelos de La Universidad Privada Trujillo para realizar el análisis de características físicas y mecánicas del suelo.

2.3. Técnicas, procedimientos e instrumentos.

2.3.1. Para recolectar datos.

Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos de la presente investigación será por medio de la observación directa, la cual permite la visualización y registro de las calicatas realizadas como unidades de control, en formatos diseñados para cada tipo de estudio, conservándose el orden, la precisión y coherencia de los datos obtenidos.

Este proceso de conocimiento permite percibir deliberadamente el tipo de suelo que existe en el desarrollo de esta investigación en la carretera de acceso a la sierra, altura del kilómetro 52, en el sector Plaza pampa, Otuzco, departamento de La Libertad.

2.3.2. Para procesar datos.

Instrumentos de recolección de datos

Los formatos de elaboración propia diseñados para el registro de los datos obtenidos de cada una de las calicatas en la carretera de acceso a la sierra, altura del kilómetro 52, en el sector Plaza pampa, Otuzco, departamento de La Libertad serán adjuntados al final del presente informe.



La técnica de recolección de datos será por medio de la observación directa, la cual permite visualizando cada ensayo y registrar todos los resultados de los mismos de manera sistemática, en formatos estándares de cada estudio para poder tener un orden preciso y coherente de todos los datos obtenidos.

2.4. Operacionalización de variables.

Tabla 2:

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS
REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES	Consiste en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y deformabilidad sin agrietarse del suelo cohesivo para su uso en terraplenes de obras viales a través de métodos o procedimientos mecánicos de incorporación de fibras sintéticas como material de refuerzo. En este caso será a través de la adición de fibras de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado. (Dirección electrónica en Referencias Bibliográficas)	En la evaluación del desempeño de terraplenes con dimensiones estándar a partir de los parámetros geotécnicos del suelo cohesivo con y sin reforzamiento de fibras, cuyas muestras representativas serán tomadas por medio de calicatas, en la carretera de acceso a la sierra liberteña a la altura del kilómetro 52 en el sector Plazapampa, en Otuzco, departamento de La Libertad.	Caracterización geotécnica del suelo cohesivo Máxima densidad seca del suelo cohesivo. Humedad Óptima del suelo cohesivo. Parámetros de suelo cohesivo con y sin reforzamiento: Esfuerzo-Deformación, Módulo de Elasticidad, Esfuerzo Cortante, Porcentaje de Deformación.	Estudio de Mecánica de Suelos Ensayo de Proctor Modificado Prueba de compresión triaxial estática (no consolidada, no drenada) con confinamientos de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm ²	-Contenido de humedad -Granulometría -Límites de Atterberg -Gravedad específica -Clasificación de suelos (AASHTO y SUCS). -Contenido de humedad -Límites de Atterberg -Clasificación de suelos (AASHTO y SUCS). -Máxima densidad seca -Humedad Óptima -Esfuerzo Cortante según los confinamientos (0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm ²)



<p>Capacidad de Soporte Relativo del suelo con y sin CBR reforzamiento.</p>	<p>-Máxima densidad seca -Humedad Óptima</p>
<p>Evaluación con software del desempeño de terraplenes con dimensiones estándar.</p>	<p>Mediante fórmulas y uso del software SLIDE 6.0 para el cálculo de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de terraplenes con dimensiones estándar (conformados por suelos cohesivos con y sin reforzamiento de fibras).</p> <p>-Angulo de Fricción -Cohesión -Peso Especifico -Módulo de Elasticidad -Porcentaje de Deformación -%CBR</p>

Resultados

Este capítulo presenta los resultados de las pruebas de laboratorio. La propiedad ingenieril relevante del suelo se evalúa para muestras de suelos naturales y reforzados (Muestra Tratada y Muestra No Tratada) por separado. Las pruebas incluyen Límites De Consistencia, Granulometría, Gravedad Específica, Contenido de Humedad, Proctor Modificado, Relación Soporte (Cbr) Y Prueba de Compresión Triaxial Estática.

Los resultados de las pruebas que se muestran en este capítulo fueron obtenidos en el laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional de Trujillo. Igualmente, todo el equipo y material necesario para su realización fue proporcionado por esta institución.

3.1. Caracterización Geotécnica del Suelo Cohesivo

3.1.1. Determinación de la granulometría del suelo

El material se preparó utilizando la norma ASTM D421-85(2007), mientras que la prueba del análisis granulométrico se determinó siguiendo la norma ASTM D42263 (2007). El análisis granulométrico se realizó utilizando procedimientos mecánicos, realizando un tamizado para las partículas mayores a 75 μm y para las menores por hidrómetro. La curva granulométrica del material se puede apreciar en la **figura 6**.

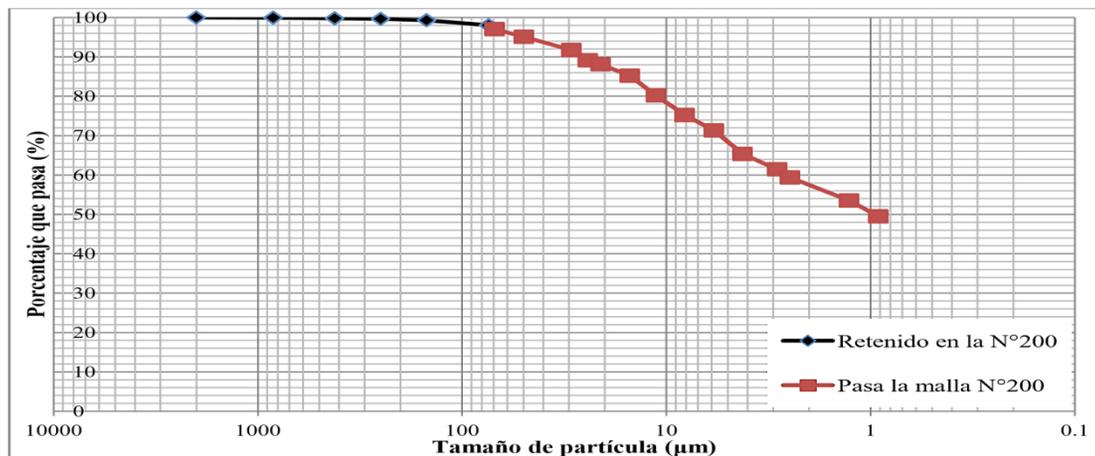


Figura 6: Composición granulométrica del material.

En figura se puede observar que el suelo está conformado en su gran mayoría por material considerado como fino, siendo este el 98.1% del total de la muestra representativa, del cual 41.05% corresponde a limos mientras que las partículas menores consideradas como arcillas son el 57%.

3.1.2. Clasificación del suelo

Previamente se había determinado que el material utilizado corresponde a un suelo fino, además, a éste se le realizó un proceso de tamizado por la malla #60 con objetivo de asegurarse que todas las partículas de suelo sean menores o iguales a 250 µm.

Para clasificar el suelo, se realizaron las pruebas de los límites de Atterberg, obteniendo el índice de plasticidad, necesario para su clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS).

Se realizaron dos mediciones para conseguir el límite plástico (PL) del suelo. Con el promedio se obtuvo el contenido de humedad (w) para el límite plástico.

Tabla 3:

Resultados de la prueba de límite plástico.

LÍMITE PLÁSTICO							
No. Ensayo	No. Tara	Peso tara + suelo seco (gr)	Peso de tara + suelo seco (gr)	Peso del agua (gr)	Peso de tara (gr)	Peso del suelo seco (gr)	Contenido de agua (%)
1	34	47.481	46.646	0.835	45.712	0.934	89.4
2	31	48.359	47.462	0.897	46.438	1.024	87.5

El promedio de las 2 mediciones es de 88.45%.

Para el límite líquido se realizaron 4 ensayos.

Tabla 4:

Resultados de la prueba de límite líquido.

LÍMITE LÍQUIDO											
No. Ensayo	No. Tara	No. Golpes			Peso de tara + suelo húmedo (grs)	Peso tara + suelo seco (grs)	Peso del agua (grs)	Peso tara (grs)	Peso suelo seco (grs)	Contenido de agua (%)	
1	56	36	36	37	65.628	59.987	5.641	57.896	2.091	269.78	
2	55	26	26	26	66.723	62.811	3.912	61.415	1.396	280.23	
3	122	17	16	17	75.682	68.863	6.819	66.594	2.269	300.53	
4	57	8	7	8	67.034	62.138	4.896	60.62	1.518	322.53	

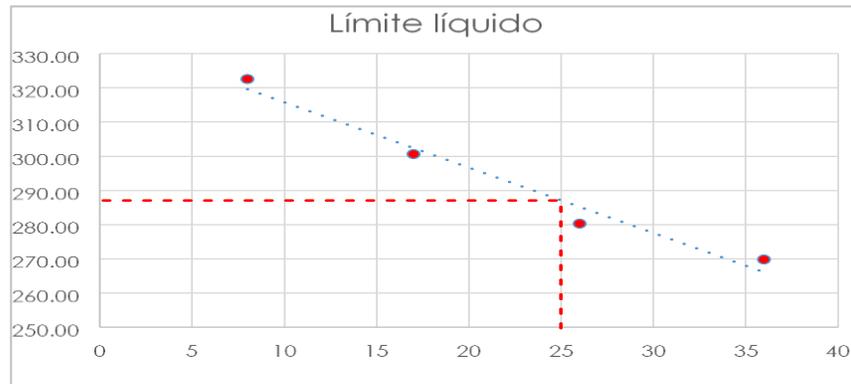


Figura 7: Límite Líquido.

La ecuación de la recta en la gráfica para determinar el porcentaje de humedad óptimo es: $Y = -1.9111(X) + 334.83$ (ésta es tomada del software donde se graficó).

m=	-1.9111
b ₀ =	334.83

x	y
25	287.0525

Se sabe que el contenido de humedad del límite líquido (LL) es aquel donde el número de golpes (N) es igual a 25. Para determinar el contenido de humedad (w) en ese punto, con los puntos graficados se realiza el ajuste de una función por mínimos cuadrados, obteniéndose la ecuación:

$$W = -0.066 \ln(N) + 1.109$$

Ecuación 5.1 Contenido de humedad

Se utiliza esta ecuación para sustituir a N con un valor de 24 y se determina el contenido de humedad para el límite líquido, el cual es: $LL = 283.18\%$.

Posteriormente se determina el índice de plasticidad (PI) del suelo mediante la diferencia de los contenidos de humedad del límite líquido con el límite plástico.

$$283.18\% - 88.45\% = 194.73\%$$

Sabiendo que el suelo cuenta con un $LL = 283.18\%$ y un $PI = 194.73\%$ se ingresa con dichos valores a la gráfica de plasticidad. Prolongando las rectas el suelo se encuentra por debajo de la línea A que separa a las arcillas de los limos. Siendo el suelo un limo de alta plasticidad (MH).

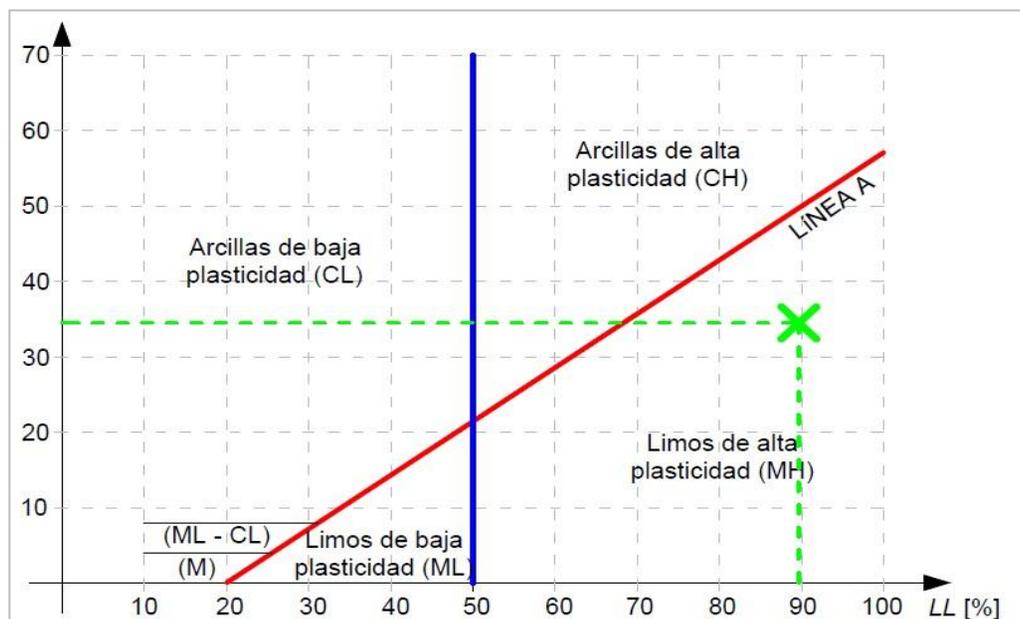


Figura 8: Gráfica de Clasificación SUCS.

3.1.3. Gravedad específica

Para la gravedad específica se determinaron los datos que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5:

Resultados del gravedad específica.

GRAVEDAD ESPECÍFICA			
Peso muestra (gr)	Peso + cera (gr)	Peso en agua (gr)	eso de la cera (gr)
140.8	148.5	148.4	7.6
Volumen (m3)	Volumen (cm3)	Peso efectivo (gr)	Peso específico (kg/m3)
0.000120	120	140.8	852.27

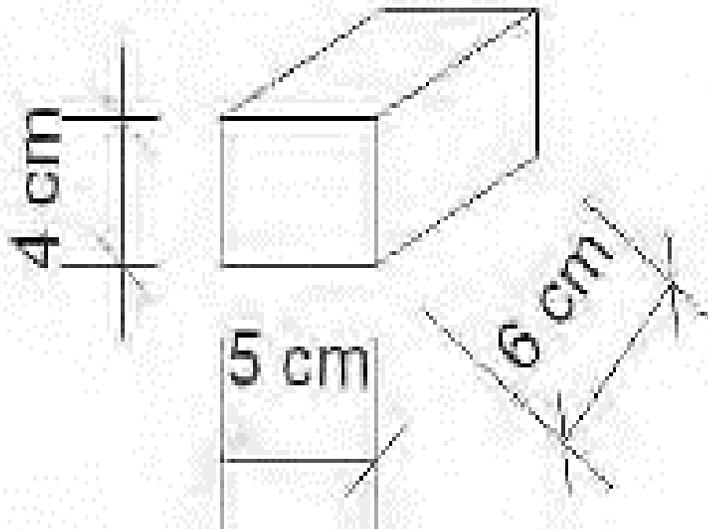


Figura 9: Dimensiones del cubo para determinar el peso específico del suelo..

El peso del suelo es de 852.27 kg/m³ aproximadamente.

3.2. Máxima Densidad Seca y Humedad Óptima del Suelo Cohesivo.

Se conformaron 6 probetas para determinar la curva de humedad óptima, cada probeta se elaboró con 120 gramos de suelo y un porcentaje de humedad distinto. Los porcentajes de humedad se encuentran entre el 35% y 45%. Finalmente, para comprobar que el 41% de humedad era la cantidad óptima de agua se repitió una probeta con 40% de agua.

Tabla 6:

Determinación de la humedad óptima.

DETERMINACIÓN DE HUMEDAD OPTIMA										
Porcentaje de agua teórico (%)	Peso de suelo (gr)	Peso de agua teórico (gr)	Peso del molde (gr)	Peso del molde + probeta h (gr)	Peso de la probeta h (gr)	No. Tara	Peso de Tara (gr)	Tara + Muestra h (gr)	Tara + muestra seca (gr)	% Real de Agua
35 %	120	38.5	1033.1	1163.5	130.4	80	124.2	177.3	163.7	34.43%
37 %	120	44.4	1033.1	1169	135.9	95	126.2	172.5	159.8	37.80%
40 %	120	48	1033.1	1175.9	142.8	99	123.5	168.5	155.4	41.07%
43 %	120	516	1033.1	1173.9	140.8	80	124.2	163.9	152.1	42.29%
45 %	120	54	1033.1	1171.7	138.6	142	115	158.6	144.7	46.80%
40 %	120	48	1033.1	1174	140.9	109	121	156.3	146.1	40.64%

Tabla 7:

Resultados del peso volumétrico seco.

PESO VOLUMÉTRICO SECO			
Contenido de agua %	W material en molde (gr)	Volumen del molde (m ³)	γ_d (gr/cm ³)
34.43 %	130.4	9.16E + 01	1.42
37.80 %	135.9	9.16E + 01	1.48
40.64 %	140.9	9.16E + 01	1.53
41.07 %	142.8	9.16E + 01	1.55
42.29 %	140.8	9.16E + 01	1.53
46.80 %	138.6	9.16E + 01	1.51

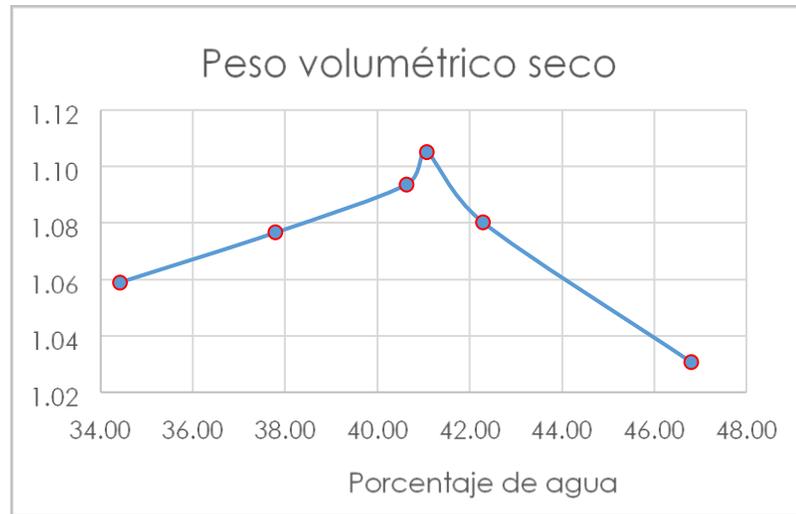


Figura 10: Gráfica del Peso Volumétrico seco.

Tabla 8:

Resultados del peso volumétrico húmedo

PESO VOLUMÉTRICO HUMEDO			
Contenido de agua %	W material en molde (gr)	Volumen del molde (m³)	γ_d (gr/cm³)
34.43 %	130.4	9.16E + 01	1.42
37.80 %	135.9	9.16E + 01	1.48
40.64 %	140.9	9.16E + 01	1.53
41.07 %	142.8	9.16E + 01	1.55
42.29 %	140.8	9.16E + 01	1.53
46.80 %	138.6	9.16E + 01	1.51

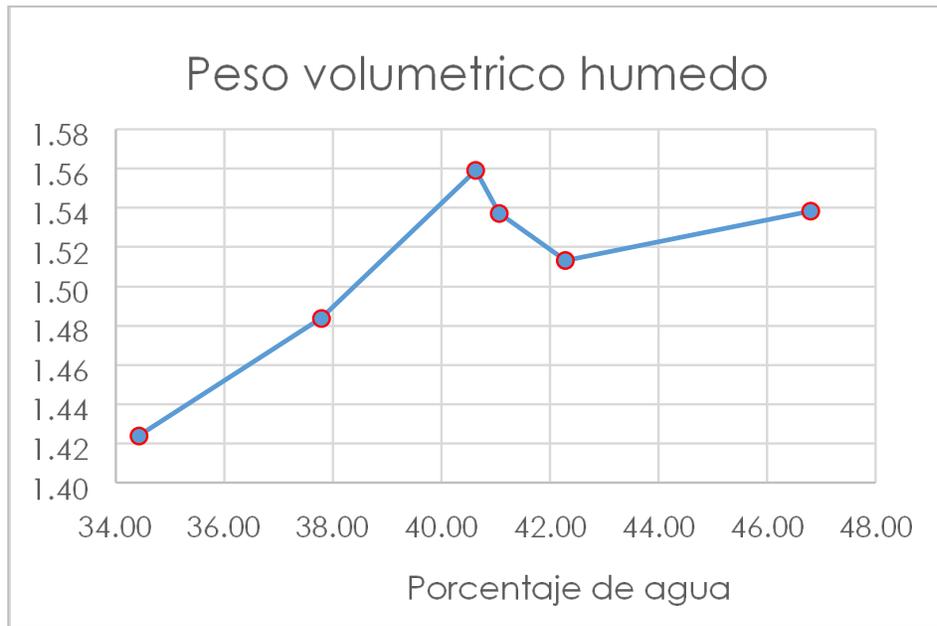


Figura 11: Gráfica del Peso Volumétrico Húmedo.

