UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso de alta plasticidad del Caserío Bello Horizonte, distrito de Curimaná, departamento de Ucayali, adicionando pet reciclado

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Alvarez Cabrera, Anthony Robert Jingary (0000-0002-3856-6574)

Sosa Gonzales, Jose Antonio (0000-0002-7658-5215)

ASESOR

Pacheco Miranda, Lidia (0000-0002-5524-5182)

Lima, 29 de setiembre del 2020

DEDICATORIA

A mis padres, Ines Cabrera Ramírez y Jingary Alvarez Espósito por su apoyo incondicional desde que decidí estudiar esta hermosa carrera.

- *Anthony Alvarez Cabrera*

A quienes me brindaron su apoyo en todo momento, me enseñaron los valores y las cosas importantes de la vida. Irma Gonzales y Dagoberto Sosa, con la bendición de Dios este proyecto de Tesis va para ustedes.

- *Jose Antonio Sosa Gonzales*

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por ser los pilares de nuestras metas, por la confianza brindada para con nosotros y siempre brindarnos las palabras de aliento necesarias y oportunas para seguir adelante.

A nuestros maestros de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, por guiarnos con sus conocimientos en los años compartidos en nuestra vida universitaria. Asimismo, agradecer de manera especial a los asesores de Tesis y Paper, sin la guía oportuna de ellos no habiéramos culminado de manera satisfactoria esta investigación.

Anthony Alvarez Cabrera

Jose Sosa Gonzales

RESUMEN

Ante la problemática que presentan los suelos arcillosos de alta plasticidad, como la vulnerabilidad a variaciones de volumen, produciendo asentamientos diferenciales ocasionando daños en las estructuras, es por factores como este que se decidió buscar una alternativa de mejora para sus parámetros como el incremento de la resistencia, ángulo de fricción y cohesión de un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH). En la ejecución de una obra civil, estos parámetros generalmente no se ajustan a los requerimientos del proyecto, por tal razón se debe buscar una solución para la estabilidad del suelo implicado en cualquier construcción. La constante búsqueda del mejoramiento de las condiciones ambientales ha llevado a la utilización de los residuos del plástico para reforzar el suelo y mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. Es por ello que de acuerdo con nuestra propuesta se intenta incrementar data para el uso de este material alternativo como propuesta de mejoramiento del suelo, obteniéndose resultados interesantes y distintos a lo hallado en otras investigaciones que utilizaron similares materiales. Se optó por la trituración del tereftalato de polietileno (PET) obteniendo un PET reciclado de 3-5 mm de longitud como material de refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas del suelo. De acuerdo con los ensayos de proctor estándar y corte directo, se determinó que el porcentaje óptimo de adición sea de 1% debido a que se observó un mejor comportamiento del material de estudio con respecto a las otras mezclas analizadas con 0.5%, 2.5% y 3.5%.

Palabras clave: Suelo arcilloso; fibras PET reciclado; cohesión; ángulo de fricción interna; resistencia

ABSTRACT

To the problems posed by clay soils of high plasticity, such as vulnerability to variations in volume, producing differential settlements causing damage to structures, it is due to factors such as this it was decided to seek an alternative enhancement to parameters such as increased resistance, friction angle and cohesion of a high plasticity clay soil (CH). In the execution of civil works, these parameters generally do not conform to the requirements of the project, for that reason should seek a solution for the stability of the soil involved in any construction. The constant search for improving environmental conditions has led to the use of waste plastic to reinforce the soil and improve its mechanical and physical properties. That is why according to our proposal we try to increase data for the use of this alternative material as a soil improvement proposal, obtaining interesting and different results to that found in other investigations that used similar materials. We chose crushing polyethylene terephthalate (PET) obtaining a recycled PET 3-5 mm length as a reinforcing material to stabilize and improve the mechanical properties of the soil. According to the standard proctor and direct shear tests, it was determined that the optimal percentage of addition is 1% because a better behavior of the study material was observed with respect to the other mixtures analyzed with 0.5%, 2.5% and 3.5%.