3.3. Parámetros de Suelo Cohesivo Con y Sin Reforzamiento

3.3.1. Criterio de Mohr – Coulomb.

Se hicieron los cálculos para determinar los círculos de Mohr con los datos obtenidos de las pruebas triaxiales estáticas.

3.3.1.1. Círculos de Mohr para suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET.

Tabla 9:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR sin reforzamiento de fibras de PET.

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.9054	0.50	3.4054	1.9527	1.4527
2	4.1586	1.00	5.1586	3.0793	2.0793
3	4.2488	1.50	5.7488	3.6244	2.1244

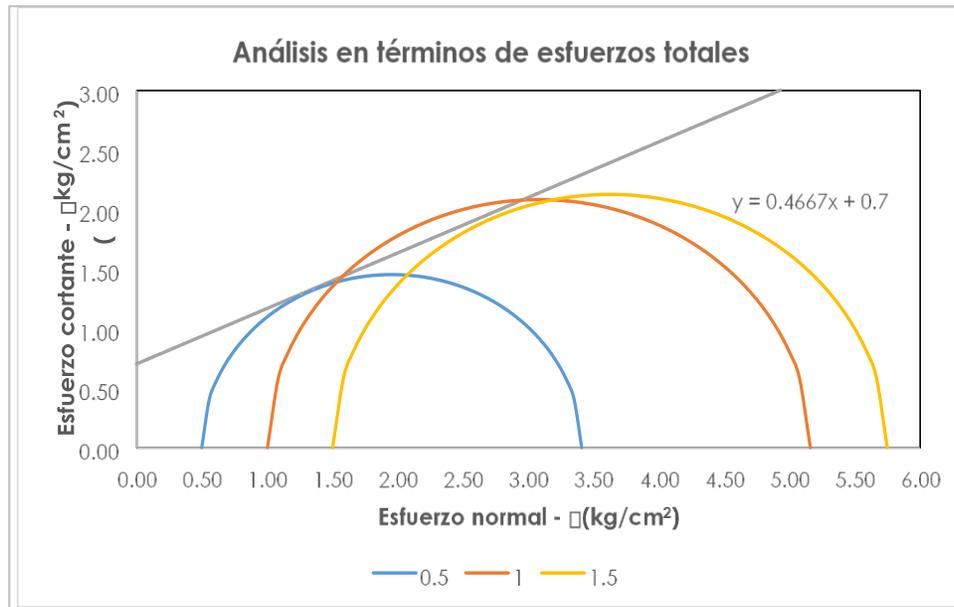


Figura 12: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

Tabla 10:

Parámetros de resistencia para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.7	kg/cm ²
φ	25.02	grados

El tercer círculo muestra una semejanza al segundo. Existía la limitación técnica en cuanto a la carga que podía aplicar el pistón de la cámara triaxial, debido a ésta razón las probetas ensayadas con confinamiento de 1.5 kg/cm² presentan similitudes a las probetas que se ensayaron con 1.0 kg/cm² de confinamiento.

3.3.1.2. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET de 30 mm

Tabla 11:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.4% de fibras DE PET (30mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.9968	0.50	3.4968	1.9984	1.4984
2	6.4084	1.00	7.4084	4.2042	3.2042
3	6.7580	1.50	8.2580	4.8790	3.3790

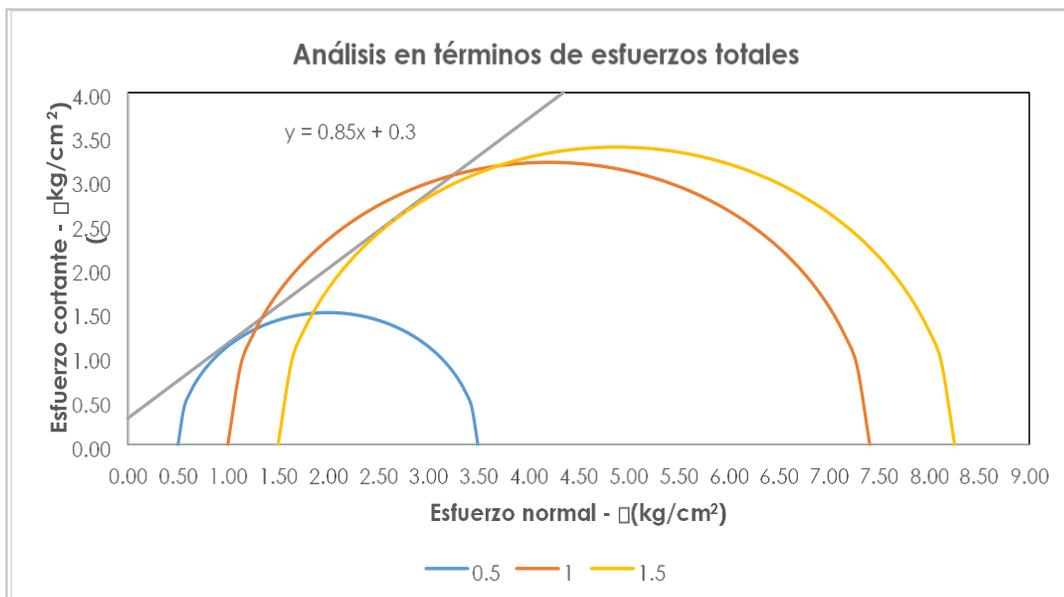


Figura 13: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (30mm).

Tabla 12:

Parámetros de resistencia para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET (30mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.69	kg/cm ²
ϕ	40.36	grados

La cohesión se mantiene debido al uso de fibras de PET de 30mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.3. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET de 60 mm

Tabla 13:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (60mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	3.9968	0.50	4.4968	2.9984	1.5984
2	7.4084	1.00	5.4084	3.2042	3.5042
3	6.7580	1.50	7.2580	4.8790	3.6790

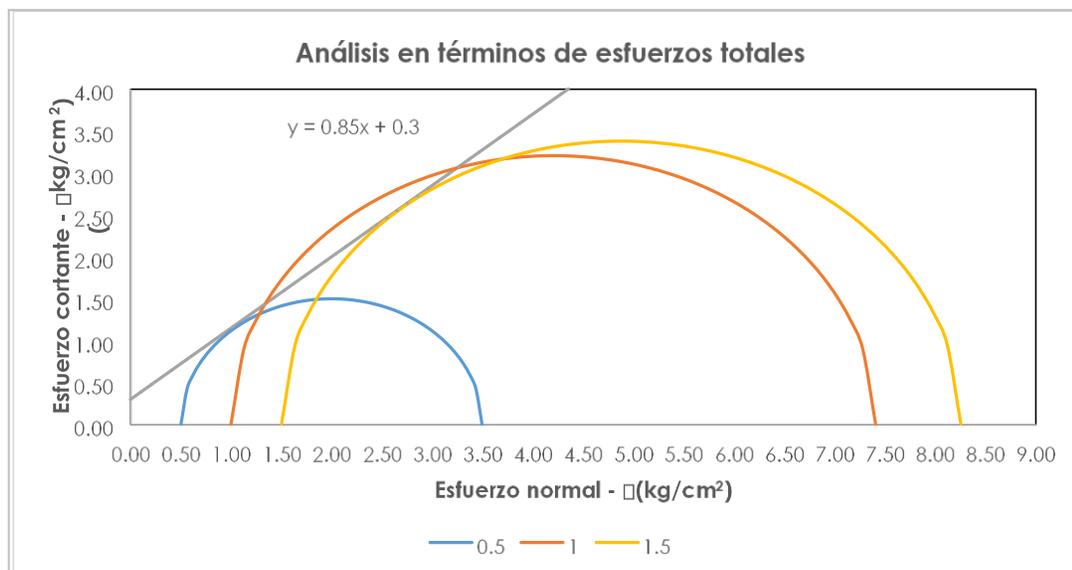


Figura 14 Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.4% de fibras de PET (60mm).

Tabla 14:

Parámetros de resistencia para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.29	kg/cm ²
ϕ	40.46	grados

La cohesión disminuye debido al uso de fibras de PET de 60mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.4. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET de 30 mm

Tabla 15:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	2.3160	0.50	2.8160	1.6580	1.1580
2	5.7547	1.00	6.7547	3.8773	2.8773
3	6.8128	1.50	8.3128	4.9064	3.4064

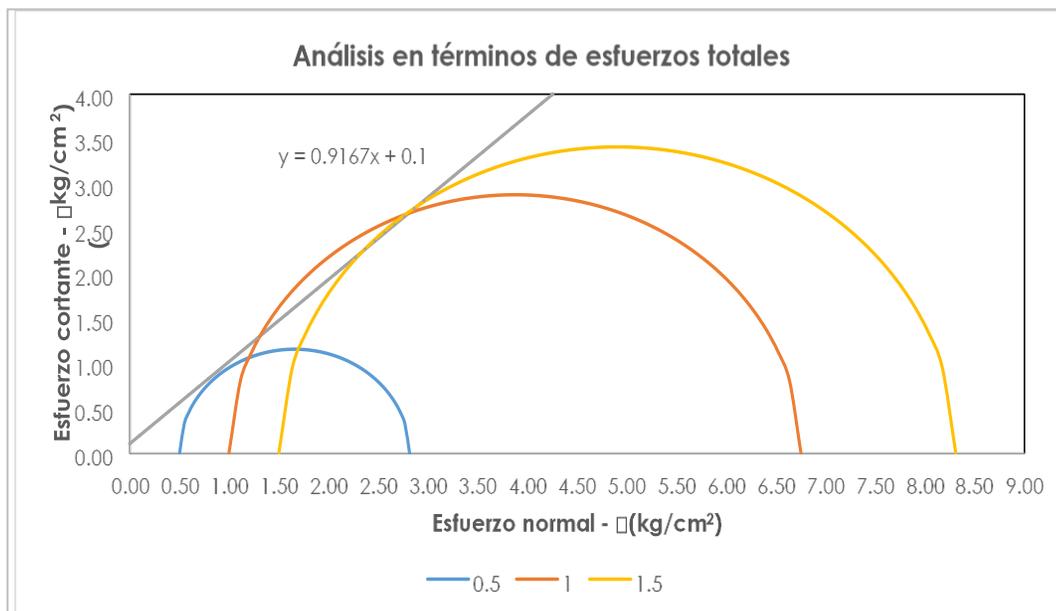


Figura 15: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).

Tabla 16:

Parámetros de resistencia para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.71	kg/cm ²
ϕ	42.51	grados

La cohesión se mantiene en estas pruebas debido a que se usan más fibras de PET de 30 mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.5. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET de 60 mm

Tabla 17:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (60 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	3.3160	0.50	3.8160	2.6580	2.1580
2	6.7547	1.00	5.7547	4.8773	3.8773
3	7.8128	1.50	9.3128	3.9064	1.4064

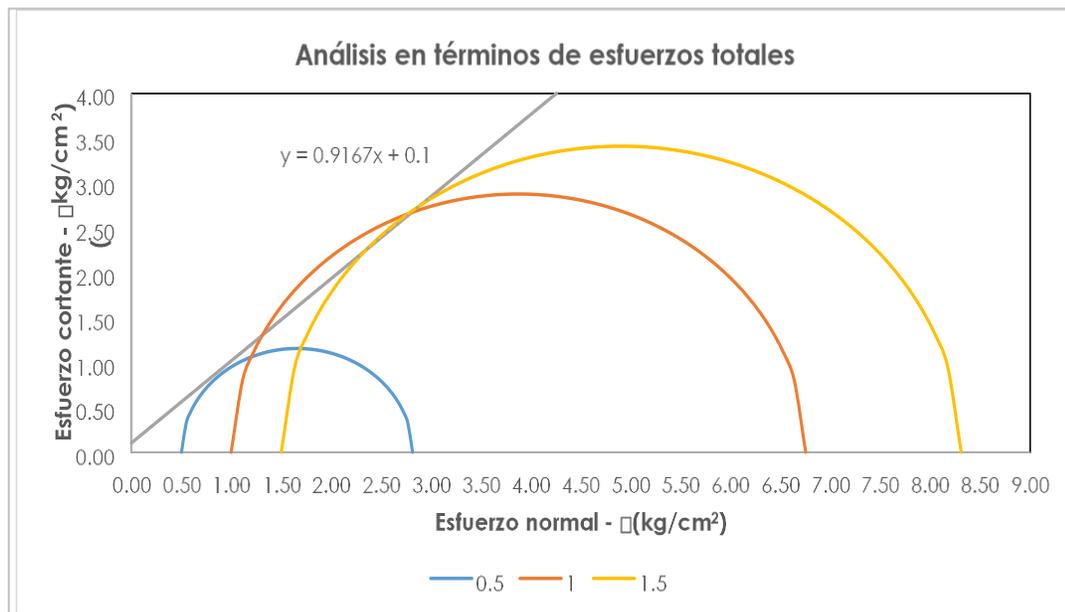


Figura 16: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET (30 mm).

Tabla 18:

Parámetros de resistencia para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.12	kg/cm ²
ϕ	42.80	grados

La cohesión disminuye en estas pruebas debido a que se usan más fibras de PET de 60 mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.6. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET de 30 mm

Tabla 19:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET (30 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	3.3160	0.50	3.8160	2.6580	2.1580
2	6.7547	1.00	5.7547	4.8773	3.8773
3	7.8128	1.50	9.3128	3.9064	1.4064

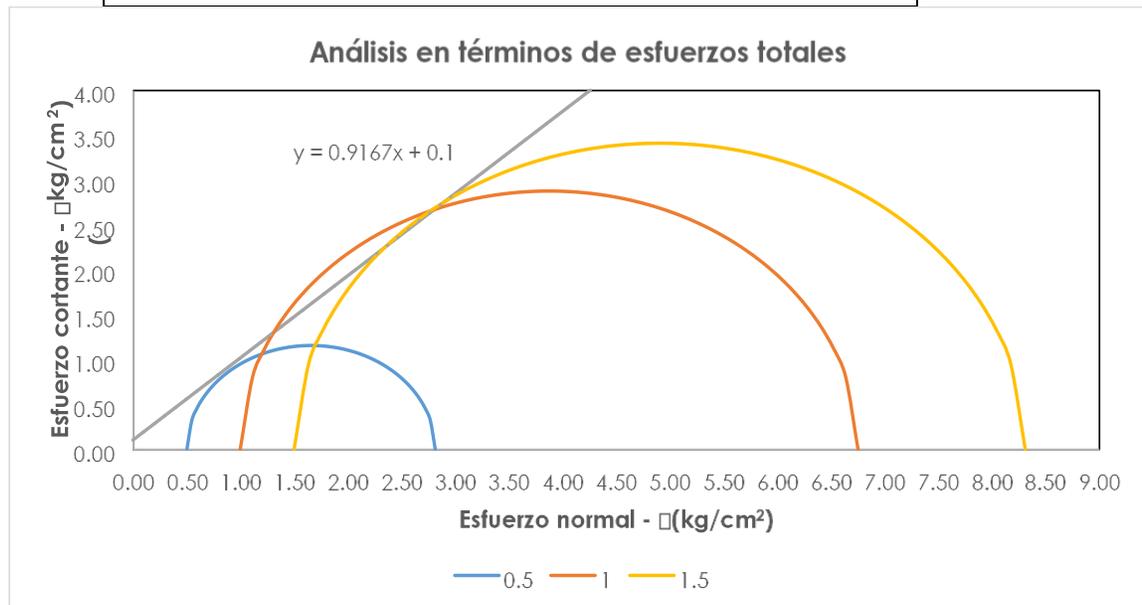


Figura 17: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET (30 mm).

Tabla 20:

Parámetros de resistencia para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.65	kg/cm ²
φ	43.10	grados

La cohesión se mantiene cercana a la del suelo natural, debido a que se usan más fibras de PET de 30 mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.7. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET de 60 mm

Tabla 21:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.2% de fibras DE PET (30 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	4.3160	0.50	3.7160	1.6580	1.1580
2	7.7547	1.00	6.7547	5.8773	5.8773
3	9.8128	1.50	4.3128	7.9064	2.4064

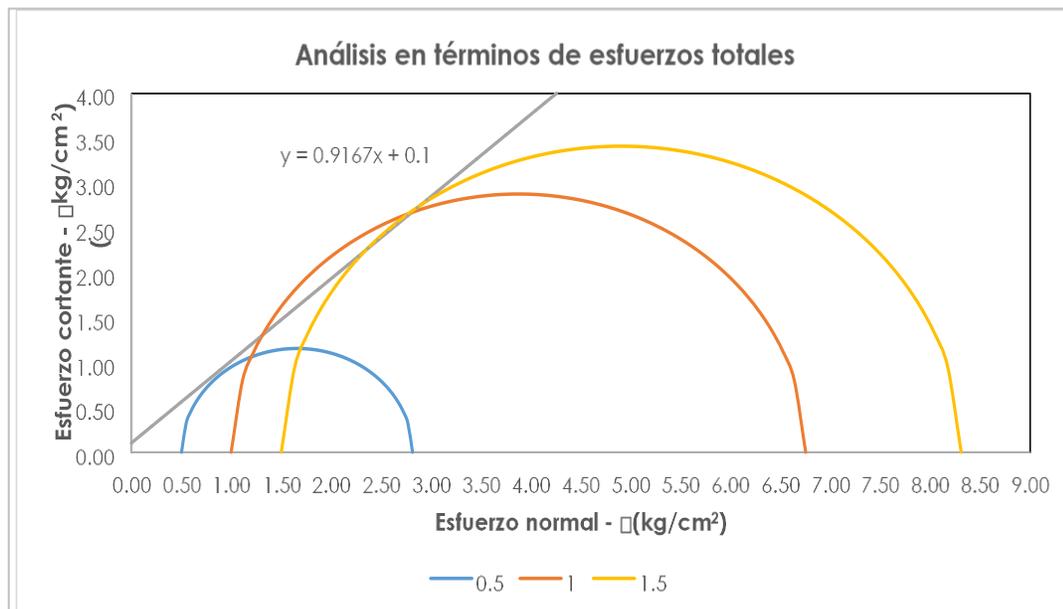


Figura 18: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET (60 mm).

Tabla 22:

Parámetros de resistencia para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.10	kg/cm ²
ϕ	42.95	grados

La cohesión disminuye en estas pruebas debido a que se usan más fibras de PET de 60 mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.8. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET de 30 mm

Tabla 23:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (30 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	5.3160	0.50	4.7160	1.6580	1.1580
2	6.7547	1.00	6.7547	5.8773	5.8773
3	11.8128	1.50	9.3128	7.9064	2.4064

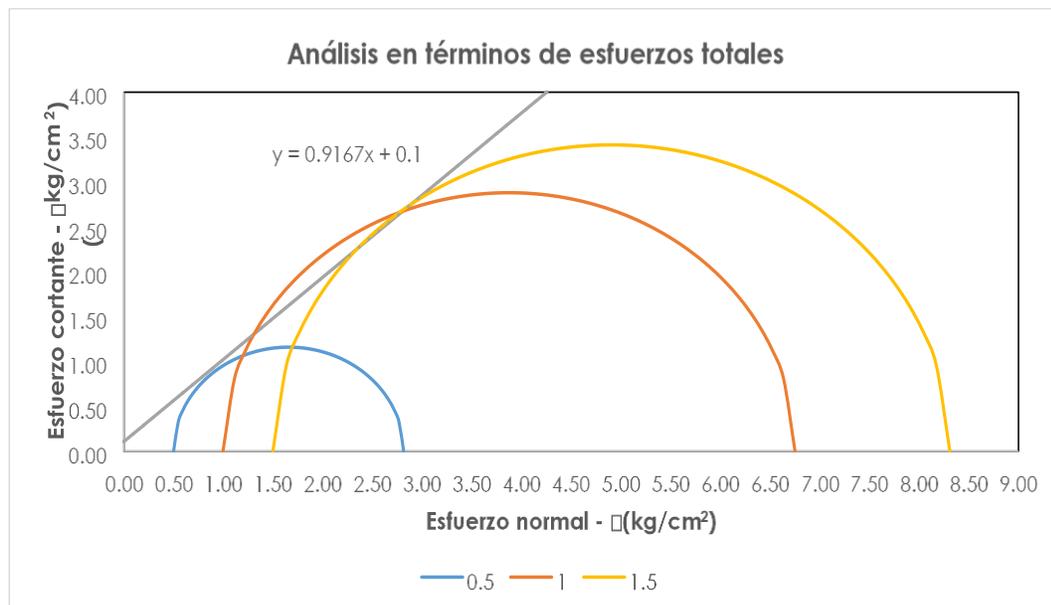


Figura 19: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (30 mm).

Tabla 24:

Parámetros de resistencia para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET (30 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.66	kg/cm ²
ϕ	45.90	grados

La cohesión se mantiene cercana a la del suelo natural, debido a que se usan más fibras de PET de 30 mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.1.9. Círculos de Mohr para suelo natural con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET de 60 mm

Tabla 25:

Resultados para el trazo de los círculos de MOHR con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (60 mm).

ANÁLISIS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES					
Prueba	$q_{m\acute{a}x}$	σ_3	σ_1	Centro	Radio
No.	kg/cm ²				
1	5.3160	0.50	4.7160	1.6580	1.1580
2	6.7547	1.00	6.7547	5.8773	5.8773
3	11.8128	1.50	9.3128	7.9064	2.4064

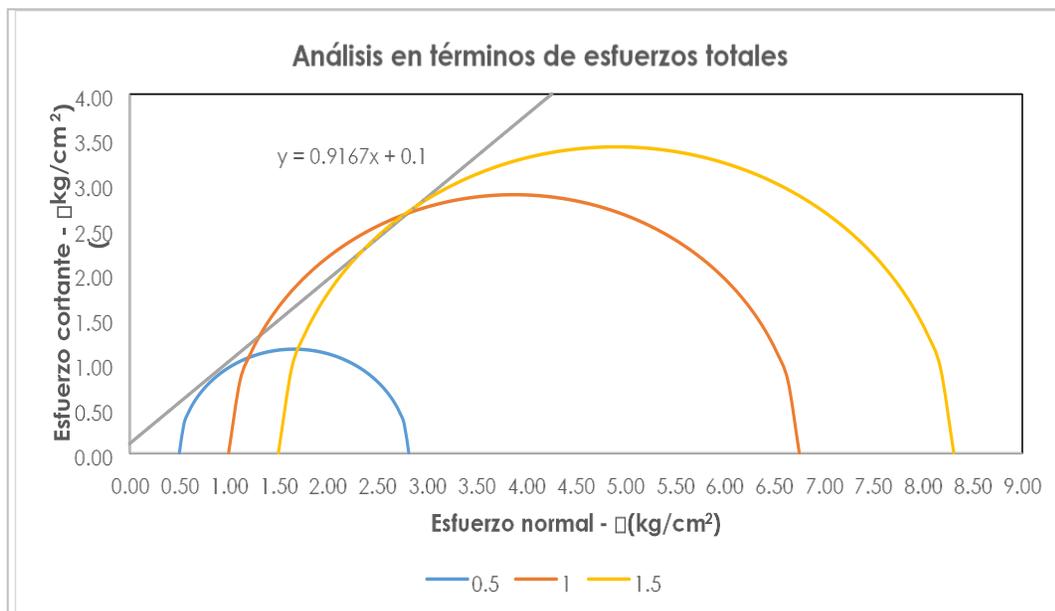


Figura 20: Resultados de los círculos de Mohr de las probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET (60 mm).

Tabla 26:

Parámetros de resistencia para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET (60 mm).

PARÁMETROS DE RESISTENCIA		
c	0.09	kg/cm ²
ϕ	43.00	grados

La cohesión disminuye en estas pruebas debido a que se usan más fibras de PET de 60mm, a su vez incrementa el ángulo de fricción interno del suelo.

3.3.2. Comportamiento esfuerzo – deformación.

Se presenta a continuación las gráficas obtenidas de las probetas de suelo natural sin PET con confinamiento de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm², y 1.5 kg/cm² respectivamente. En todas las gráficas las dos líneas representan la curva de esfuerzo deformación de las probetas ensayadas.

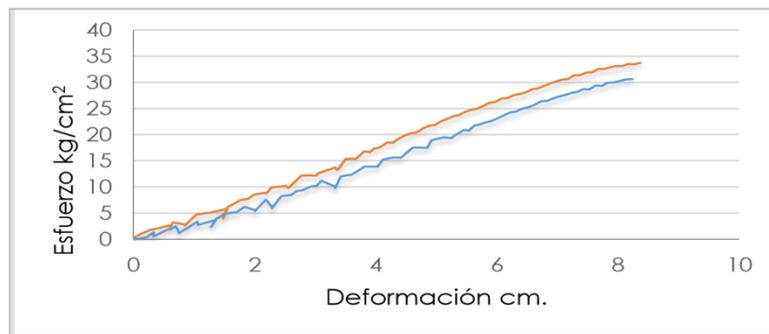


Figura 21: Probeta de suelo natural con confinamiento de 0.5 kg/cm².

En la figura se puede ver que con el confinamiento dado se obtiene una resistencia menor a 40 kg/cm², posteriormente con las adiciones de fibra de PET se verá un incremento en la resistencia del suelo.

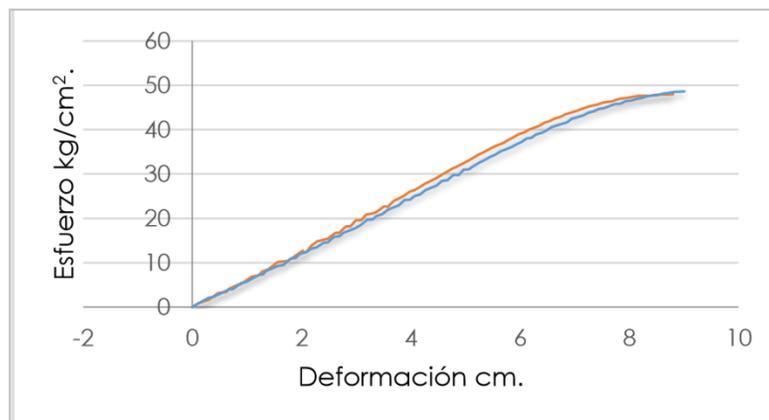


Figura 22: Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.0 kg/cm².

Como era de esperarse la resistencia se incrementó con el confinamiento.

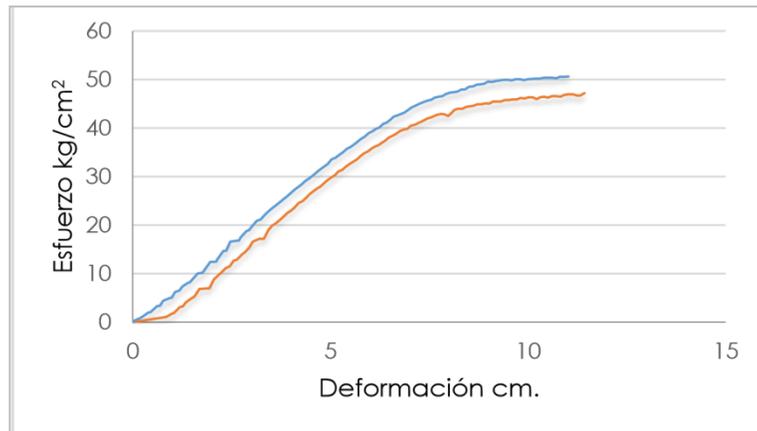


Figura 23: Probeta de suelo natural con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa en la figura que el módulo de elasticidad sufre un incremento importante debido al aumento del confinamiento, siendo este un efecto en muchos casos benéfico.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de las probetas de suelo reforzadas con 0.4% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

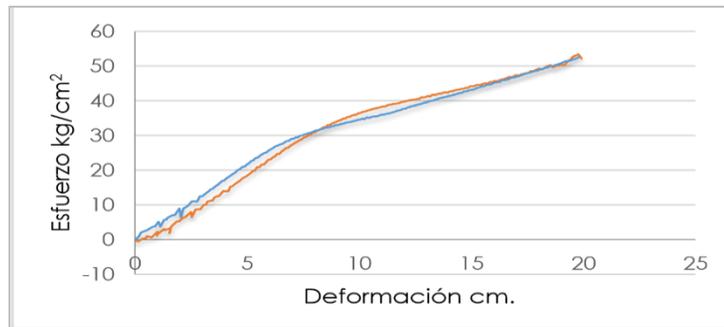


Figura 24: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

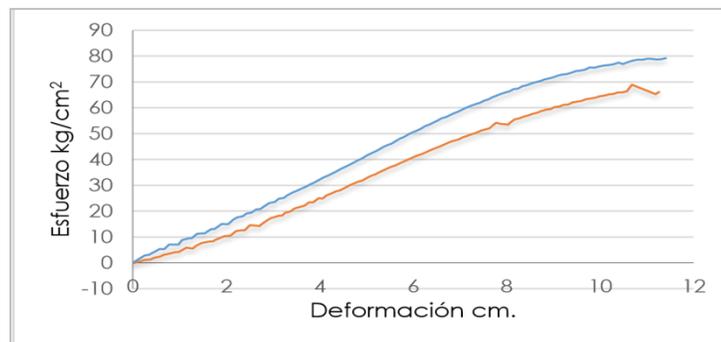


Figura 25: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

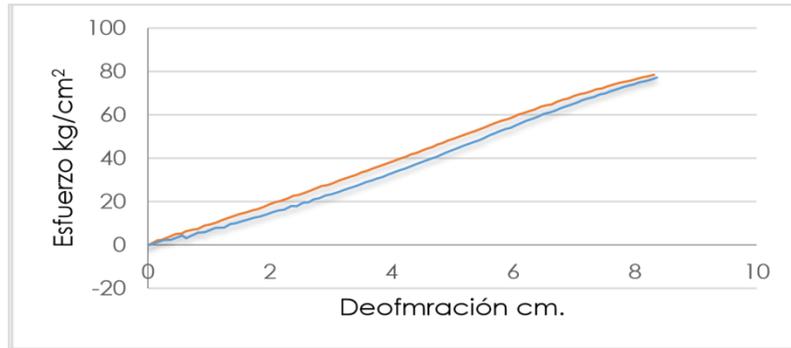


Figura 26: Probeta de suelo natural reforzada con 0.4% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa que para el caso de 0.4% de fibra de PET agregada, la resistencia del suelo se incrementa de forma notoria respecto del caso sin adiciones de la misma fibra y se incrementa la capacidad de deformación sin que se presente plastificación del material.

Resultados obtenidos de los ensayos del suelo reforzado con 0.8% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

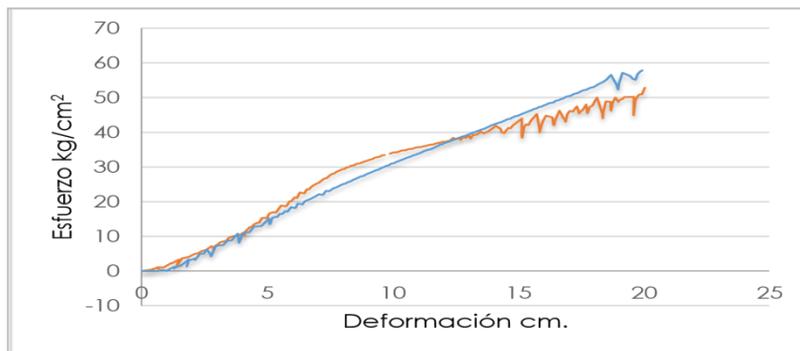


Figura 27: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

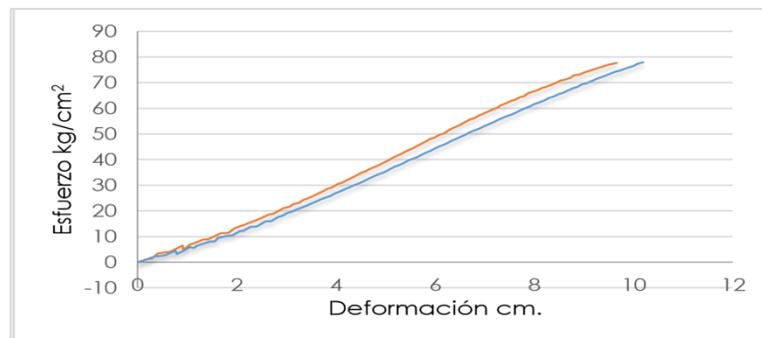


Figura 28: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

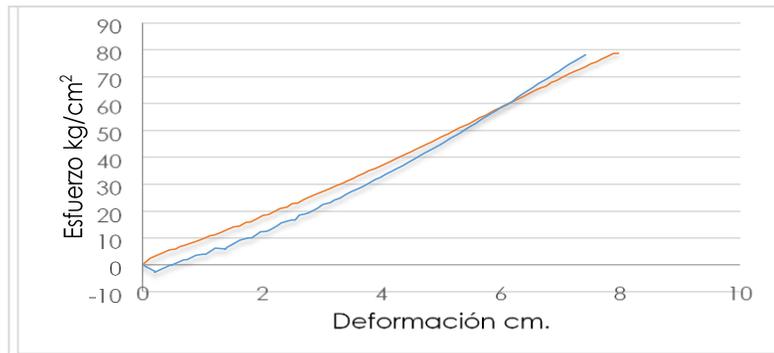


Figura 29: Probeta de suelo natural reforzada con 0.8% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Se observa respecto de los casos anteriores una tendencia a incrementar el módulo de elasticidad a medida que se incrementa el porcentaje agregado de fibra de PET.

Resultados obtenidos de los ensayos del suelo reforzado con 1.2% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente.

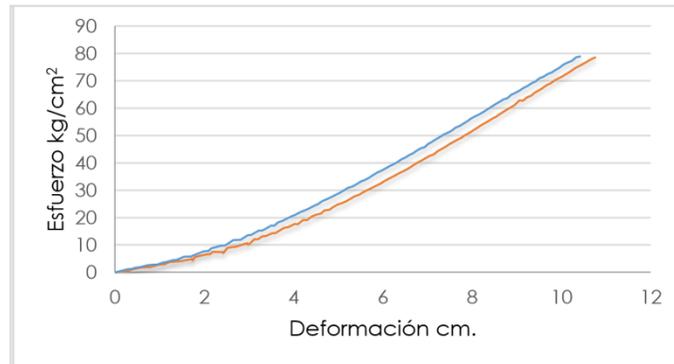


Figura 30: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm²

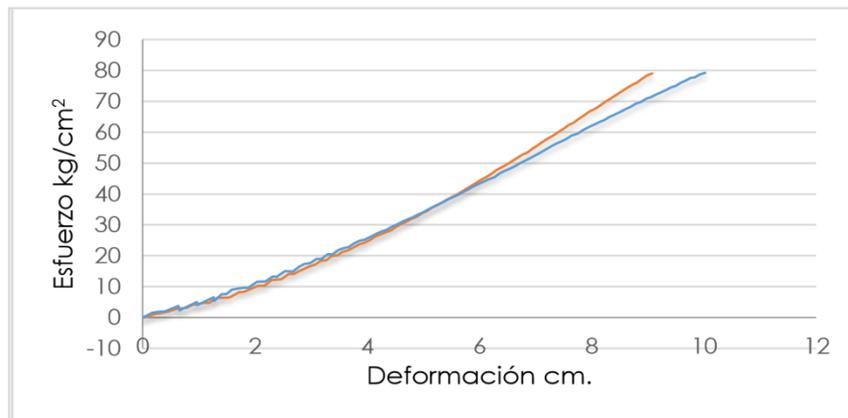


Figura 31: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

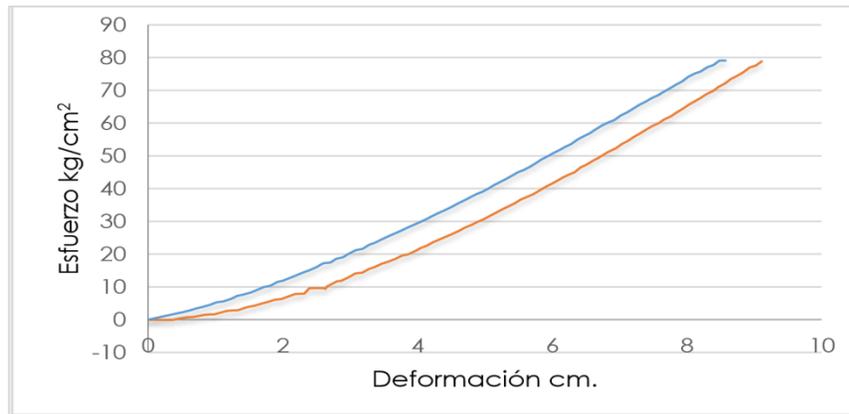


Figura 32: Probeta de suelo natural reforzada con 1.2% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm²

Resultados obtenidos de los ensayos del suelo reforzado con 1.5% de PET y confinamientos de 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm² respectivamente

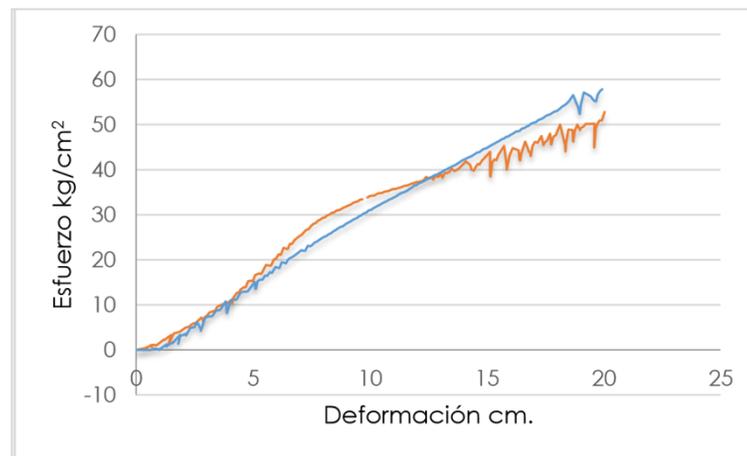


Figura 33: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 0.5 kg/cm².

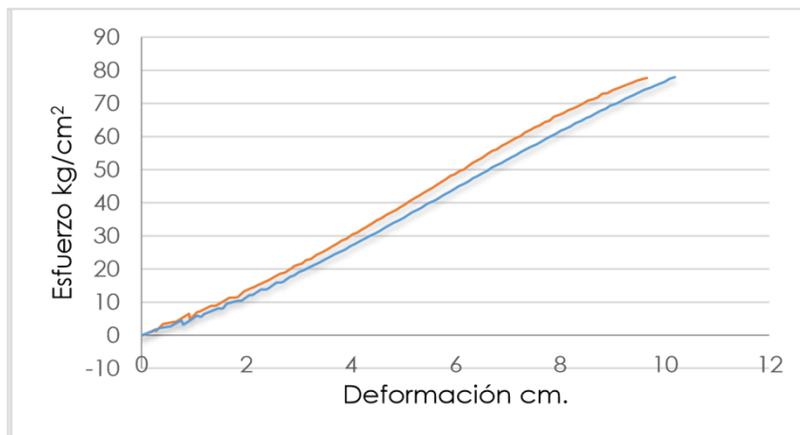


Figura 34: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 1.0 kg/cm².