Keywords: Clay soil; recycled PET fibers; cohesion; internal friction angle; resistance

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	MARCO TEÓRICO.....	6
2.1	TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS COMPACTADOS	6
2.1.1	Estabilización química	7
2.1.2	Reforzamiento de suelos con geosintéticos	7
2.1.3	Reforzamiento de suelos con adición de fibras	7
2.2	COMPACTACIÓN DE SUELOS	8
2.2.1	Factores que afectan a la compactación de suelos	8
2.2.2	Ensayo de Proctor Estándar ASTM D 698	9
2.3	RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO	9
2.3.1	Suelos reforzados con fibras: Estado del arte y aplicaciones	12
2.3.2	Resistencia de suelo arcilloso estabilizado con cal y la adición de fibras .	14
2.4	POLIETILENO DE TEREFALATO (PET)	15
2.5	INTERACCIÓN SUELO – FIBRAS POLIMÉRICAS.....	16
3	METODOLOGÍA.....	18
3.1	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	19
3.1.1	Granulometría por tamizado (ASTM D 6913)	20
3.1.2	Granulometría por sedimentación (ASTM D 422).....	20
3.1.3	Límite líquido (ASTM D 4318).....	20
3.1.4	Límite plástico (ASTM D 4318).....	21
3.1.5	Gravedad específica (ASTM D 854).....	21
3.2	COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR (ASTM D 698).....	21
3.3	CORTE DIRECTO (ASTM D 3080)	22
4	DESARROLLO DE ENSAYOS.....	26
4.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ARCILLOSOS.....	26
4.1.1	Granulometría por tamizado(ASTM D 6913) y por hidrometría(ASTM D 422)	26
4.1.2	Límites de Atterberg	28
4.1.3	Gravedad específica (ASTM D 854).....	30
4.2	GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO DEL PET	30

4.3	COMPACTACIÓN PROCTOR ESTÁNDAR (ASTM D 698)	31
4.4	CORTE DIRECTO (ASTM D 3080)	37
4.5	VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE SEGÚN EL CRITERIO DE MOHR COULOMB	38
4.6	CAPACIDAD DE CARGA ÚLTIMA Y ADMISIBLE DEL SUELO NATURAL Y REFORZADO CON PET	38
4.7	RESUMEN DE ENSAYOS FÍSICOS	39
4.8	RESUMEN DE ENSAYOS MECÁNICOS	40
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
6	CONCLUSIONES	48
7	RECOMENDACIONES	49
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
9	ANEXOS	52
	ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR HIDROMETRÍA DEL SUELO	52
	ENSAYO DE GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO DEL PET	53
	ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO	54
	ENSAYO DE LÍMITE PLÁSTICO	54
	ENSAYO DE COMPACTACIÓN DE PROCTOR ESTÁNDAR	56
	ENSAYO DE CORTE DIRECTO	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos recolectados y calculados en laboratorio.....	27
Tabla 2: Componentes del suelo al realizar el ensayo de granulometría tanto por tamizado e hidrómetro	28
Tabla 3. <i>Resultados de los ensayos de Límite plástico y Límite líquido</i>	28
Tabla 4: Resultados de los límites de Atterberg	29
Tabla 5: Datos de gravedad específica	30
Tabla 6. Datos ensayo Proctor estándar	31
Tabla 7: Valores para la realización de la curva de compactación S100+0%PET.....	32
Tabla 8. Valores para la realización de la curva de compactación S100+0.5%PET.....	33
Tabla 9. Valores para la realización de la curva de compactación S100+1.0%PET.....	34
Tabla 10. Valores para la realización de la curva de compactación S100+2.5%PET.....	35
Tabla 11. Valores para la realización de la curva de compactación S100+3.5%PET.....	36
Tabla 12. Resultados ensayo Proctor Estándar.....	37
Tabla 13. Valores obtenidos de los ensayos de Corte Directo	37
Tabla 14. Verificación según criterio de resistencia al corte de Mohr Coulomb	38
Tabla 15: Factores de carga, forma, profundidad e inclinación según Meyerhof	39
Tabla 16: Resultados de Capacidad de Carga Última y Capacidad de Carga Admisible ...	39
Tabla 17. Cuadro resumen de ensayos físicos realizados.....	40
Tabla 18. Cuadro resumen de ensayos mecánicos realizados - Proctor Estándar	40
Tabla 19. <i>Cuadro resumen de ensayos mecánicos realizados-Corte directo</i>	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Métodos de Tratamiento del Suelo en función al Tamaño de Grano.....	6
Figura 2. Curvas esfuerzo corte- desplazamiento en un ensayo de corte directo.	11
Figura 3. La presión de poros en suelo saturado y no saturado.....	11
Figura 4. Diagrama de un arreglo de prueba de Corte Directo.....	12
Figura 5. Fibras de polipropileno.	13
Figura 6. Fibras de palmera.	13
<i>Figura 7. SEM: a) Después de compactación, b) Después de prueba de extracción</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8. Esquema del comportamiento mecánico en la interfaz entre la superficie de la fibra y la matriz del suelo.....</i>	<i>17</i>
Figura 9. Se elaboró un resumen de la metodología experimental de investigación.....	20
Figura 10. Curva de compactación	22
<i>Figura 11. Metodología del ensayo de corte</i>	<i>25</i>
Figura 12. Material extraído en campo.....	26
Figura 13. Curva Granulométrica completada por hidrometría del suelo arcilloso natural.	27
Figura 14. Limite líquido (N° de golpes vs Contenido de humedad).....	29
Figura 15. Carta de Casagrande para clasificar el tipo de suelo.....	29
Figura 16. Curva granulométrica del PET	31
<i>Figura 17. Curva de compactación del suelo natural</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18. Curva de compactación del S100+0.5%PET</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19. Curva de compactación del suelo S100+1.0%PET</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20. Curva de compactación del suelo S100+2.5%PET</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21. Curva de compactación del suelo S100+3.5%PET</i>	<i>36</i>
Figura 22. <i>Variaciones de humedad de los ensayos de Proctor Estándar</i>	<i>41</i>
Figura 23. Variaciones de la máxima densidad seca de los ensayos de Proctor Estándar ..	42
Figura 24. Parámetros de intercepto cohesivo de cada mezcla en cada instante de desplazamiento horizontal	43
Figura 25. Parámetros de intercepto cohesivo de cada mezcla en cada instante de desplazamiento horizontal	44