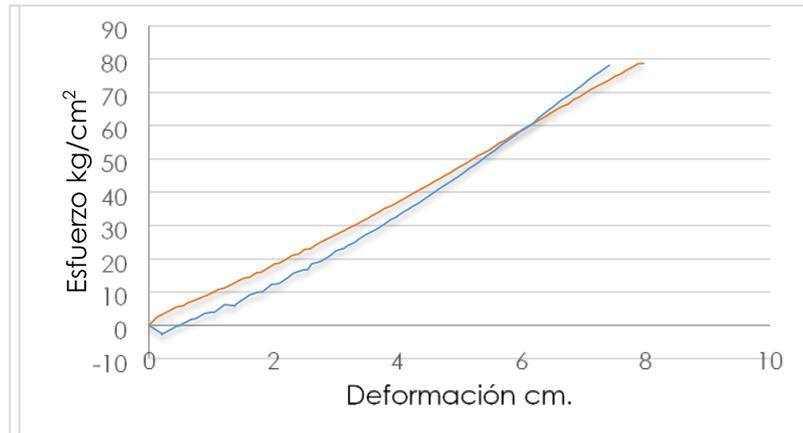


Figura 35: Probeta de suelo natural reforzada con 1.5% de PET con confinamiento de 1.5 kg/cm².

Finalmente, el incremento al 1.5% de la fibra de PET no muestra un incremento significativo del módulo de elasticidad ni de la resistencia respecto del 0.6% de fibra, por lo cual se podría estar en una condición en la cual el incremento de fibra comience a no ser tan benéfico.

3.3.3. Módulos de elasticidad.

Como se menciona al principio de la tesis, hubo una limitante técnica por parte del equipo donde se realizaron las pruebas. Este registraba una carga máxima de 80 kg/cm². Por tanto, se tomó el módulo de elasticidad al 10% de la deformación de las probetas. La ecuación para calcular el módulo de elasticidad fue la siguiente:

$$E: \frac{F * L1}{A * L2}$$

Ecuación 1 Módulo de Elasticidad.

Donde:

F: Fuerza aplicada a la probeta.

A: Área de la sección de la probeta.

L1: Longitud original de la probeta.

L2: Deformación en la probeta.

A continuación, se muestran los módulos de elasticidad de las probetas ensayadas. Estos se calcularon a partir de los datos registrados del software que se utilizó en los ensayos.

Tabla 27:

Módulo de elasticidad para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS SIN REFORZAMIENTO DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD E KG/CM2
0.5	2.01	10.46	0.082	8.50	19.82
1	4.51	10.46	0.090	8.50	40.68
1.5	6.55	10.46	0.110	8.50	48.31

Tabla 28:

Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.6% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 0.6% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	5.24	10.46	0.199	8.50	21.38
1	5.85	10.46	0.113	8.50	42.21
1.5	7.53	10.46	0.084	8.50	73.19

Tabla 29:

Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 0.8% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 0.8% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	5.46	10.46	0.200	8.50	22.14
1	5.71	10.46	0.097	8.50	48.03
1.5	7.89	10.46	0.0796	8.50	80.55

Tabla 30:

Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.2% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 1.2% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	21.13	10.46	0.620	8.50	27.69
1	31.15	10.46	0.447	8.50	56.63
1.5	41.16	10.46	0.3500	8.50	95.56

Tabla 31:

Módulo de elasticidad para probetas con reforzamiento de 1.5% de fibras de PET.

10% DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN PROBETAS					
PROBETAS CON 1.5% DE REFORZAMIENTO DE FIBRAS DE PET					
CONFINAMIENTO KG/CM2	FUERZA APLICADA KG	ÁREA CM2	L2 CM	L1 CM	MÓDULO DE ELASTICIDAD KG/CM2
0.5	24.12	10.46	0.650	8.50	37.79
1	41.10	10.46	0.546	8.50	59.63
1.5	51.08	10.46	0.4500	8.50	98.56

3.3.4. Resistencia.

Porcentajes de deformación:

Los porcentajes de deformación que se muestran son con respecto al tamaño original de la probeta (85mm) después de haber sido sometidas al ensaye triaxial.

Tabla 32:

Porcentajes de deformación usando 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% de PET.

DEFORMACIÓN DE SUELO NATURAL			DEFORMACIÓN CON 0.4% DE FIBRAS DE PET (30mm)		
Confinamiento	Deformación	Promedio	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	9.85%	9.77%	0.5 kg/cm ²	23.57%	23.51%
0.5 kg/cm ²	9.69%		0.5 kg/cm ²	23.45%	
1.0 kg/cm ²	10.59%	10.47%	1.0 kg/cm ²	8.80%	8.57%
1.0 kg/cm ²	10.35%		1.0 kg/cm ²	8.34%	
1.5 kg/cm ²	13.44%	13.21%	1.5 kg/cm ²	10.68%	11.08%
1.5 kg/cm ²	12.97%		1.5 kg/cm ²	11.48%	
DEFORMACIÓN CON 0.8% DE FIBRAS DE PET(30mm)			DEFORMACIÓN CON 1.2% DE FIBRAS DE PET(30mm)		
Confinamiento	Deformación	Promedio	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	23.43%	23.36%	0.5 kg/cm ²	12.65%	30.00 %
0.5 kg/cm ²	23.29%		0.5 kg/cm ²	12.25%	
1.0 kg/cm ²	11.36%	11.68%	1.0 kg/cm ²	10.68%	15.23%
1.0 kg/cm ²	11.99%		1.0 kg/cm ²	11.78%	
1.5 kg/cm ²	9.36%	9.04%	1.5 kg/cm ²	10.72%	12.50%
1.5 kg/cm ²	8.71%		1.5 kg/cm ²	10.08%	
DEFORMACIÓN CON 1.5% DE FIBRAS DE PET(30mm)					
Confinamiento	Deformación	Promedio			
0.5 kg/cm ²	12.65%	40.00%			
0.5 kg/cm ²	12.25%				
1.0 kg/cm ²	10.68%	16.25%			
1.0 kg/cm ²	11.78%				
1.5 kg/cm ²	10.72%	13.10%			
1.5 kg/cm ²	9.20%				

DEFORMACIÓN CON 0.4% DE FIBRAS DE PET (60 mm)			DEFORMACIÓN CON 0.8% DE FIBRAS DE PET(60mm)		
Confinamiento	Deformación	Confinamiento	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	23.57%	20.40%	0.5 kg/cm ²	23.43%	21.36%
0.5 kg/cm ²	23.45%		0.5 kg/cm ²	23.29%	
1.0 kg/cm ²	8.80%	7.57%	1.0 kg/cm ²	11.36%	10.68%
1.0 kg/cm ²	8.34%		1.0 kg/cm ²	11.99%	
1.5 kg/cm ²	10.68%	10.08%	1.5 kg/cm ²	9.36%	11.04%
1.5 kg/cm ²	11.48%		1.5 kg/cm ²	8.71%	

DEFORMACIÓN CON 1.2% DE FIBRAS DE PET(60mm)			DEFORMACIÓN CON 1.5% DE FIBRAS DE PET(60mm)		
Confinamiento	Deformación	Promedio	Confinamiento	Deformación	Promedio
0.5 kg/cm ²	12.65%	23.00%	0.5 kg/cm ²	12.65%	25.45%
0.5 kg/cm ²	12.25%		0.5 kg/cm ²	12.25%	
1.0 kg/cm ²	10.68%	12.23%	1.0 kg/cm ²	10.68%	15.23%
1.0 kg/cm ²	11.78%		1.0 kg/cm ²	11.78%	
1.5 kg/cm ²	10.72%	11.40%	1.5 kg/cm ²	10.72%	12.20%
1.5 kg/cm ²	10.08%		1.5 kg/cm ²		

3.4. Capacidad de Soporte Relativo (CBR) del Suelo Con y Sin Reforzamiento

Se obtuvieron los parámetros de CBR así los cuales se pueden observar en la Tabla 19, donde C es la carga corregida y CBR el valor de soporte a 2.54 de penetración, respectivamente.

Tabla 33:

Valor soporte de california de las muestras.

% de adición de fibras PET	C 2.54 (kg)	CBR _{2.54} (%)
0%	320.23	10.5
0.4%(30mm)	319.26	25.6
0.4%(60mm)	313.26	23.0
0.8%(30mm)	350.40	42.5
0.8%(60mm)	349.50	38.7
1.2(30mm)	391.10	65.9
1.2%(60mm)	380.40	64.6
1.5(30mm)	420.20	95.01
1.5%(60mm)	410.15	80.05

De la tabla se obtiene que el valor del CBR para los suelos reforzados muestran una mejora considerable, llegando a un aumento de casi el 80% de su resistencia inicial. En la figura 15 se puede observar que las fibras si presentan una mejora ante pruebas de penetración como el CBR.

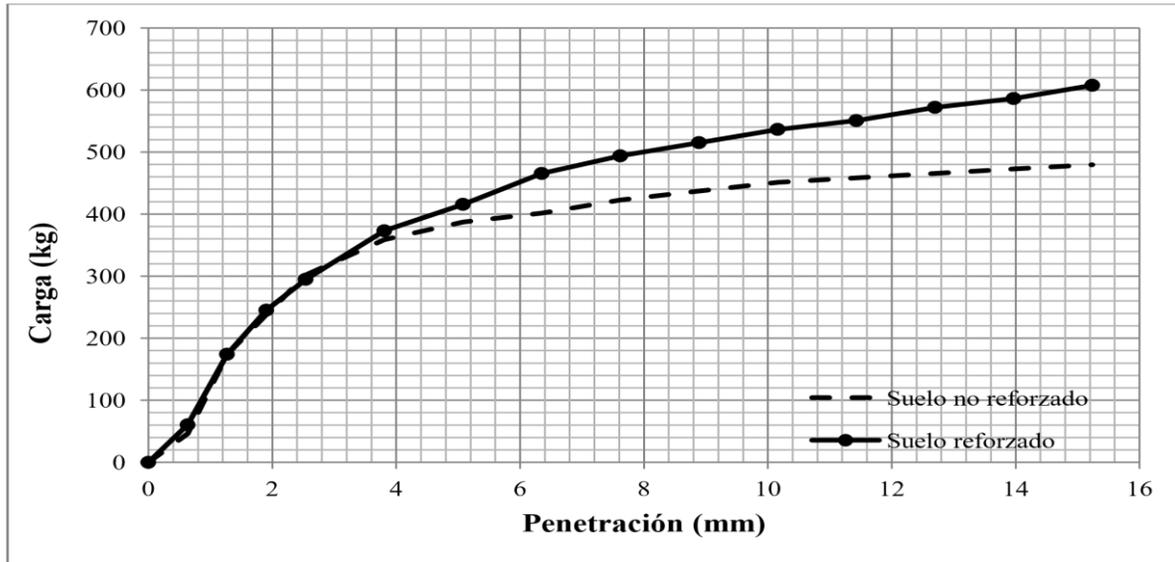


Figura 36: Curvas carga-penetración obtenidas por CBR.

En la figura 15 se aprecia cómo es que al inicio de la prueba el suelo y el suelo reforzado se comportan de manera similar, sin embargo, conforme continua la penetración el suelo reforzado comienza a tomar más carga, lo que indica que se requieren de esfuerzos mayores para que las fibras comiencen a trabajar e interactuar con el suelo circundante.

3.5. Evaluación Con Software Del Desempeño De Terraplenes Con Dimensiones Estándar.

Con el fin de demostrar que el uso del PET dar mejoramiento de suelo cohesivo, se propone un ejemplo de un terraplén para carretera sobre un suelo deformable. Se harán comparaciones de mejoramiento de estabilidad de talud con los diferentes porcentajes de fibra de PET planteados anteriormente (0.4%,0.8%, 1.2% y 1.5%) y el suelo natural sin reforzamiento de fibras de PET. La densidad del suelo se toma a partir del peso específico de las probetas reconstituidas para los ensayos de las pruebas triaxiales.

Terraplén propuesto:

- Altura : 3 metros.
- Pendiente : 1:5
- Corona : 3 metros
- Largo : 10 kilómetros
- Área de sección : 15 m²

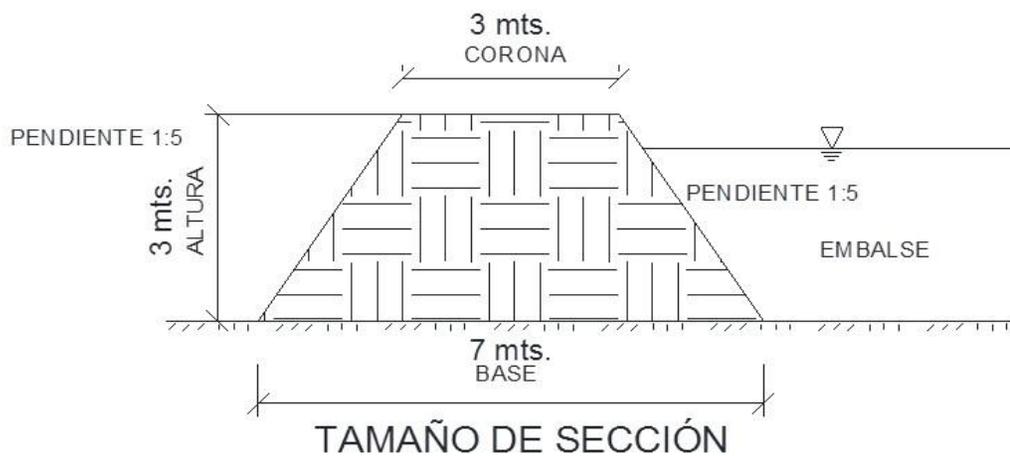


Figura 37: Sección Tipo.

Los taludes se analizarán con el software SLIDE 6.0 usando los datos óptimos obtenidos en los ensayos de laboratorio para cada porcentaje analizado. La densidad del suelo varía de acuerdo al porcentaje de fibras de PET utilizada en cada sección, se toma como referencia el peso húmedo de la probeta dividida entre el volumen de la misma de acuerdo al porcentaje de fibras de PET usado.

Las ecuaciones que se usarán para calcular la cantidad de fibras de PET en éste ejemplo son:

Volumen total de suelo: Área de sección x Largo (Ecuación 7)

Peso total del suelo: Volumen total de suelo x Peso del suelo (Ecuación 8)

Kilogramos de PET necesario = Volumen total del suelo x Peso total del suelo (Ecuación 9)

La simbología y ecuaciones para analizar el talud con el Software SLIDE 6.0 son las siguientes:

Simbología.

Dovela: Número de secciones en las que se divide el talud para su análisis.

B : La base ó ancho del suelo con respecto al eje x de cada dovela.

Z1 : Altura del suelo.

Zw : Altura del agua (sólo cuando se tiene)

a : Angulo obtenido desde la línea que tiene origen en cero e intercepta la línea entrecortada del talud.

c : Cohesión del suelo.

Φ : Angulo de fricción interna del suelo.

Ecuaciones.

$$W1: b \cdot Z1 \cdot \delta$$

$$u: 9.8 \cdot Zw$$

$$\text{Cos } \alpha$$

$$\text{Sen } \alpha$$

$$(c \cdot b) / \text{cos } \alpha$$

$$\text{Tan } \Phi \cdot (W1 \cdot \text{Cos} \alpha \cdot u) / \text{cos} \alpha$$

$$W1 \cdot \text{Sen} \alpha$$

$$\text{Factor de seguridad: } (((c \cdot b) / \text{cos} \alpha) + (\text{Tan } \Phi \cdot (W1 \cdot \text{Cos} \alpha \cdot u) / \text{cos} \alpha)) / (W1 \cdot \text{Sen} \alpha)$$

♦ EJEMPLO 01: Suelo natural sin reforzamiento de fibras PET.

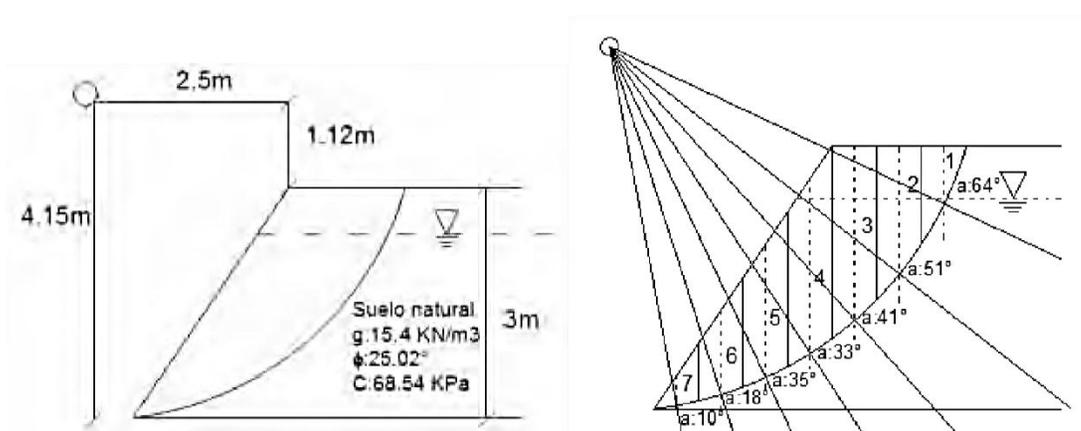


Figura 38: Centro de radio y dovelas del talud para el caso sin fibras de PET. (SLIDE 6.0).

Tabla 34:

Resultado de ecuaciones para probetas sin reforzamiento de fibras de PET.

DOV.	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	cb/cos α	Tan	
										$\phi(W1.Cos \alpha.ub/cos \alpha)$	V1.Sen α
1	0.5	1.66	0.06	5.08	64	0.64	0.438	0.899	78.28982	1.48065	4.56767
2	0.5	.46	0.86	11.24	51	8.48	0.629	0.777	54.53502	43.68190	8.73667
3	0.5	.99	1.39	15.32	41	13.64	0.755	0.656	45.47445	95.76399	10.05279
4	0.5	.99	1.77	15.32	33	17.36	0.839	0.545	40.92191	121.94408	8.34550
5	0.5	.52	1.52	11.70	35	14.91	0.819	0.574	41.89698	79.98739	6.71314
6	0.5	1.96	0.96	7.39	18	9.42	0.951	0.309	36.08618	31.90633	2.28425
7	0.5	1.34	0.34	2.618	10	3.3354	0.985	0.174	34.84944	4.00214	0.45461
Σ									332.05381	374.76435	40.70003

✓ FS = 17.36

✓ VOLUMEN TOTAL DE SUELO: 15 m² x 10 000 m = 150 000 m³

◆ EJEMPLO 02: Suelo natural con 0.4% reforzamiento de fibras PET.

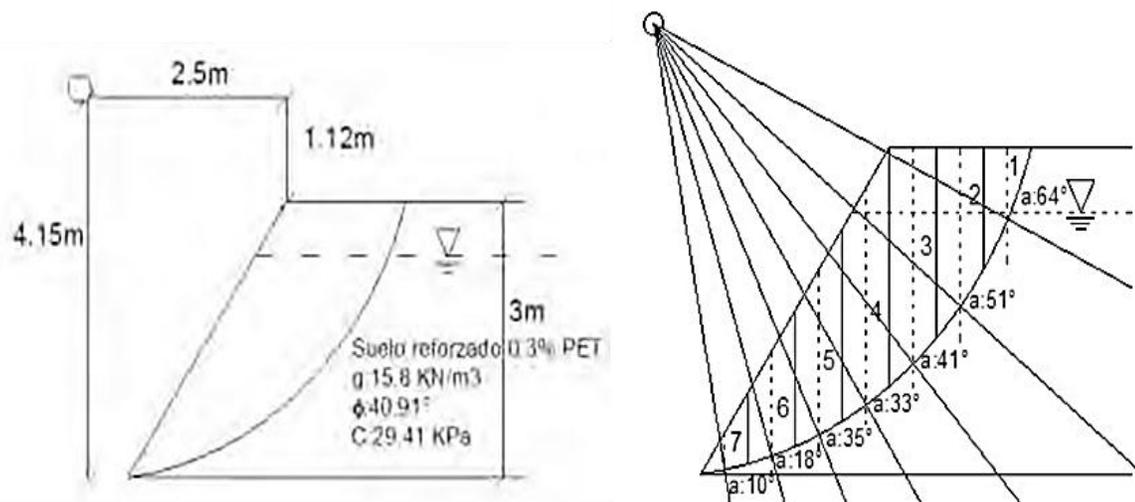


Figura 39: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 0.4% de fibras de PET. (SLIDE 6.0).

Tabla 35:

Resultado de ecuaciones para probetas con 0.4% de reforzamiento de fibras de PET.

DOV.	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	cb/cos α	Tan $\phi(W1.Cos \alpha.ub/cos \alpha)$	W1.Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.21	64	0.64	0.438	0.899	33.54463	1.51911	4.68631
2	0.5	1.46	0.86	11.53	51	8.48	0.629	0.777	23.36648	44.81649	8.96360
3	0.5	1.99	1.39	15.72	41	13.64	0.755	0.656	19.48432	98.25137	10.31390
4	0.5	1.99	1.77	15.72	33	17.36	0.839	0.545	17.53370	125.11146	8.56227
5	0.5	1.99	1.77	15.72	33	17.36	0.839	0.545	17.95149	82.06499	6.88751
6	0.5	1.52	1.52	12.01	35	14.91	0.819	0.574	15.46175	32.73506	2.34358
7	0.5	0.96	0.96	7.58	18	9.42	0.951	0.309	14.93185	4.10609	0.46642
Σ									142.27422	384.49848	41.75718

- ✓ **FS = 16.38**
- ✓ **VOLUMEN TOTAL DE SUELO:** 15 m² x 10 000 m = 150 000 m³
- ✓ **PESO TOTAL DEL SUELO:** 150,000 m³ x 850 kg/m³ = 127, 500,000 kilogramos = 127,500 toneladas.
- ✓ **KILOGRAMOS DE PET NECESARIO:** 127, 500,000 kilogramos x 0.4% = 382,500 = 382.5 toneladas.
- ◆ **EJEMPLO 03: Suelo natural con 0.8% reforzamiento de fibras PET.**

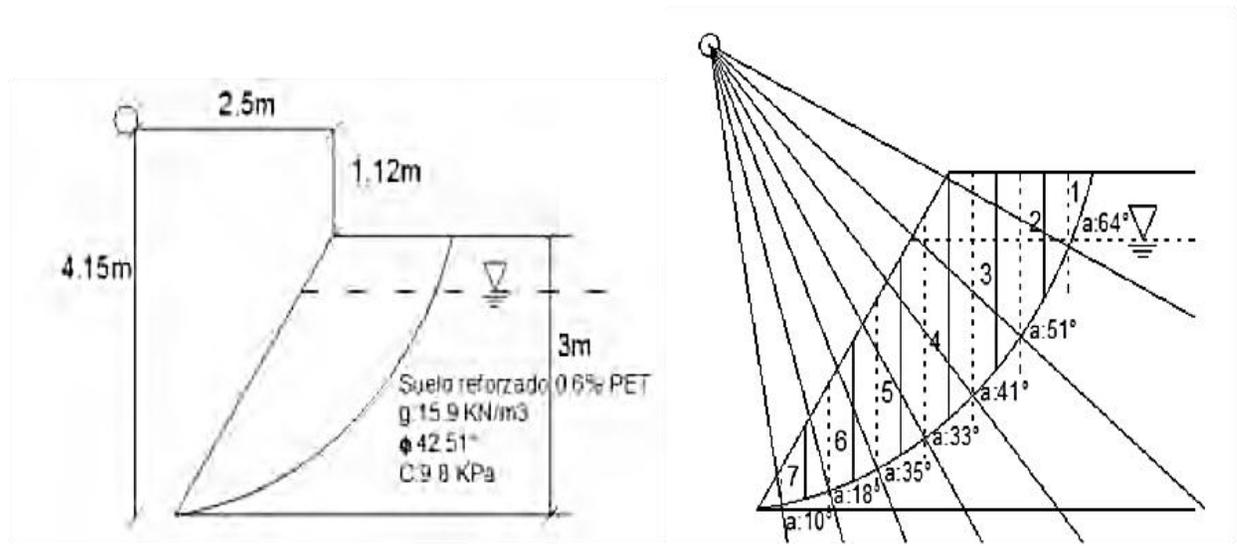


Figura 40: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 0.8% de fibras de PET. (SLIDE 6.0).

Tabla 36:

Resultado de ecuaciones para probetas con 0.8% de reforzamiento de fibras de PET.

DOV.	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	cb/cos α	Tan	
										φ(W1.Cos α.ub/cos α)	W1.Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.25	64	0.64	0.438	0.899	11.17774	1.52873	4.71597
2	0.5	1.46	0.86	11.61	51	8.48	0.629	0.777	7.78618	45.10014	9.02033
3	0.5	1.99	1.39	15.82	41	13.64	0.755	0.656	6.49256	98.87321	10.37918
4	0.5	1.99	1.77	15.82	33	17.36	0.839	0.545	5.84258	125.90330	8.61646
5	0.5	1.52	1.52	12.08	35	14.91	0.819	0.574	5.98180	82.58439	6.93110
6	0.5	0.96	0.96	7.63	18	9.42	0.951	0.309	5.15216	32.94225	2.35842
7	0.5	0.34	0.34	2.703	10	3.3354	0.985	0.174	4.97559	4.13208	0.46937
Σ									47.40861	386.93202	42.02146

✓ **FS** = 13.34

✓ **VOLUMEN TOTAL DE SUELO:** 15 m² x 10 000 m = 150 000 m³

✓ **PESO TOTAL DEL SUELO:** 150,000 m³ x 850 kg/m³ = 127, 500,000 kilogramos
= 127,500 toneladas.

✓ **KILOGRAMOS DE PET NECESARIO:** 127, 500,000 kilogramos x 0.8% =
765,000 kilogramos = 765 toneladas.

◆ **EJEMPLO 04: Suelo natural con 1.2% reforzamiento de fibras PET.**

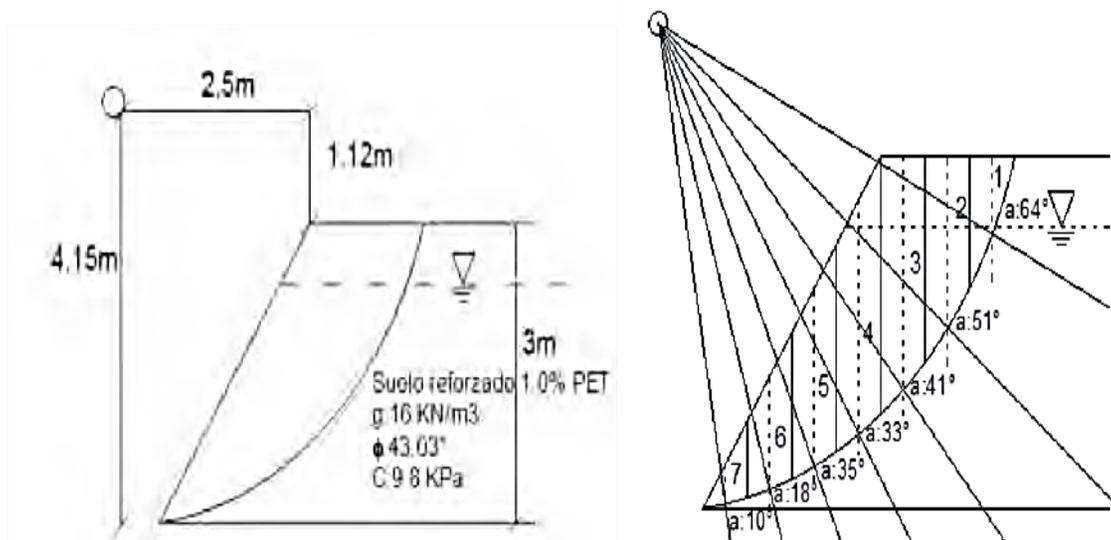


Figura 41: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 1.2% de fibras de PET. (SLIDE 6.0)

Tabla 37:

Resultado de ecuaciones para probetas con 1.2% de reforzamiento de fibras de PET.

DOV.	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	cb/cos α	Tan $\phi(W1.Cos$ $\alpha.ub/cos$ $\alpha)$	W1.Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.28	64	0.64	0.438	0.899	11.17774	1.53834	4.74563
2	0.5	1.46	0.86	11.68	51	8.48	0.629	0.777	7.78618	45.38379	9.07706
3	0.5	1.99	1.39	15.92	41	13.64	0.755	0.656	6.49256	99.49506	10.44446
4	0.5	1.99	1.77	15.92	33	17.36	0.839	0.545	5.84258	126.69515	8.67065
5	0.5	1.52	1.52	2.16	35	14.91	0.819	0.574	5.98180	83.10379	6.97469
6	0.5	0.96	0.96	7.68	18	9.42	0.951	0.309	5.15216	33.14943	2.37325
7	0.5	0.34	0.34	2.72	10	3.3354	0.985	0.174	4.97559	4.15807	0.47232
Σ									47.40861	389.36555	42.28575

✓ **FS = 10.33**

✓ **VOLUMEN TOTAL DE SUELO:** 15 m² x 10 000 m = 150 000 m³

✓ **PESO TOTAL DEL SUELO:** 150,000 m³ x 850 kg/m³ = 127, 500,000 kilogramos = 127,500 toneladas.

✓ **KILOGRAMOS DE PET NECESARIO:** 127, 500,000 kilogramos x 1.2% = 1'275,000 kilogramos = 1,275 toneladas.

◆ **EJEMPLO 05: Suelo natural con 1.5% reforzamiento de fibras PET.**

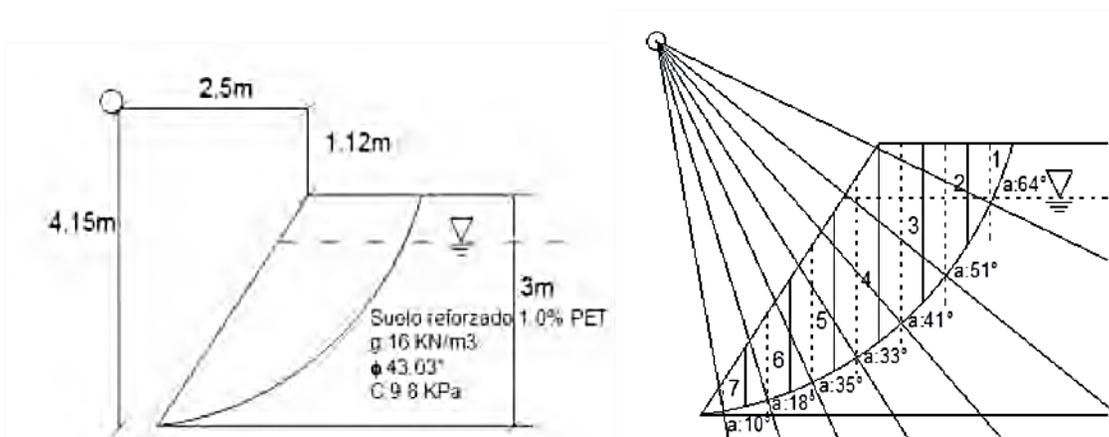


Figura 42: Centro de radio y dovelas del talud para el caso con 1.5% de fibras de PET. (SLIDE 6.0).

Tabla 38:

Resultado de ecuaciones para probetas con 1.5% de reforzamiento de fibras de PET.

DOV.	b	Z1	Zw	W1	α	u	Cos α	Sen α	cb/cos α	Tan $\phi(W1.Cos$ $\alpha.ub/cos$ $\alpha)$	W1.Sen α
1	0.5	0.66	0.06	5.28	64	0.64	0.438	0.899	11.17774	1.53834	4.74563
2	0.5	1.46	0.86	11.68	51	8.48	0.629	0.777	7.78618	45.38379	9.07706
3	0.5	1.99	1.39	15.92	41	13.64	0.755	0.656	6.49256	99.49506	10.44446
4	0.5	1.99	1.77	15.92	33	17.36	0.839	0.545	5.84258	126.69515	8.67065
5	0.5	1.52	1.52	2.16	35	14.91	0.819	0.574	5.98180	83.10379	6.97469
6	0.5	0.96	0.96	7.68	18	9.42	0.951	0.309	5.15216	33.14943	2.37325
7	0.5	0.34	0.34	2.72	10	3.3354	0.985	0.174	4.97559	4.15807	0.47232
Σ									47.40861	389.36555	42.28575

✓ **FS** = 10.10

✓ **VOLUMEN TOTAL DE SUELO:** 15 m² x 10 000 m = 150 000 m³

✓ **PESO TOTAL DEL SUELO:** 150,000 m³ x 850 kg/m³ = 127, 500,000 kilogramos
= 127,500 toneladas.

✓ **KILOGRAMOS DE PET NECESARIO:** 127, 500,000 kilogramos x 1.5% =
1'275,000 kilogramos = 1,275 toneladas.

Considerando los valores antes mostrados de los módulos de elasticidad obtenidos de las probetas remoldeadas, se hicieron los cálculos con el software SLIDE 6.0 para poder determinar la deformación esperada en cada borde. Recordando que el borde tiene 3 metros de altura y que las probetas ensayadas con confinamiento de 0.5kg/cm² son igual a 1.98 metros de profundidad, se tomó el módulo de elasticidad de esas probetas y de esta forma se calculó de manera más directa la deformación esperada de cada bordo.

La ecuación empleada para el cálculo fue:

$$\Delta L: \frac{F * L}{A * E}$$

Ecuación 10 Cálculo de la Deformación Esperada.



Donde:

F : Peso propio del suelo.

L : Longitud

A : Área de la sección.

E : Módulo de elasticidad

Tabla 39:

Deformaciones esperadas en los bordos.

DEFORMACIÓN ESPERADA EN EL TERRAPLEN					
<u>PORCENTAJES DE FIBRA DE PET</u>	SIN PET	0.4% PET	0.8% PET	1.2% PET	1.5% PET
DEFORMACIÓN DEL TERRAPLEN A 1 MT. DE PROFUNDIDAD	0.164	0.152	0.147	0.117	0.102
DEFORMACIÓN DEL TERRAPLEN A 2 MT. DE PROFUNDIDAD	0.384	0.356	0.344	0.275	0.195

Discusión

4.1. Caracterización Geotécnica del Suelo Cohesivo

Como se muestra en la curva de distribución granulométrica, casi el 99.8% del suelo pasa a través del tamiz No. 200; asimismo, en la Tabla 6 se exhibe un límite líquido de 119.5%, un límite plástico de 41.4% y índice de plasticidad de 78.1%. Un límite líquido inferior a 35% indica baja plasticidad, entre 35% y 50% de plasticidad intermedia, entre 50% y 70% de alta plasticidad y entre 70% y 90% de plasticidad muy alta (Whitlow, R., 1995). Por lo tanto, estos valores indican que el suelo es altamente plástico. En consecuencia, el suelo cae bajo la clase de suelo A-7-5 basado en el sistema de clasificación de suelos AASHTO. Los suelos de esta clase generalmente se clasifican como un material de propiedad de ingeniería deficiente para ser utilizado como material para la construcción de terraplenes en obras viales.

Los resultados que están relacionados con las características de hinchamiento del suelo también indican que el suelo es una arcilla muy expansiva con una hinchazón libre de aproximadamente 210%, índice de hinchazón libre de 163.6% y una relación de hinchamiento libre de 2.6. Por lo tanto, se descubrió que el suelo era arcilla expansiva altamente plástica con baja capacidad de carga cuando está empapado y con un alto potencial de hinchamiento, y estaba por debajo de las recomendaciones estándar para la mayoría de las obras geotécnicas, especialmente la construcción de carreteras. Por lo tanto, el suelo requiere una modificación y/o reforzamiento inicial para mejorar su viabilidad y propiedades ingenieriles.

4.2. Máxima Densidad Seca y Humedad Óptima del Suelo Cohesivo

La densidad seca máxima disminuye de 1.28 g / cm³ a 1.01 g / cm³ para no curado y a 0.918 g/cm³ para muestras de suelo curado de 7 días con un contenido aumentado progresivamente los porcentajes de fibras de polipropileno. La disminución en la densidad seca máxima se debe principalmente a: El reemplazo parcial de suelos comparativamente pesados con las fibras de polipropileno ligero; valor de gravedad específica comparativamente bajo (1,95) del PET que la del suelo reemplazado (2,79); también se puede atribuir al recubrimiento del suelo por las fibras que resulta en partículas grandes con vacíos más grandes y, por lo tanto, menos densidad.

El contenido de humedad óptimo aumenta de 32.24% a 51.12% para muestras de suelo curado sin curar y de 32.24% a 53.78% para 7 días aumentando progresivamente el porcentaje

de adición de fibras de polipropileno. El aumento en el contenido de humedad óptimo se debió principalmente a:

- El contenido óptimo de humedad del suelo aumenta con el aumento de las fibras PET, porque las fibras son más gruesas que el suelo. Cuantas más finas más área de superficie, más agua es necesario para proporcionar una buena lubricación.
- El aumento del contenido de agua también puede atribuirse a la reacción puzolánica de cenizas de bagazo con el suelo. Esto implica que se necesita más agua para compactar el suelo con la mezcla de fibras PET. Así que las fibras efectivamente secan los suelos húmedos y proporciona una rápida ganancia de fuerza inicial, que es útil durante la construcción en mojado, condiciones inestables del suelo. En general, se puede utilizar para mejorar la trabajabilidad de los suelos húmedos, o podría estar influenciado por la morfología de la superficie de las partículas de fibras PET y su gran afinidad por el agua absorbente, una característica que fue subjetivamente notado durante el programa de prueba.

4.3. Parámetros de Suelo Cohesivo Con y Sin Reforzamiento

En las probetas labradas de suelo natural se observa que cuanto mayor es el confinamiento, mayor es el porcentaje de deformación; es decir, requieren de más esfuerzo antes de fallar. Esto se debe a que el confinamiento en la cámara triaxial les da más rigidez a las probetas ensayadas, de esta forma tienen mayor resistencia.

Por otro lado, las probetas con adiciones de fibras de PET, se observa que cuanto mayor confinamiento, menor es el porcentaje de deformación. Pero es necesario considerar que la capacidad de deformación del suelo reforzado con fibra de PET se incrementa de forma importante respecto del suelo natural. Lo cual le brinda una mayor capacidad de deformación al suelo sin sufrir agrietamiento.

Las probetas que se ensayaron con 1.5% de fibras de PET de 30 mm presentaron el mejor resultado y se obtuvo con un confinamiento de 1.5 kg/cm²; así mismo, se obtuvo el resultado más bajo con el mismo porcentaje de fibras de PET, pero con un confinamiento de 0.5kg/cm². Es importante tener este tipo de comparativos; pues son importantes para poder determinar el porcentaje óptimo de fibras de PET a utilizar en el diseño de estructuras terreas.

A continuación, se muestra un comparativo de deformación en las probetas que no tienen reforzamiento de fibras PET con las que usaron reforzamiento de fibras de PET. Se calcula cuanto varió la deformación de las probetas.

Se hicieron dos clasificaciones, críticas y óptimas. Las críticas son las probetas que tuvieron menor resistencia y las óptimas las que tuvieron mayor resistencia.