Figura 26. Desplazamiento horizontal vs Variación de la deformación vertical del S100+0%PET para cada esfuerzo de confinamiento aplicado en el tiempo	45
Figura 27. Desplazamiento horizontal vs Variación de la deformación vertical del S100+1.0%PET para cada esfuerzo de confinamiento aplicado en el tiempo	46
Figura 28. Resultados de Capacidad de carga admisible.....	47
Figura 29. Granulometría de la muestra por hidrometría.	52
Figura 30. Muestra de PET vertido en las mallas.....	53
Figura 31. Tamizado de la muestra del PET manualmente	53
Figura 32. Colocación de material en bandejas para posterior pesaje.....	53
Figura 33. Colocación de la muestra en la cuchara de Casagrande.....	54
Figura 34. Golpeteo de la muestra.....	54
Figura 35. Elaboración de los rollos	54
Figura 36. Vertimiento de agua y arcilla al picnómetro	55
Figura 37. Eliminación de burbujas de aire	55
Figura 38. Picnómetro sin burbujas de aire	56
Figura 39. Tamizado de la muestra para ensayo de Proctor Estándar	56
Figura 40. Compactación de la primera capa del ensayo de Proctor Estándar.....	57
Figura 41. Enrasado de la muestra.....	57
Figura 42. Evidencia del suelo ensayado luego de la compactación de Proctor estándar ...	58
Figura 43. Curva de compactación del suelo natural (S100+0%PET).....	59
Figura 44. Curva de compactación del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET)	60
Figura 45. Curva de compactación del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET)	61
Figura 46. Curva de compactación del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET)	62
Figura 47. Curva de compactación del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET)	63
Figura 48. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural (S100+0%PET)	64
Figura 49. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural (S100+0%PET).....	65
Figura 50. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET).....	66
Figura 51. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET).....	67
Figura 52. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET).....	68

Figura 53. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET).....	69
Figura 54. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET).....	70
Figura 55. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET).....	71
Figura 56. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET).....	72
Figura 57. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET).....	73

1 INTRODUCCIÓN

Realidad Problemática

Las obras de protección contra la acción de ríos han convertido al diseño y construcción de terraplenes compactados en una problemática de primer orden en el ámbito ingenieril; tanto de manera económica, como por las secuelas producto de su falla (De Matteis, 2003). Por tal motivo es importante estudiar sus parámetros, Ángulo de fricción, cohesión y resistencia al corte, siendo este último la de mayor importancia en el análisis de estabilidad. Sin embargo, debido a las mismas componentes del suelo en muchas ocasiones es necesario efectuar método de mejoramiento, ya sean químicos o físicos, con fin de mejorar sus propiedades mecánicas y de esta manera garantizar la estabilidad de las estructuras.