Tabla 40:

Comparativo de deformación en las probetas ensayadas menos favorables.

CRÍTICAS			
COMPARATIVO DE MEJORAS OBTENIDAS EN PROBETAS SIN PET VS PROBETAS CON PET			
PORCENTAJES DE PET (30 mm)	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.40%	11.12%	8.31%	6.60%
MEJORA	-11.42%	27.44%	100.15%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.80%	12.85%	7.66%	6.36%
MEJORA	-23.35%	38.25%	107.70%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
1.20%	7.09%	7.69%	7.97%
MEJORA	38.93%	37.71%	65.75%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
1.50%	5.09%	4.69%	5.97%
MEJORA	45.93%	52.71%	108.05%
PORCENTAJES DE PET (60mm)	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.40%	10.12%	8.21%	5.60%
MEJORA	-12.32%	27.42%	100.15%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
0.80%	13.85%	7.66%	6.36%
MEJORA	-24.39%	38.25%	107.70%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
1.20%	6.09%	6.69%	8.97%
MEJORA	48.93%	40.71%	65.75%
0.0%	9.85%	10.59%	13.21%
1.50%	6.19%	4.59%	6.97%
MEJORA	35.93%	42.71%	45.5%

En el caso de las probetas que contenían 0.4% y 0.8 % de fibras de PET con confinamiento de 0.5kg/cm², se observa que existe mayor deformación en las probetas con respecto a las probetas conformadas por suelo natural. Esto se debe a que las fibras de PET funcionan como material de refuerzo a medida que se elongan las fibras durante el proceso de deformación de la probeta, permitiendo que las probetas puedan resistir mayores esfuerzos sin fallar.

Así mismo, ambos porcentajes de fibras de PET obtuvieron los mejores resultados con un confinamiento de 1.5 kg/cm², esto es debido que el confinamiento incrementa el módulo de elasticidad permitiéndoles tener mayor resistencia y menor deformación.

En este caso el porcentaje ideal de fibras de PET es la de 30 mm, y para confinamientos mayores a 1.0kg/cm² es conveniente el uso de 1.5% y para confinamientos menores a este es de 1%.

En las pruebas realizadas con un confinamiento de 0.5 kg/cm², las probetas que usaron 0.4% y 0.8% de fibras de PET tuvieron menor desempeño que las probetas de suelo natural; por otro lado, las probetas que usaron 1.2% y 1.5% de fibras de PET tuvieron una mejora notable. Esto se debe a que el PET le dio una mayor rigidez a la probeta.

Tabla 41:

Comparativo de deformación en las probetas ensayadas más favorables.

ÓPTIMAS			
COMPARATIVO DE MEJORAS OBTENIDAS EN PROBETAS SIN PET VS PROBETAS CON PET			
PORCENTAJES DE PET (30mm)	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
0.40%	10.46%	6.82%	6.11%
MEJORA	-7.36%	51.76%	112.27%
0.0%	9.77%	10.47%	13.21%
0.80%	11.51%	7.04%	6.21%
MEJORA	-15.12%	48.72%	112.72%
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
1.20%	6.58%	7.52%	7.08%
MEJORA	47.26%	37.63%	83.19%
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%

1.50%	6.58%	6.52%	5.08%
MEJORA	47.26%	45.63%	115.19%
PORCENTAJES DE PET(60mm)	CONF. 5	CONF. 1.0	CONF. 1.5
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
0.40%	11.46%	5.82%	6.31%
MEJORA	-8.36%	60.76%	110.27%
0.0%	9.77%	10.47%	13.21%
0.80%	13.51%	7.04%	6.80%
MEJORA	-20.12%	52.72%	115.72%
0.0%	9.69%	10.35%	12.97%
1.20%	5.58%	6.52%	7.10%
MEJORA	57.26%	41.63%	7.20%
0.0%	9.69%	10.35%	11.97%
1.50%	7.58%	8.52%	7.08%
MEJORA	52.26%	42.63%	80.19%

Como en la muestra anterior, el caso de las probetas que contenían 0.4% y 0.8% de fibras de PET con confinamiento de 0.5kg/cm², se sigue observando que existe mayor deformación en las probetas con respecto a las probetas de suelo natural. Esto marca una tendencia cuando existe poco confinamiento y este porcentaje de fibras de PET.

Así mismo las probetas que tenían 1.2% y 1.5% de fibras de PET obtuvieron los mejores resultados con un confinamiento de 1.5 kg/cm², se nota una leve diferencia entre una y otra.

En conclusión, se puede notar que las probetas con mejores resultados para confinamientos mayores a 1.0 kg/cm² son las que usaron 1.5% de fibras de PET de 30 mm (3 cm.) y para confinamientos menores a este aquellas que tuvieron 1.2% fibras de PET.

En las pruebas realizadas con un confinamiento de 0.5 kg/cm², las probetas que usaron 0.4% y 0.8% de fibras de PET tuvieron menor desempeño que las probetas de suelo natural; por otro lado, las probetas que usaron 1.2% y 1.5% de fibras de PET tuvieron una mejora notable. Esto se debe a que el PET le dio una mayor rigidez a la probeta.

Para los confinamientos de 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm², destacan las probetas en las que se usó 0.4% de fibras de PET. Disputa muy de cerca a las probetas que usaron 0.8% de fibras de PET. Esto es muy importante ya que, si se hiciera un análisis de viabilidad, podría tomarse en cuenta usar 0.4% de fibras de PET para ahorrar dinero y recurso.

4.4. Capacidad de Soporte Relativo (CBR) del Suelo Con y Sin Reforzamiento

Al inicio de la prueba el suelo natural y el suelo reforzado se comportan de manera similar, sin embargo, conforme continua la penetración el suelo reforzado comienza a tomar más carga, lo que indica que se requieren de esfuerzos mayores para que las fibras comiencen a trabajar e interactuar con el suelo circundante. Esto confirma lo propuesto por Diambra et al., (2012) quienes mencionan que para suelos arcillosos el nivel de dependencia de esfuerzos es importante, ya que la rigidez inicial del suelo reforzado con fibras no está influenciada por la presencia de las fibras, en otras palabras, para deformaciones pequeñas el comportamiento del suelo reforzado es gobernado solamente por la matriz de arcilla.

4.5. Evaluación Con Software Del Desempeño De Terraplenes Con Dimensiones Estándar

Se observa que al usar fibras de PET como material de refuerzo el terraplén tiene menor deformación. Se puede explicar porque las fibras refuerzan el suelo y permiten que se adapte a las condiciones de deformabilidad impuestas sin sufrir agrietamiento. Si bien el factor de seguridad, para la situación analizada disminuye en función del incremento del porcentaje de adición de fibras PET, este factor sigue siendo suficiente para que el terraplén carretero se mantenga en operación sin riesgo.

Finalmente, esto implica que el suelo reforzado con la fibra permite que el terraplén se adapte de manera continua a la deformación del suelo en el cual se desplanta sin sufrir agrietamiento y de esta manera reducir el riesgo de tubificación y falla.

Conclusiones

Se determinó el estudio de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) en el reforzamiento de suelos cohesivos, lo cual mejora hasta en un 60% la resistencia del suelo y presenta hasta un 40% de mayor capacidad de deformación, por lo cual, a través del análisis con software, se verifica un aumento de estabilidad del 20% en terraplenes de obras viales conformados por suelos reforzados con fibras PET.

Sé logró obtener 312 kg de suelos cohesivos de 3 calicatas realizadas en la carretera de acceso a la sierra, altura del kilómetro 52 en el sector Plazapampa, Otuzco, departamento de La Libertad. Además, se logró caracterizar geotécnicamente el suelo cohesivo en estado natural, resultando ser un limo de alta plasticidad (MH) de baja resistencia (CBR=3%).

Se logró conformar mezclas de suelos cohesivos reforzados variando el porcentaje de adición y la longitud de las fibras PET utilizada, considerando como combinación óptima la fibra con 30 mm de longitud a una dosificación de 1.5% de peso seco del suelo. La combinación considerada como óptima, obtuvo una mejora del 60% en comparación al suelo sin refuerzo, siendo el esfuerzo resistente promedio igual a 5.42 kg/cm².

Existe una relación de aumento de resistencia conforme aumenta la dosificación de la fibra, sin embargo, debe aclararse que entre mayor es la dosificación de la fibra, el proceso de mezclado y la obtención de una mezcla homogénea se vuelve más difícil.

Ante pruebas de penetración como el CBR las fibras comienzan a actuar y presentar mejoras ante longitudes de penetración mayores a las consideradas por la prueba, obteniéndose un máximo valor de CBR de 95% en la mezcla suelo-fibra de 30 mm al 1.5%. Además, la dosificación de la fibra desempeña un papel importante en el aumento del ángulo de fricción obtenido a través de la prueba de compresión triaxial de la mezcla suelo-fibra, obteniéndose un mejor desempeño de 43° con fibras de 30 mm al 1.5%.

El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) de 15 um de diámetro y 30 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, incrementaron progresivamente los valores de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales conformados por suelos cohesivos; alcanzándose los mejores resultados con el porcentaje de adición al 1.5%.



El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) de 15 μ m de diámetro y 60 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, incrementaron progresivamente los valores de resistencia y deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales, pero disminuyeron su estabilidad, debido a la pérdida de cohesión ocasionada por el aumento de longitud de las fibras de refuerzo utilizadas, sin embargo, la estabilidad siguió estando por encima de los límites permitidos (1.5).

Se determinó que el porcentaje óptimo de fibras PET que se debe agregar a suelos cohesivos para viabilizar su uso en terraplenes, es de 1.5% del peso seco del suelo con fibras de 30 mm, debido a que se logró un mezclado más uniforme y de fácil trabajabilidad, manteniéndose una cohesión casi inalterada con un aumento de resistencia de 60% y 40% de mayor capacidad de deformación; presentando así una alternativa para el reúso a gran escala de materiales de desecho, a partir de fibras derivadas del reciclaje del PET en obras geotécnicas, disminuyendo el impacto ambiental asociado.

Recomendaciones

Las fibras de PET investigada en este trabajo de investigación puede usarse como material de refuerzo en combinación con cal con productos económicos y ambientales beneficios. Por lo tanto, los organismos interesados como las industrias y las entidades gubernamentales deben informarse sobre este potencial material de refuerzo del suelo y promover su reciclaje y uso estandarizados.

Las empresas recicladoras y fábricas de producción del PET en colaboración con organizaciones de educación superior en el país debería trabajar en conjunto y establecer un equipo de investigación para seguir estudiando el uso del PET reciclado como material de refuerzo en diferentes tipos de suelos.

Actualmente parecería difícil construir una estructura de este tipo debido a que se necesitan muchas toneladas de fibra de PET, pero es necesario seguir incentivando el reciclado masivo de envases de PET para poder llevar a cabo una obra de este tipo, implementando nuevas políticas de gestión de residuos, contribuyendo con la sostenibilidad medioambiental.

Los siguientes temas son recomendados para futuros investigadores de las ramas de ingeniería civil y afines, así como, para profesionales interesados en la innovación tecnológica sostenible para el desarrollo de país:

- Se deben realizar estudios químicos para verificar la no modificación de los suelos por la adición de este tipo de fibras sintéticas, usando métodos más avanzados como Térmico Análisis (TGA) y microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Deben estudiarse los efectos de reforzamiento de suelos con diferentes tipos de espesor y longitudes de las fibras PET, además de variar los porcentajes de adición, hasta encontrar la solución más conveniente tanto a nivel de costos como de mezclado en obra.
- Los estudios deberían realizarse utilizando los residuos poliméricos de mayor proporción en el país para que así se contribuya con una solución viable en función de las cantidades necesarias.



- Se debe investigar el potencial de reforzamiento de los diferentes tipos de residuos plásticos, para incentivar nuevos mecanismos de reutilización, contribuir con el medio ambiente e incentivar la industria del reciclaje.
- Al variar tanto el contenido de otros cementantes como de la proporción de fibras PET, uno puede encontrar la económica relación de mezcla.
- Reforzamiento de fibras PET y cemento en diferentes tipos de suelos.
- Estabilización de taludes con fibras PET en diferentes tipos de suelos.
- Comparación entre la estabilización de taludes con fibras sintéticas y con geomallas.
- Estudio con software de la aplicación de suelos reforzados con fibras para la conformación de otras estructuras terreas: como bordos, diques, etc.

Referencias Bibliográficas

- Al-Akhras, M., Attom, M., Al-Akhras, K., & Malkawi, A. (2008). Influence of Fibers on Swelling Properties of Clayey Soil. *Geosynthetics International Journal*(4), pp. 304-309.
- Almanza Álvarez, I. (2015). Estudio del Uso de Polietileno Tereftalato como Material de Refuerzo de Estructuras Tétrreas Conformadas por Suelos Cohesivos.
- Al-Refeai, T. (1991). Behavior of Granular Soils Reinforced with Discrete Randomly Oriented Inclusions. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, X, pp. 319-335.
- Andersland, O., & Khattak, A. (1979). Shear Strength of Kaolinite/Fiber Soil Mixtures, *Proceedings. International Conference on Soil Reinforcement*, I, pp. 11-16.
- Arriaga Vásquez, D. (2006). Aspectos Constructivos en la Técnica de Compactación Dinámica para Mejoramiento Masivo de Suelos.
- Consoli, N., & Prietto, D. (1998). Influence of Fiber and Cement Addition in Sandy Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, CXXIV, pp. 1211-1214.
- Consoli, N., Casagrande, M., & P.D.M. Thome, A. (2003). Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil. *Journal of geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, CXXIX, pp. 951-955.
- Ghavami, K., Romildo, D., Toledo, F., & Normando, P. (1999). Behaviour of Composite Soil Reinforced with Natural Fibres. *Cement and Concrete Composites*, XXI, pp. 39-48.
- Ghiassian, H., Poorebrahim, G., & Gray, D. (2004). Soil Reinforcement with Recycled Carpet Wastes. *Waste Management Research*(22), pp. 108-114.
- Gray, D., & Al-Refeai, T. (1986). Behavior of Fabric versus Fiber-Reinforced Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, CXII(8), pp. 804-820.

Gray, D., & Ohashi, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, CIX(3), pp. 335-353.

<http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11114/GIL%20CARBONELL%2020Erick%20Robinson%3B%20NU%20C3%91EZ%20QUINTANA%2020Ingrid%20K%20arolina.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Juárez Badillo, E. (2007). *Mecánica de Suelos*. Limusa.

Kumar, A., Walia, B., & Mohan, J. (2006). Compressive Strength of Fiber Reinforced Highly Compressible Clay. *Journal of Construction and Buildings Materials*, XX, pp. 1063-1068.

López Ortiz, J. (2006). *Suelos Arcillosos Reforzados con Materiales de Plástico Reciclado (PET)*.

Maher, M., & Gray, D. (1990). Static Response of Sand Reinforced with Randomly Distributed Fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, CXVI(11).

Ranjan, G., Vasan, R., & Charan, H. (1996). Probabilistic Analysis of Randomly Distributed Fiber Reinforced Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, CXXII, pp. 419-426.

Rosales Hurtado, D. (2014). *Mejoramiento de Suelos Expansivos mediante la Inclusión de Fibras*.

Sherwell Betancourt, G. (2014). *Estudio del Uso de Polietileno Tereftalato como Material de Refuerzo de Estructuras Téreas Conformadas por Suelo Fino*.

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones (Quinta ed.)*. Limusa.

Wang, Y. (199). Utilization of Recycled Carpet Wasnd Soil. *Journal of Polymer-Plastic Technology Engineering*, III(3), pp. 533-546.

Anexos

Anexo N°1: Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS	MARCOTEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>¿Cuál es el estudio de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) en el reforzamiento de suelos cohesivos para la viabilidad de su uso en terraplenes de obras viales?</p> <p>Los suelos cohesivos generalmente presentan baja capacidad de soporte, altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta su uso para construir estructuras terreas. En los terraplenes de obras viales, el principio general que debe presidir en su construcción consiste en utilizar al máximo posible los materiales disponibles de las excavaciones; sin embargo, debido a la gran diversidad de tipologías terrestres del país, es común encontrar suelos cohesivos en los tramos</p>	<p>O. General: Determinar cuál es el estudio de la inclusión de fibras de polietileno tereftalato (PET) en el reforzamiento de suelos cohesivos para la viabilidad de su uso en terraplenes de obras viales.</p> <p>O. Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Obtener muestras representativas de suelos cohesivos en la carretera de acceso a la sierra, altura del kilómetro 52 en el sector Plazapampa, Otuzco, departamento de La Libertad. -Caracterizar geotécnicamente el suelo cohesivo en estado natural, así como evaluar sus propiedades mecánicas bajo las normas ASTM y MTC. -Conformar mezclas de suelos cohesivos reforzados variando el porcentaje de adición y la longitud de las fibras PET utilizadas. 	<p>(Almanza Álvarez, 2015) en su tesis de máster titulada: "Estudio del uso de polietileno tereftalato como material de refuerzo de estructuras térreas conformadas por suelos cohesivos".</p> <p>(López Ortiz, 2015) en su tesis de grado titulada: "Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)".</p> <p>(Rosales Hurtado, 2014) en su tesis de máster titulada: "Mejoramiento de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras".</p> <p>(Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá, 2014) en su investigación titulada: "Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones".</p> <p>(Fresneda et al., 2014) en su investigación: "Efecto en las propiedades mecánicas del suelo mediante el uso de fibras artificiales"</p> <p>(Tang C. & Shi B. & Zhao L., 2010), en su investigación titulada:</p>	<p>H. General:</p> <p>El reforzamiento de suelos cohesivos mediante la inclusión de fibras de polietileno tereftalato(PET), incrementaran los valores de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse de terraplenes de obras viales conformados por este suelo, lo cual hará viable su empleo en este tipo de estructuras terreas.</p> <p>H. Específicas:</p> <p>-El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato(PET) de 15 um de diámetro y 30 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, incrementaran progresivamente los valores de estabilidad, resistencia y</p>	<p>V. Independiente:</p> <p>1. Fibras de polietileno tereftalato(PET) de L=30 mm y D= 15 um.</p> <p>2. Fibras de polietileno tereftalato(PET) de L=60 mm y D= 15 um.</p> <p>A partir de estas variables se reforzará el suelo cohesivo a diferentes porcentajes para viabilizar su empleo en terraplenes de obras viales.</p> <p>V. Dependiente:</p> <p>1. Reforzamiento de suelos cohesivos para la viabilidad de su uso en terraplenes de obras viales</p> <p>Dimensiones:</p>	<p>Diseño de Investigación: Experimental Experimental Pura</p> <p>Unidad de Estudio: Suelos Cohesivos</p> <p>Población: 312 kg de suelo cohesivo obtenido en la carretera de acceso a la sierra, altura del kilómetro 52 en el sector Plazapampa, Otuzco, departamento de La Libertad.</p> <p>Muestra:</p> <p>81 probetas de 7cm de diámetro y 14 cm de altura para la prueba de compresión triaxial estática (no consolidada, no drenada) con confinamientos de 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm², conformadas por 150 kg de suelo cohesivo reforzado con fibras PET de 30 mm y 50 mm al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2%</p>