Los suelos arcillosos de comportamiento expansivo no cumplen generalmente con los requerimientos geotécnicos para garantizar la estabilidad de las estructuras, tales como terraplenes o taludes viales, lo cual se presenta a la baja resistencia al corte, y sus cambios volumétricos (altas deformaciones) e índice de plasticidad. Para lograr dar uso a esta naturaleza de suelos es preciso manejar procesos de reforzamiento o de último recurso la sustitución completa o parcial del material, lo cual genera sobreexplotaciones de bienes y grandes inversiones económicas.

Por otro lado, en la actualidad es complejo relegar el uso de los plásticos, no únicamente por su ventaja sino también por la trascendencia económica que estos tienen. Su uso en la industria se ve reflejado en los índices de ascenso de este medio que a inicios del siglo pasado este supera de gran manera la mayoría de las actividades industriales. Se generan 2 800 millones de envases de plástico PET al año en el Perú (aproximadamente 50 mil toneladas), de los cuales, menos del 15% del total están dirigidos al reciclaje, información recopilada de la ONG Ciudad Saludable (2016). Únicamente para la localidad de Ucayali se obtiene por lo menos 36.5 toneladas de residuos plásticos PET cada semana reciclándose menos del 7.28%, datos obtenidos del Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos (2015).

Por lo tanto, debido a la coyuntura nacional, se vuelve necesario investigar nuevos modos de reciclaje y reutilización de plásticos PET, siendo la transformación de fibras poliméricas uno de los métodos más usados; las cuales tienen un agudo valor de aplicación como material

de refuerzo para los suelos compactados que se utiliza en proyectos viales, canales de agua, terraplenes, etc. La añadidura de fibras poliméricas a estos suelos viene siendo estudiados y aplicados en países como Irán, India, México y Estados Unidos, obteniendo resultados positivos en la mejora de las propiedades mecánicas y estabilidad de este tipo de suelos, que de acuerdo con su bajo rendimiento hace poco tolerable su manejo en las diferentes obras civiles (Vettorelo, P. & Clariá, J., 2014). Asimismo, en Latinoamérica, así como en el Perú, el reforzamiento de suelos con añadidura de PET, en investigación y función, es aún un campo en desarrollo.

Por tal razón, la reciente investigación busca establecer la importancia de la adición de fibras de PET referente a la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de suelos arcillosos de comportamiento expansivo, esto mediante la tesis experimental ensayando en laboratorio las muestras tanto del suelo natural como con los diferentes porcentajes de añadido de PET triturado. De este modo se aporta con el estudio de un manejo alternativa para fortificar los suelos compactados cuando se presenta un suelo arcilloso, de tal manera se espera presentar una opción de uso sustentable para los residuos PET, reduciendo el impacto ambiental que este genera.

Estado del arte

- En un estudio realizado por Mirzababaei (2017) se sabe que en Australia se realizó un estudio con fin de determinar el comportamiento del suelo arcilloso reforzado con PET, para lo cual se hizo uso de muestras de suelo arcilloso plástico según la clasificación SUCS, con una gravedad específica de 2.71 y según ensayo granulométrico esta muestra contiene un 93% de partículas de arcilla con un límite líquido y plástico de 74% y 27% respectivamente. Para poder determinar el óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca se realizó un ensayo de proctor modificado. Por otro lado, las muestras del PET que se utilizaron tenían dimensiones de 20 mm de largo y un espesor de 35um, con una gravedad específica 0.91. La primera etapa del programa de prueba se llevó a cabo en muestras de suelo consolidado con esfuerzo efectivo normal de 600 kPa y descargadas a 50 kPa, seguidas de 4 ciclos de corte a tensiones efectivas normales de 50, 100 y 200 kPa, respectivamente. Los resultados de estas pruebas confirmaron la mejora significativa de la relación de esfuerzo efectivo con el refuerzo de PET, incluso en un gran desplazamiento de corte al cuarto ciclo. Sin embargo, la tasa de mejora disminuyó con el esfuerzo efectivo normal y la relación de vacíos iniciales. Según los experimentos llevados a cabo en este estudio, se encontró que el contenido óptimo

de PET para aumentar la resistencia al corte del suelo arcilloso con una relación de vacíos inicial de 0.64 fue de 0.25% con un aumento del 140%, 81% y 23% en la relación esfuerzo sobre el suelo no reforzado a esfuerzos efectivos normales de 50, 100 y 200 kPa, respectivamente. La segunda etapa del programa de prueba se llevó a cabo en un conjunto de muestras consolidadas y esfuerzos cortantes efectivos normales de 50, 100 y 200 kPa, respectivamente. Se encontró que el contenido óptimo de PET estaba relacionado solo con la relación de vacíos inicial del suelo, independientemente de la historia de esfuerzo del suelo y el esfuerzo efectivo normal aplicado. Se encontró que la relación de esfuerzo cortante de los suelos arcillosos reforzados con PET en el desplazamiento de corte grande es relativamente independiente de la historia de esfuerzo del suelo. Para todas las muestras de suelo analizadas en este estudio, se encontró que la relación de esfuerzo a 200 kPa de esfuerzo efectivo normal se mantuvo entre 0,45 y 0,60.

- Según Soltani (2016) ratifica que en la República de Azerbaiyán se realizó un estudio experimental para investigar la compresibilidad y el comportamiento al corte sin drenaje del suelo arcilloso mezclado con residuos plásticos. Se realizaron ensayos de compactación, triaxial en condiciones consolidada y no drenada (CU) y un ensayo de edometría a uniaxial, en las mezclas de residuos de arcilla-plástico para determinar su esfuerzo-deformación, poro-presión de agua y comportamiento en compresión. Las muestras fueron extraídas de la provincia Azerbaiyán, este suelo tiene un límite líquido y plástico de 33% y 17% respectivamente, y gravedad específica de 2.77. Según la clasificación SUCS, este categorizado como CL. Por otro lado, el PET utilizado son de botellas recicladas, que tienen una gravedad específica de 1.36 a 1.45, con dimensiones de 8mm de largo y 4mm de ancho. El suelo arcilloso se mezcló con diversas cantidades de residuos plásticos (es decir, 0.5, 0.7, 1.0 y 1.5% en peso seco) y se realizó una prueba ensayos de compactación, triaxial en condiciones consolidada y no drenada (CU) y un ensayo de edometría a uniaxial en las mezclas para estudiar los efectos de Residuos plásticos, flexibilidad plástica, presión de confinamiento y densidad inicial en el comportamiento del suelo arcilloso. De acuerdo con los resultados, los desechos plásticos no afectan considerablemente las características de compactación del suelo arcilloso. La adición de desechos plásticos que exceden un valor específico (es decir, 1.0% en esta investigación) cambia el comportamiento no drenado de las muestras de contractivo a dilatativo. La adición de PET reciclado más allá del 1.0% mejora la resistencia al corte y reduce la compresibilidad de la arcilla. El aumento en la resistencia al corte y la disminución de la compresibilidad dependen de la presión de

confinamiento, la flexibilidad del PET y la densidad inicial de las muestras. La tasa de aumento o disminución es más notoria cuando la rigidez del PET, la densidad inicial y las presiones de confinamiento son relativamente altas. Además, el PET tiene efectos negativos sobre expansión, la presión de expansión y el índice de expansión de las muestras; tales parámetros son, por lo tanto, más altos en las arcillas reforzadas con PET, que los valores asociados de arcilla sin refuerzo.