<p>carreteros proyectados y al no existir investigaciones de alternativas técnicas de reforzamiento para su uso que aseguren la estabilidad , resistencia y deformabilidad sin agrietarse de la estructura terrea conformada, se recurre al uso de material de préstamo para su construcción, lo cual deriva en una sobreexplotación de recursos naturales.</p>	<p>-Determinar los parámetros geotécnicos de resistencia - deformación del suelo cohesivo en estado natural y las diferentes combinaciones de suelos cohesivos reforzados con fibras PET, realizando pruebas de compresión triaxial estática (no consolidada, no drenada) y ensayos de Capacidad de Soporte Relativo del suelo (CBR), bajo las normas ASTM Y MTC.</p> <p>-Evaluar el desempeño de terraplenes conformados por suelos cohesivos con y sin reforzamiento de fibras PET, a partir de los parámetros geotécnicos obtenidos, mediante el modelamiento y análisis matemático con el software SLIDE 6.0., bajo los parámetros de estabilidad, resistencia y deformabilidad sin agrietarse.</p>	<p>“Interfacial shear strength of fiber reinforced soil”</p> <p>(Akbulut S & Arasan S. & Kalkan E., 2007), en su investigación titulada: “Modification of clayeysoils using scrap tire rubber and synthetic fibers”.</p> <p>(Tang C. & Shi B. & Gao W. & Chen F. & Cai Y., 2007) en su investigación titulada: “Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil”</p> <p>(Gregory G. H., 2006) en su tesis doctoral titulada: “Hear Strength, Creep and Stability FiberReinforced Soil Slopes”.</p> <p>(Kumar A. & Walia B. S. & Mohan J., 2006), en su investigación titulada: “Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay”.</p> <p>(C. Fernández Calvo, 2006) en su investigación titulada: “Estudio experimental de refuerzo de suelos con fibras sintéticas”</p> <p>(Li C., 2005) en su tesis Doctoral titulada: “Mechanical Response of Fiber-Reinforced Soil”.</p>	<p>deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales conformados por suelos cohesivos; alcanzándose los mejores resultados con el porcentaje de adición al 1.5%, además debido al tamaño de las fibras se logrará un mezclado más uniforme y de fácil trabajabilidad manteniéndose una cohesión casi inalterada.</p> <p>-El reforzamiento del suelo cohesivo con la inclusión de fibras de polietileno tereftalato(PET) de 15 um de diámetro y 60 mm de longitud adicionados al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo, Incrementarán progresivamente los valores de resistencia y deformabilidad sin agrietarse de los terraplenes de obras viales, pero disminuirán su estabilidad, debido a la pérdida de cohesión ocasionada por el aumento de longitud de las fibras de refuerzo utilizadas, sin embargo, la estabilidad seguirá estando por encima de los límites permitidos, lo cual haría aún viable su empleo en este tipo de estructuras terreas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterización geotécnica del suelo cohesivo. - Máxima densidad seca del suelo cohesivo. - Humedad Óptima del suelo cohesivo. -Parámetros de suelo cohesivo con y sin reforzamiento: EsfuerzoDeformación, Módulo de Elasticidad, Esfuerzo Cortante, Porcentaje de Deformación. - Parámetros de resistencia de suelo cohesivo con y sin reforzamiento: Angulo de fricción y cohesión. - Capacidad de Soporte Relativo del suelo con y sin reforzamiento. -Evaluación con software del desempeño de terraplenes con dimensiones estándar. 	<p>y 1.5%. Más 27 moldes para ensayos de CBR, conformados por 162 kg de suelo cohesivo reforzado con fibras PET de 30 mm y 50 mm al 0%, 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5%</p> <p>Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos: Técnica: Observación.</p> <p>Instrumento: Guía de observación.</p> <p>Métodos e instrumentos de análisis de datos:</p> <p>Método: Inferencia estadística.</p> <p>Instrumento: Prueba de hipótesis.</p> <p>-T Student.</p>
---	---	---	---	--	---

Anexo N°2: Guia de observación de Calicatas.

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL		
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
GUIA DE OBSERVACION DE CALICATAS REALIZADAS EN LA AV. CAMPO PRIMAVERAL, PROGRESIVA Km 0 + 000.00 al Km 1 + 000.00, LAREDO			
TESIS:	"ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018"		
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	Nº de Ensayo:	1
Código:	CAL-01	Tipo de Muestra:	Suelo Cohesivo Inalterado

1. DATOS INFORMATIVOS

- 1.1 Ubicación: Carretera Samne – Desvío Otuzco Km 52
- 1.2 Distrito: Plazapampa
- 1.3 Ciudad: Otuzco
- 1.4 Departamento: La Libertad
- 1.5 Coordenadas: -8.060720, -79.043241
- 1.6 Altitud: 150 m.s.n.m.
- 1.7 Profundidad: 2 metros
- 1.8 Utilización: Vivienda
- 1.9 Clima: Templado
- 1.10 Estratos: 2



ESTRATO	PROFUNDIDAD (En metros)	DESCRIPCION
1	0 – 1	Estrato conformado por arena fina suelta contaminada con residuos de relleno conformado por material orgánico, cierto desmonte con basura y afirmado usado posiblemente para el tránsito de vehículos.
2	1 – 2	Estrato conformado por arena fina sin plasticidad y otros fino, estrato color beige pardo o amarillo oscuro.

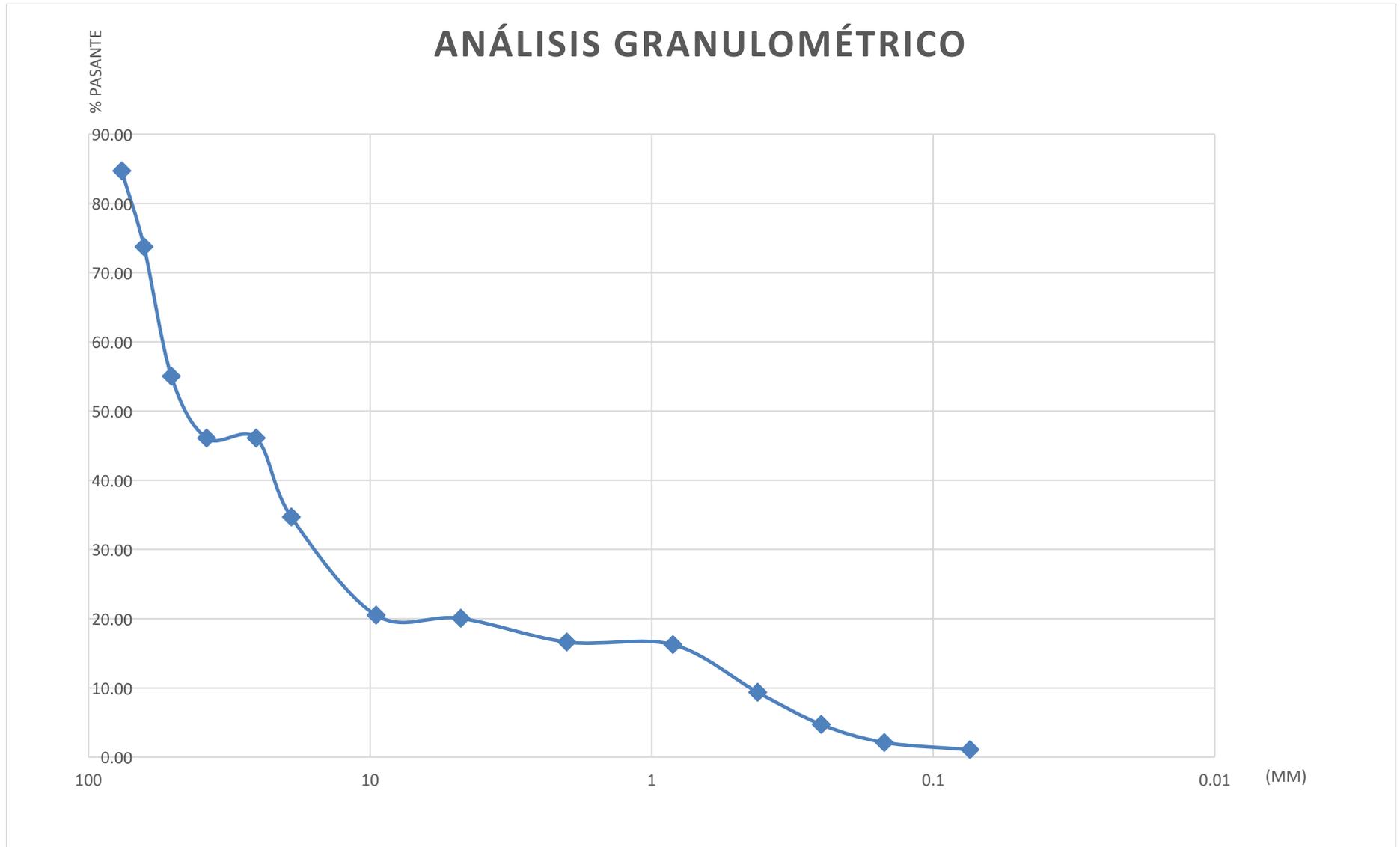


Anexo N°3: Guía de ensayo granulométrico.

U.N.T	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO			
TESIS:	ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018		
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:	1
			Suelo Cohesivo
Código:	SCI-GR 01	Tipo de Muestra:	Inalterado

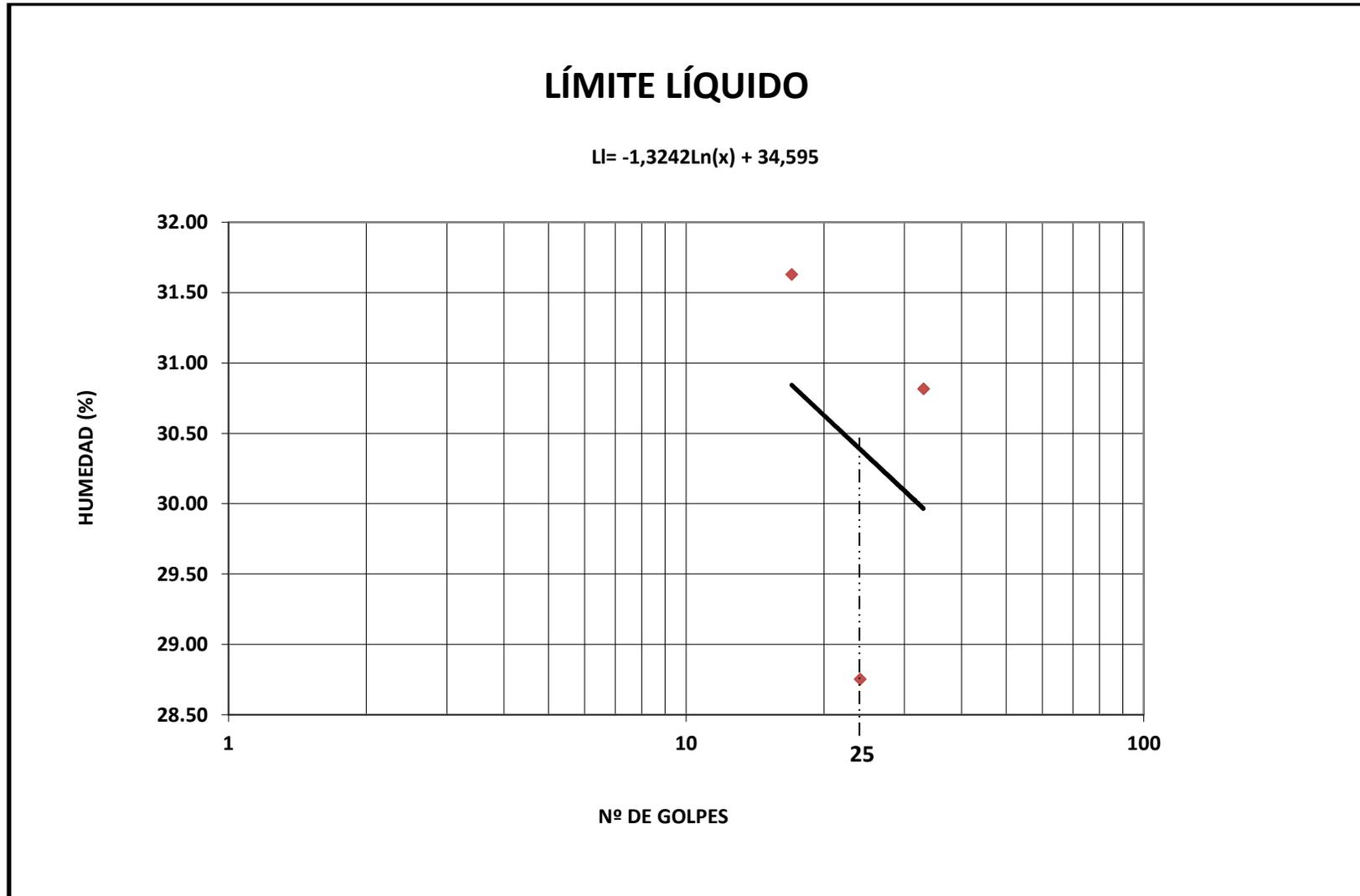
		Desing. del Tamiz US	A Peso Retenido gr,	A Peso Retenido gr, REAL	B % Pasante	% Mas Grueso	% Mas Fino	PESO TOTAL DE LA MUESTRA
TAMIZADO USANDO EL P.T.M.	PIEDRA O CANTOS	4						(P.T.M.) 4757.25 gr,
		3	728.50	728.50	15.31	15.31	84.69	
	GRAVA	GRUESA	2 1/2	521.70	521.70	10.97	26.28	73.72
			2	888.88	888.88	18.68	44.96	55.04
			1 1/2	425.40	425.40	8.94	53.91	46.09
		FINA	1	1.05	1.05	0.02	53.93	46.07
			3/4	541.20	541.20	11.38	65.31	34.69
			1/2					
		3/8	674.70	674.70	14.18	79.49	20.51	
		1/4						
		N° 4	21.60	21.60	0.45	79.94	20.06	
	TAMIZADO CON FRACCIÓN MENOR Q P.T.M.	GRUESA	N° 8					
			N° 10	163.40	163.40	3.43	83.38	16.62
MEDIA		N° 16						
		N° 20	18.15	18.15	0.38	83.76	16.24	
		N° 30						
		N° 40	327.00	327.00	6.87	90.63	9.37	
FINA		N° 50						
		N° 60	220.80	220.80	4.64	95.27	4.73	
		N° 80						
		N° 100	124.10	124.10	2.61	97.88	2.12	
	N° 200	50.30	50.30	1.06	98.94	1.06		
	P N° 200	50.47	50.47	1.06	100.00	0.00		

VÍA SECA	<input type="text" value="x"/>	VÍA HÚMEDA	<input type="text"/>
CARACTERÍSTICAS DE MUESTRA ENSAYADA			



Anexo N°4: Guía de ensayo límites de consistencia

UNT		FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL				DATOS	
		LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS				RESULTADOS	
ENSAYO DE LIMITES DE CONSISTENCIA							
TESIS:		ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018					
TESISTA:		Carlos Martin Carrillo Vega		N° de Ensayo:		1	
Código:		SCI-LC 01		Tipo de Muestra:		Suelo Cohesivo Inalterado	
LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO		LIMITE DE CONTRACCION	
N° DE CAIDAS	17	24	33				
N° DE CAPSULA	6	81	108	103	54	N° DE CAPSULA	E61
WTh , gr	24.724	26.236	25.784	13.25	13.427	WTh , gr	56.188
WTs , gr	21.367	22.629	22.191	12.934	12.963	V1= V CAPSULA	16.650
W CAPSULA	10.753	10.084	10.531	11.319	10.724	W CAPSULA	23.585
W ω	3.357	3.607	3.593	0.316	0.464	WTs , gr	49.689
W SECO , gr	10.614	12.545	11.66	1.615	2.239	H prom cm	1.150
ω , (%)	31.63	28.75	30.81	19.57	20.72	Diametro cm	3.980
						V2= V SECO	14.307
						W ω	6.499
LL: 30.3		LP: 20.1		LC 15.9		W SECO , gr	26.104
		IP: 10.2		IC: 4.2		L.C, (%)	???????
TIPO DE SUELO:						(P.R.A.)	15.922
						$LI = A * \ln(x) + B$	
						A=	-1.3242
						B=	34.595





Anexo N°5: Guía de ensayo peso específico de sólidos en suelos – finos

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL	
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
ENSAYO DE PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS EN SUELOS		
TESIS:	<i>ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018</i>	
TESISTA:	Carlos Martín Carrillo Vega	N° de Ensayo: <u>1</u>
Código:	SCI-DSF 01	Tipo de Muestra: Suelo Cohesivo Inalterado
DATOS		
N° DE LABORATORIO	RESULTADOS	
PROFUNDIDAD, (m)		
PICNÓMETRO N°	5	
CAPACIDAD PICNÓMETRO CM3	500	
PESO PICNÓMETRO , gr.	159	
PESO PICNÓMETRO + SUELO SECO , gr.	251.15	
PESO SUELO SECO , gr. (Ws)	92.15	
PESO PICN. + AGUA + SUELO , gr. (W1)	651.47	
PESO PICN. + AGUA a C.T. , gr. (W2)	515.98	
PESO PICN. + AGUA A TEMP. ENSAYO.	562.87	
TEMPERATURA DE ENSAYO, ° C	20.5	
GS A TEMPERATURA ENSAYO	25.95	
GS A 20 ° C	25.95	

DENSIDAD RELATIVA DEL AGUA Y FACTOR DE CONVERSIÓN "K" PARA VARIAS TEMPERATURAS					
TEMP ° C	γ_w	K	TEMP. ° C	γ_w	K
19	0.9984347	1.0002	25	0.9970770	0.9989
20	0.9982343	1	26	0.9968156	9.9986
21	0.9980233	0.9998	27	0.9965451	0.9983
22	0.9978019	0.9996	28	0.9962652	0.998
23	0.9975702	0.9993	29	0.9959761	0.9977
24	0.9973286	0.9991	30	0.9956780	0.9974

Anexo N°6: Guía de ensayo peso específico de sólidos en suelos – gruesos.

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL		
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
	ENSAYO DE PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS EN SUELOS		
TESIS:	<i>ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018</i>		
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:	<u>1</u>
Código:	SCI-DSG 01	Tipo de Muestra:	Suelo Cohesivo Inalterado
PESO DE LA GRAVA HUMEDAD SUPERFICIALMENTE SECA	450.2	gr.	DATOS
PESO DE LA GRAVA SUMERGIDA	-		RESULTADOS
VOLUMEN INICIAL DE LA PROBETA	500	cm ³	
VOLUMEN FINAL DE LA PROBETA	605	cm ³	
VOLUMEN DE LA GRAVA = VOLUMEN DESALOJADO	105	cm ³	
PESO DE LA GRAVA SECA	397.1	gr.	
RESULTADOS			
VOLUMEN DE ABSORCIÓN	53.1	cm ³	
% DE ABSORCIÓN	13.37	%	
PESO ESPECIFICO APARENTE DE LA GRAVA	3.78	gr/cm ³	
PESO ESPECIFICO RELATIVO DE LA GRAVA (Gsg)	7.65	gr/cm ³	

Anexo N°7: Guía de ensayo gravedad específica.

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA EN SUELOS			
TESIS:	ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018		
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:	1
Código:	SCI-GE 01	Tipo de Muestra:	Suelo Cohesivo Inalterado

Gs:	2.62	
$\gamma_{d \min}$:	1.849	T/m ³
$\gamma_{d \max}$:	2.207	T/m ³
$\gamma_{d \text{ Nat}}$:	1.68	T/m ³
$\gamma_{d \text{ Comp}}$:	1.98	T/m ³
Dr Nat	-62.12	%

e máx.:	0.417	T/m ³
e min.:	0.187	T/m ³
e Nat	0.560	T/m ³
e Comp.:	0.323	T/m ³
Dr Comp.	40.73	%

Peso del molde =	4287	gr.
Volumen del molde (V)=	2819	cm ³
Peso del molde + muestra=	9500	gr.
Peso de muestra Wm=	5213	gr.
Diámetro del molde=	15.01	cm.
h1=	2.55	cm.
h2=	2.79	cm.
h3=	2.41	cm.
Volumen máximo=	2819	cm ³
Volumen mínimo=	2361.878	cm ³
γ_w =	1	T/m ³

$$DR = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100$$

V1=	2367.776774	cm ³
V2=	2325.308706	cm ³
V3=	2392.549814	cm ³

DATOS	
RESULTADOS	

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$\gamma_{d \min} = \frac{Wm}{V_{\max}}$$

$$\gamma_{d \max} = \frac{Wm}{V_{\min}}$$

$$DR = \frac{\frac{1}{\gamma_{d \min}} - \frac{1}{\gamma_d}}{\frac{1}{\gamma_{d \min}} - \frac{1}{\gamma_{d \max}}} \times 100$$

$$e_{\max} = \frac{Gs * \gamma_w}{\gamma_{d \min}} - 1$$

$$e_{\min} = \frac{Gs * \gamma_w}{\gamma_{d \max}} - 1$$



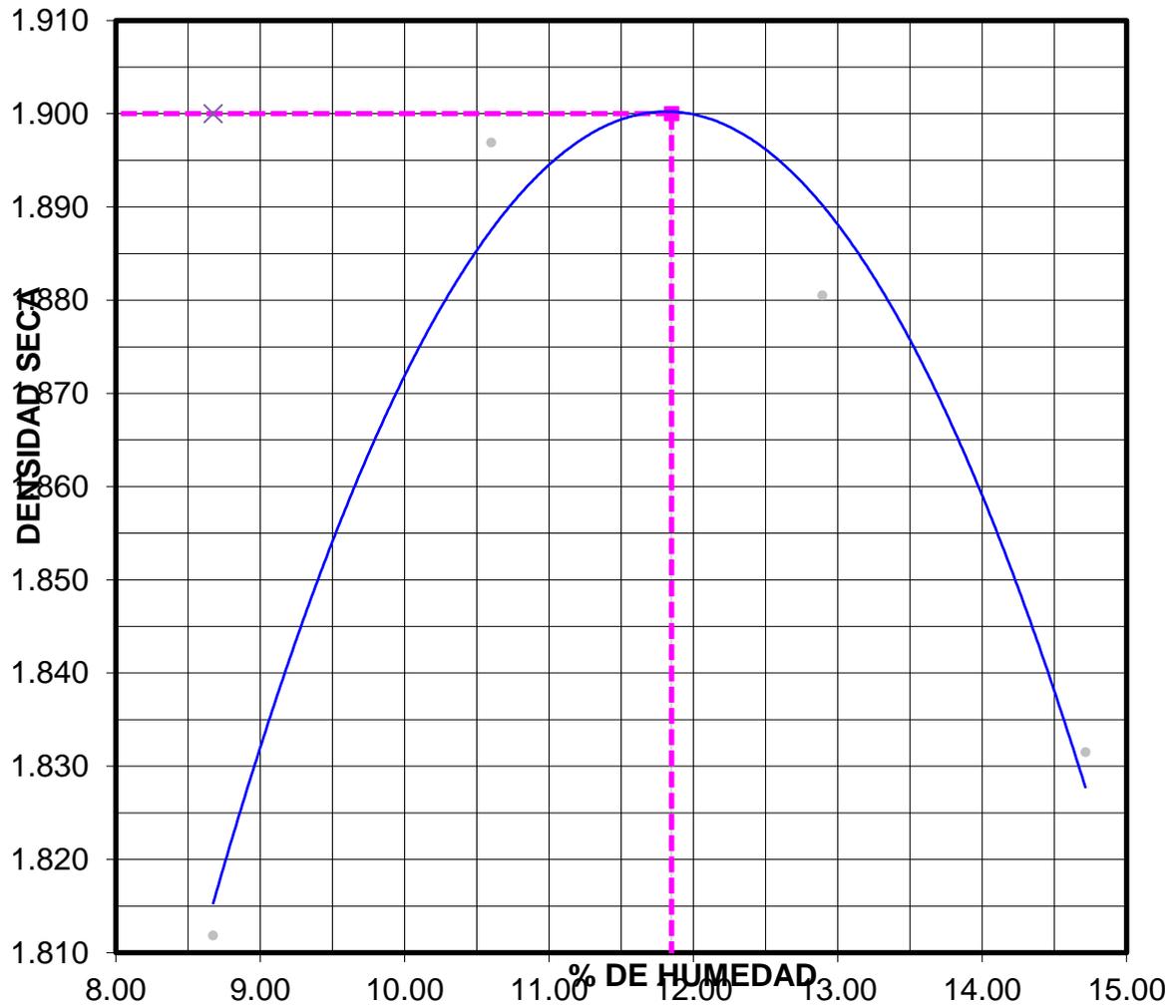
Anexo N°8: Guía de ensayo contenido de humedad.

UNT		FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL		
		LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
ENSAYO DE HUMEDAD EN SUELOS				
TESIS:	ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018			
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:	1	
Código:	SCI-HS 01	Tipo de Muestra:	Suelo Cohesivo Inalterado	
<u>HUMEDAD NATURAL : ASTM D - 2216</u>				
	LATA	1	2	3
PESO DE LATA grs		23.35	25.63	28.45
PESO DEL SUELO HUMEDO + LATA grs		125.32	123.12	126.32
PESO DEL SUELO SECO + LATA grs		106.00	104.65	107.95
PESO DEL AGUA grs		19.32	18.47	18.37
PESO DEL SUELO SECO grs		82.65	79.02	79.50
% DE HUMEDAD		23.38	23.37	23.11
PROMEDIO % DE HUMEDAD		23.29		
<u>PESO ESPECÍFICO : ASTM D - 854</u>				
	LATA	1	2	3
PESO FRASCO+AGUA+SUELO		1453.00	1455.00	1451.00 grs.
PESO FRASCO+AGUA		1170.00	1170.00	1170.00 grs.
PESO SUELO SECO		480.00	474.00	510.00 grs.
PESO SUELO EN AGUA		283.00	285.00	281.00 grs.
VOLUMEN DEL SUELO		197.00	189.00	229.00 cm3
PESO ESPECIFICO		2.44	2.51	2.23 grs./cm3
PROMEDIO		2.39		grs./cm3
<u>PESO VOLUMETRICO : ASTM D - 2937</u>				
	LATA	1	2	3
PESO DE MOLDE grs		1277	1285	1298
PESO DEL SUELO + MOLDE grs		7482	7565	7542
PESO DEL SUELO SECO grs		6205	6280	6244
VOLUMEN DEL MOLDE cm3		0.0034	0.0034	0.0034
PESO UNITARIO grs/cm3		1.83	1.85	1.84
PROMEDIO grs/cm3		1.84		

Anexo N°9: Guía de ensayo Proctor modificado

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL			
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS			
ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO				
TESIS:	<i>ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018</i>			
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:		<u>1</u>
Código:	SCI-PM 01	Tipo de Muestra: Suelo Cohesivo Inalterado		
<u>RELACION DENSIDAD - HUMEDAD (PROCTOR MODIFICADO) ASTM D-1557</u>				
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD				
MUESTRA N°	1	2	3	4
PESO DEL TARRO (grs)	56.78	56.78	55.85	56.60
PESO DEL TARRO+MUESTRA HÚMEDA	157.76	157.67	156.89	157.09
PESO DEL TARRO+ MUESTRA SECA (grs)	149.70	148.00	145.35	144.20
PESO DEL AGUA (grs)	8.06	9.67	11.54	12.89
PESO DEL MATERIAL SECO (grs)	92.9	91.2	89.5	87.6
CONTENIDO DE HUMEDAD (grs)	8.67	10.60	12.89	14.71
% PROMEDIO	8.67	10.60	12.89	14.71
DETERMINACION DE LA DENSIDAD				
CONTENIDO DE HUMEDAD %	8.67	10.60	12.89	14.71
PESO DEL SUELO+MOLDE (grs)	10732	11012	11066	11019
PESO DEL MOLDE (grs)	6445	6445	6445	6445
PESO DEL SUELO (grs)	4287	4567	4621	4574
DENSIDAD HÚMEDA (grs/cm3)	1.969	2.098	2.123	2.101
DENSIDAD SECA (grs/cm3)	1.812	1.897	1.881	1.832
			Densidad Máxima (grs/cm3)	1.90
			Humedad Optima%	11.85

COMPACTACION



Anexo N°10: Guía de ensayo CBR.

UNT	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL		
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS		
ENSAYO DE RELACION SOPOTE (CBR)			
TESIS:	ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018		
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo:	1
Código:	SCI-CBR 01	Tipo de Muestra:	Suelo Cohesivo Inalterado

VALOR SOPORTE RELATIVO (C.B.R.) ASTM - D 1883

COMPACTACIÓN

Molde N°	04	05	06
N° de golpes por capa	12	25	56
CONDICIONES DE LA MUESTRA	6000	6000	6000
Peso del molde + suelo húmedo (grs)	8765	8895	9195
Peso del molde (gramos)	4325	4195	4260
Peso del suelo húmedo (grs.)	4440	4700	4935
Volumen del molde (cc)	2323	2323	2323
Densidad húmeda (grs./cm3)	1.91	2.02	2.12
Densidad seca (grs./cm3)	1.71	1.81	1.90
Tarro N°	10	12	16
Peso del tarro + suelo húmedo (grs.)	200.52	215.02	185.65
Peso del tarro + suelo seco (grs.)	183.20	197.85	171.25
Peso del agua (grs.)	17.32	17.17	14.40
Peso del tarro (grs.)	36.45	52.62	50.12
Peso del suelo seco (grs.)	146.75	145.23	121.13
% de humedad	11.80	11.82	11.89
PROMEDIO DE HUMEDAD			

EXPANSIÓN

FECHA	TIEMPO	LECTURA			EXPANSIÓN			LECTURA			EXPANSIÓN		
		DIAL	Mm.	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%	DIAL	mm	%
		320	0	0	145	0	0	410	0	0			
		320	0	0.00	168	23	0.50	431	21	0.46			
		359	39	0.85	182	37	0.81	445	35	0.77			
		369	49	1.07	192	47	1.03	453	43	0.93			
		570	250	5.47	305	160	3.50	457	47	1.03			

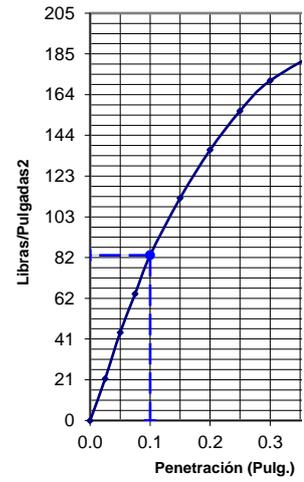
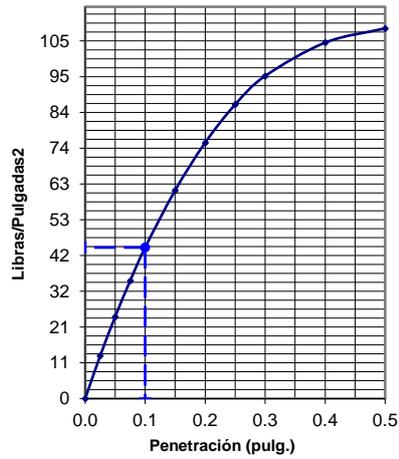
PENETRACIÓN

PENETRACIÓN	MOLDE N°01-N° de Golpes			MOLDE N°02-N° de Golpes			MOLDE N°03- N° de Golpes		
	LECTURA	CORRECCIÓN		LECTURA	CORRECCIÓN		LECTURA	CORRECCIÓN	
	DIAL	Libras.	Libras./pulg ²	DIAL	Libras.	Libras./pulg ²	DIAL	Libras.	Libras./pulg ²
0.000			0.00			0.00			0.00
0.025	13	38	13	24	63	21	37	97	32
0.050	27	72	24	52	133	44	75	190	63
0.075	40	104	35	75	191	64	112	282	94
0.100	52	133	44	99	249	83	145	363	121
0.150	72	183	61	134	336	112	199	497	166
0.200	89	225	75	163	408	136	247	616	205
0.250	103	259	86	187	467	156	286	711	237
0.300	113	284	95	206	513	171	315	783	261
0.400	125	313	104	226	563	188	352	874	291
0.50	130	326	109	235	586	195	365	907	302

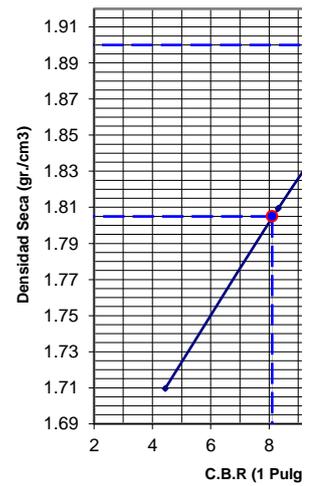
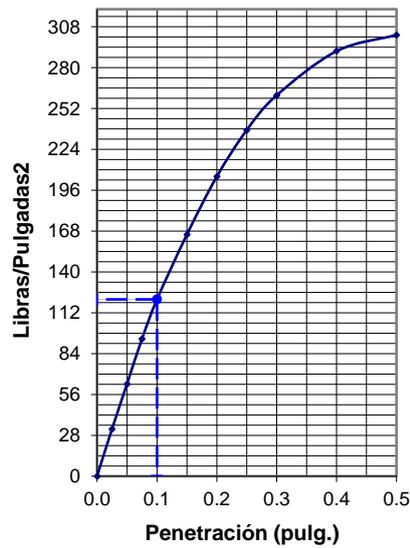
FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL	
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
ENSAYO DE RELACION SOPORTE CBR	
ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018	
Carlos Martin Carrillo	
Vega	N° de Ensayo: 1
-	
Suelo Cohesivo	
SCI-CBR 01	Tipo de Muestra: Inalterado

12 Golpes-C.B.R. 1":4.44%-&=1.71gr/cm3

25 Golpes-C.B.R. 1":8.31%-
&=1.81gr/cm3



56 Golpes-C.B.R. 1":12.1%- ρ =1.9gr/cm³



GOLPES	W. %	ρ .gr./cm ³	HINCH. %	COMP. %	CBR-1"	CBR-2"	C.B.R.	C.B.R.
12	11.80	1.71	5.47	90	4.44		95%	100%
25	11.82	1.81	3.50	95	8.31		8.31%	12.10
56	11.89	1.90	1.03	100	12.10			

Anexo N°11: Guía de ensayo compresión triaxial.

U.N.T	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL	
	LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS	
ENSAYO DE COMPRESION TRIAXIAL		
TESIS:	ESTUDIO DE LA INCLUSIÓN DE FIBRAS PET EN EL REFORZAMIENTO DE SUELOS COHESIVOS PARA TERRAPLENES DE OBRAS VIALES, LA LIBERTAD 2018	
TESISTA:	Carlos Martin Carrillo Vega	N° de Ensayo: <u>1</u>
Código:	SCI-ET 01	Tipo de Muestra: Suelo Cohesivo Inalterado

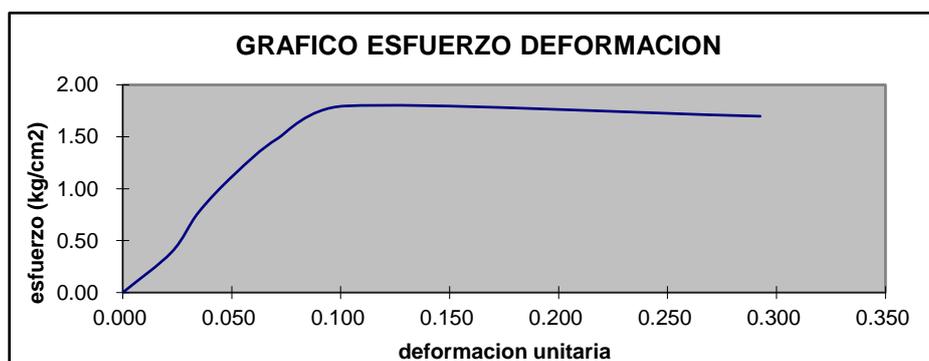
tara n°	1	2	3
peso de la tara	51.30	52.10	56.30
peso de la tara +Mh(gr)	120.70	127.60	117.20
peso de la tara +Ms(gr)	111.81	117.61	109.15
peso del agua(gr)	8.89	9.99	8.05
peso de los sólidos(gr)	60.51	65.51	52.85
w%	14.69	15.25	15.23
w% promedio	15.06		

ENSAYO TRIAXIAL 1

DATOS DE LA MUESTRA:

AREA INICIAL 12.5 cm².
 ALTURA INICIAL= 8 cm.
 ESFUERZO =0,5 kg/cm²

TIEMPO	carga (kg)	esf.(kg/cm ²)	def ver (cm)	area cor(cm ²)	def. unit (kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.0000	12.500	0.000
1.00	5.00	0.40	0.1800	12.788	0.023
2.00	10.00	0.80	0.2780	12.950	0.035
3.00	15.00	1.20	0.4100	13.175	0.051
4.00	20.00	1.60	0.5700	13.459	0.071
5.00	25.00	2.00	0.8150	13.918	0.102
6.00	30.00	2.40	2.3400	17.668	0.293

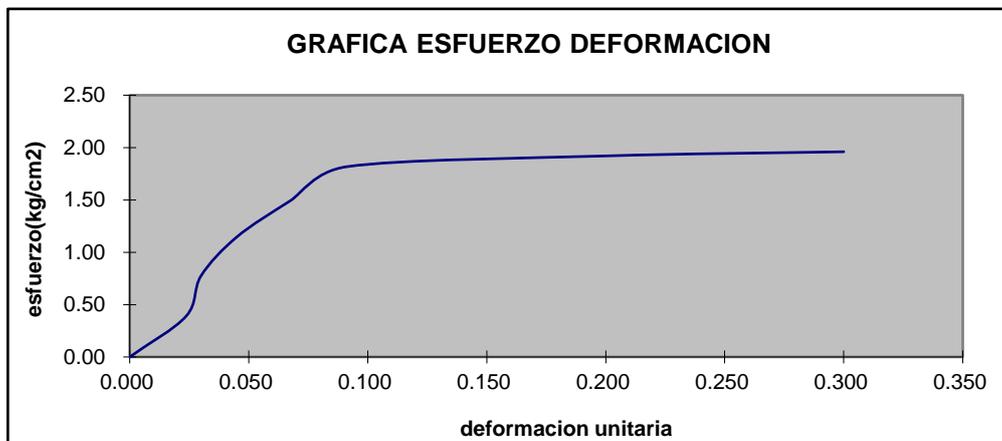


ENSAYO TRIAXIAL 2

DATOS DE LA MUESTRA:

AREA INICIAL 12.5 cm².
 ALTURA INICIAL= 8 cm.
 ESFUERZO =1,00 kg/cm²

TIEMPO	carga (kg)	esfuerzo(kg/cm ²)	def vertical (cm)	area corregida(cm ²)	def. unitaria (kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.0000	12.500	0.000
1.00	5.00	0.40	0.1900	12.804	0.024
2.00	10.00	0.80	0.2400	12.887	0.030
3.00	15.00	1.20	0.3600	13.089	0.045
4.00	20.00	1.60	0.5400	13.405	0.068
5.00	25.00	2.00	0.7300	13.755	0.091
6.00	30.00	2.40	1.6000	15.625	0.200
7.00	35.00	2.80	2.4000	17.857	0.300



ENSAYO TRIAXIAL 3

DATOS DE LA MUESTRA:

AREA INICIAL 12.5 cm².
cm.

ALTURA INICIAL= 8

TIEMPO	carga (kg)	esfuerzo(kg/cm ²)	def vertical (cm)	area corregida(cm ²)	def. unitaria (kg/cm ²)	
0.00	0.00	0.00	0.0000	12.500	0.000	0.00
1.00	5.00	0.40	0.2100	12.837	0.026	0.39
2.00	10.00	0.80	0.3250	13.029	0.041	0.77
3.00	15.00	1.20	0.4460	13.238	0.056	1.13
4.00	20.00	1.60	0.5600	13.441	0.070	1.49
5.00	25.00	2.00	0.6700	13.643	0.084	1.83
6.00	30.00	2.40	0.9480	14.180	0.119	2.12
7.00	35.00	2.80	1.5200	15.432	0.190	2.27
8.00	40.00	3.20	3.4600	22.026	0.433	1.82