- De acuerdo con Changizi (2015) se sabe que, en Irán se investiga el efecto de la fibra de poliéster reciclada, producida a partir de botellas de polietileno (PET), en combinación con nano-SiO₂ como un nuevo estabilizador para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos. Pretendemos estudiar el efecto de agregar nano-SiO₂ y fibra de poliéster reciclada en las propiedades del suelo con fines ingenieriles, especialmente la resistencia al corte y la resistencia a la compresión no confinada (UCS), utilizando suelos arcillosos con un límite de líquido bajo. Se utilizan tres combinaciones diferentes de relaciones fibra-suelo que oscilan entre el 0,1% y el 0,5%, así como tres combinaciones diferentes de proporciones de nano-suelo que varían entre el 0,5% y el 1%. La resistencia al corte y la UCS de las muestras tratadas se obtienen de la prueba de corte directo y la prueba de compresión no confinada, respectivamente. Los resultados de este estudio muestran que la adición de fibra de poliéster reciclada y nano-SiO₂ aumenta la resistencia de las muestras de suelo hasta en un 190%. Tanto la resistencia al corte como el UCS se mejoran al aumentar el contenido de fibra de poliéster reciclado y nano-SiO₂ en la mezcla del suelo. El aumento en el contenido de nano-SiO₂ conduce a una reducción en la tensión de falla, pero el aumento en el contenido de fibra de poliéster reciclado conduce a un aumento en la tensión de falla. El aumento en el contenido de fibra de poliéster reciclado y nano-SiO₂ conduce a un aumento en el módulo elástico de los suelos. Sobre la base de los resultados de las pruebas, la adición de fibra de poliéster reciclada mejora las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados con nano-SiO₂, y la fibra de poliéster reciclada tiene un efecto positivo en los comportamientos del suelo.

Formulación del problema

¿Cómo influye la adición de PET reciclado sobre el suelo arcilloso a estudiar extraído del caserío de Bello Horizonte, distrito de Curimaná, Departamento de Ucayali?

Hipótesis

El uso del tereftalato de polietileno (PET) como material de refuerzo podría mejorar las propiedades mecánicas (resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna) sobre los suelos arcillosos del caserío de Bello Horizonte, distrito de Curimaná, Departamento de Ucayali

Objetivo General

Determinar la influencia de la adición de fibras de PET sobre las propiedades mecánicas del suelo arcilloso extraído del caserío de Bello Horizonte, distrito de Curimaná, Departamento de Ucayali.

Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar físicamente el suelo arcilloso, proveniente de Curimaná, y el tereftalato de polietileno (PET).
- ✓ Obtener las curvas de compactación mediante el ensayo de Proctor estándar tanto del suelo arcilloso, así como de las mezclas Arcilla – PET para determinar la densidad seca máxima y humedad óptima.
- ✓ Caracterizar mecánicamente el comportamiento del suelo arcilloso y las mezclas Arcilla – PET realizadas mediante el ensayo de Corte Directo.
- ✓ Determinar el porcentaje óptimo de PET a adicionar en el suelo arcilloso para obtener la mezcla que presente el mejor comportamiento mecánico.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Técnicas de mejoramiento de suelos compactados

Las técnicas de mejoras de los suelos residen en transformar las características de una superficie por una función física o por la mezcla del suelo con un material infatigable, con el desenlace de:

- Aumentar la magnitud y/o la resistencia al corte.
- Reducir asentamientos, absolutos como diferenciales, y acelerarlos cuando sucedan.
- Disminuir o mitigar el peligro de licuefacción.
- Mejorar las propiedades del suelo: resistencia mecánica, estabilidad volumétrica, durabilidad, permeabilidad y compresión.

Figura 1. Métodos de Tratamiento del Suelo en función al Tamaño de Grano. Adaptado de Villalaz, 2004

El uso para los diferentes procesos radica en la naturaleza y la granulometría del suelo que se espera mejorar (Figura 1), siendo el reforzamiento y la transición los métodos más utilizados en terrenos arcillosos. Por lo que, se desarrollan de manera concisa estos procedimientos:

2.1.1 Estabilización química

Hace mención en su mayoría a la utilización de algunas sustancias químicas patentadas cuya práctica incluye el cambio de iones metálicos y sustitución en la naturaleza de los suelos envueltos en el proceso.

- Cal: reduce la plasticidad de los suelos arcillosos siendo esta muy económica.
- Cemento Portland: mejora la resistencia de los suelos y es aplicado en su mayoría en arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: emulsión usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio y Cloruro de Calcio: impermeabilizan y reducen los polvos en el suelo, en especial para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición y Polímeros: es aplicado en carpetas asfálticas para aportar mayor impermeabilidad, resistencia y aumentar la vida útil.

2.1.2 Reforzamiento de suelos con geosintéticos

Se encuentra una extensa diversidad de productos geosintéticos que se comercializan de acuerdo con los nombres registrados en forma de geotextiles, geomembranas, mallas abiertas o geomallas. Para la fabricación se aplican en su mayoría polímeros plásticos; siendo el polipropileno, el poliéster, el polietileno y la poliamida los más utilizados. Cuando alguno de estos polímeros se añade en la composición del suelo, aportan mejora en cuanto a: Refuerzo, Separación, Filtración y/o Drenaje. Asimismo, es posible aplicar este método en suelos cohesivos y granulares, ya que en la actualidad esta técnica viene siendo la más usada en la estabilización de taludes de terraplén.

Las consideraciones previas para la selección de un geotextil son: la resistencia a la abrasión y al impacto, la permeabilidad y la proporción del tamaño de los poros cuando se aplique en filtros y la resistencia al ataque químico cuando se encuentre en contacto con productos peligrosos. Por otro lado, uno de los factores que es de mucha importancia es que el geotextil a utilizar pueda tolerar la degradación ambiental y meteorización a largo plazo producidas por el intemperismo.

2.1.3 Reforzamiento de suelos con adición de fibras

La expresión suelo reforzado hace referencia a que este eleva su resistencia al corte, mezclándola con elementos para optimizar sus propiedades. Esta técnica busca incrementar

la estabilidad y resistencia a la tracción o corte, y aminorar los asentamientos del suelo reforzado. Convencionalmente se utilizan barras, tiras de metal, mallas, hojas o fibras para reforzar el suelo, estos materiales son distribuidos de manera aleatoria en la composición del suelo. En la actualidad, el refuerzo de suelo con adición de fibras es una práctica en mejora, que se aplica de manera constante en la estabilidad de taludes viales de corte o terraplenes. Este sistema denominado Tierra Reforzada fue patentado por Vidal en 1969.

2.2 Compactación de suelos

La compactación de los suelos es la densificación de estos de manera mecánica. Se espera mejorar la resistencia y estabilidad volumétrica, afectando la permeabilidad, como consecuencia del proceso de densificación de la masa.

El método de Proctor se basa en compactar el suelo dentro de un molde de metal y cilíndrico, en varias capas por la caída de un pistón. Existen dos métodos de Proctor.

Proctor estándar o normal, con pistón de 5 ½ lbs, $h = 12''$, $N = 25$ golpes y 3 capas a compactar. El molde de $\phi = 4''$ y volumen $1/30 \text{ ft}^3$.

Proctor modificado, con pistón de 10 lbs, $h = 18''$, $N = 25$ golpes, y compactando en 5 capas, con el mismo molde.

2.2.1 Factores que afectan a la compactación de suelos

El contenido de humedad es un factor que influye de gran manera para la compactación. Por otro lado, otros factores influyentes son el tipo de suelo y el esfuerzo de compactación. Se encontraron dos factores:

Efecto del tipo de suelo

La distribución de tamaño de grano, forma con los granos del suelo el peso específico de sólidos del suelo, la cantidad y tipo de minerales de arcilla presentes tiene una gran influencia en la unidad de peso seco máxima y el contenido de humedad óptimo. Se sabe que Lee y Suedkamp (1972) estudiaron las curvas de compactación de 35 muestra de suelos diferentes, estos suelos con límite líquido mayor que 70 pueden exhibir curvas de compactación de suelos tipos C o D, estos tipos de suelos no son muy comunes.

Efectos del esfuerzo de compactación

La energía de compactación por unidad de volumen(E), usada en el ensayo de Proctor estándar, puede describirse como:

$$E = \frac{(\text{Números de golpes por capa}) \times (\text{Número de capas}) \times (\text{Peso del martillo}) \times (\text{Altura de caída del martillo})}{\text{Volumen del molde}}$$

Ecuación 1. Energía de compactación por unidad de volumen. Adaptado de “Fundamentos de la ingeniería geotécnica”, Braja M. Das, 2013

Si se modifica el esfuerzo de compactación por unidad de volumen de suelo, la curva de peso unitario húmeda también va a variar. La energía de compactación utilizada por unidad de volumen de suelo para la curva de peso unitario húmeda se puede calcular con la ecuación mostrada líneas arriba, ante esto se concluye que:

- ✓ Al aumentar el esfuerzo de compactación, el peso unitario seco máximo de compactación aumenta de manera proporcional.
- ✓ Al aumentar el esfuerzo de compactación, el contenido óptimo de humedad se reduce.

2.2.2 Ensayo de Proctor Estándar ASTM D 698

El suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de 943.3 cm³, el diámetro de este molde es de 101.6 mm. Durante el ensayo el molde se adhiere a una placa de base en la parte inferior y a una extensión en la parte superior. Esto hace referencia a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que fue compactado por un procedimiento para los diferentes contenidos de humedad.

El objetivo de este ensayo es determinar el peso volumétrico seco máximo (γ_d máx.) que puede alcanzar un material, así como la humedad optima ($W_{opt.}$) a que deberá hacerse la compactación.

2.3 Resistencia al corte del suelo

La resistencia al corte de un suelo es la adición de su cohesión o intercepto cohesivo y de su fricción en el plano de rotura. Siendo así la fricción el producto de la tensión normal (perpendicular al esfuerzo cortante) a dicho plano por la tangente del ángulo de fricción interno del material. Por otro lado, Coulomb propuso una teoría para explicar la presión de tierras sobre un muro, publicada en 1776, que enfoca el problema de empujes sobre muros considerando que los mismos se pueden asimilar a unas cuñas de falla.

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

Ecuación 2. Resistencia al corte del suelo. Adaptado de “Fundamentos de ingeniería geotécnica”, Braja M. Das, 2013

Según Suarez (2009) se sabe que, para la realización del ensayo de corte directo se debe tener conocimiento de los parámetros a hallar:

Ángulo de fricción: este representa el coeficiente de rozamiento, el cual depende los siguientes factores,

- Tipo de mineral que conforman las partículas.
- Tamaño de los granos o partículas. A mayor tamaño de partículas, mayor es ϕ .
- Forma de los granos o partículas. ϕ es mayor para partículas angulosas.
- Distribución de los tamaños de granos o partículas. En los suelos bien gradados, ϕ es mayor que en los suelos uniformes.
- Fábrica o microestructura (organización de las partículas).
- Densidad.
- Permeabilidad (Facilidad de drenaje).
- Presión normal o de confinamiento.
- Presión de pre-consolidación.

Cohesión: Es la representación de la resistencia al cortante que ocurre por la cementación entre las partículas, mientras que, en la física, esta denominación se usa para representar la resistencia a la tensión.

Resistencia máxima o pico: Es la máxima resistencia al corte que posee el material, el cual no ha sido fallado previamente y corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo – deformación.

Resistencia residual: Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla.

Figura 2. Curvas esfuerzo corte- desplazamiento en un ensayo de corte directo. Adaptado por Duncan y Wright, 2005

Presión de poros: consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo y se identifica con la letra “ μ ”. La presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre las partículas, trata de separarlas y disminuye la resistencia a la fricción (Figura 3).

La tensión de agua en los poros intenta unir las partículas
a) No saturado

La presión de agua produce que las partículas se traten de separar
b) Saturado

Figura 3. La presión de poros en suelo saturado y no saturado. Adaptación de “Capítulo 3: Resistencia al Cortante”, de Deslizamientos: Análisis Geotécnicos, Jaime Juárez, 2013

Ensayo de corte directo: Es el ensayo más común para obtener la resistencia de los suelos en los estudios de deslizamientos. De acuerdo con los resultados de este, se obtienen los valores de la resistencia máxima y residual. Se elaboran distintos ensayos del mismo tipo de suelo variando las presiones normales con el fin de obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción de manera gráfica. Lo recomendable es realizar por lo menos cinco pruebas para cada muestra. En la figura 4 se muestran los detalles de la caja de ensayo.

Figura 4. Diagrama de un arreglo de prueba de Corte Directo. Adaptado de “Fundamentos de la ingeniería geotécnica”, Braja M. Das, 2015

2.3.1 Suelos reforzados con fibras: Estado del arte y aplicaciones

En los últimos años, el hombre desarrolló diversos métodos para la mejora de los suelos por medio de las adiciones de materiales de refuerzo, el fin de estos materiales es tanto incrementar la estabilidad como la capacidad de carga y también aminorar los asentamientos del suelo reforzado.

Para esta investigación se presentan los tipos de fibra:

- Fibras sintéticas:

Las publicaciones existentes sobre el reforzamiento de suelos arcillosos mencionan que el contenido de fibras a utilizar varía entre el 0.25% y el 3% respecto al peso de suelo seco. También señalan que las longitudes de fibra más usados varían entre los 10 mm y los 60 mm, los cuales se encuentran directamente relacionado al tamaño de los granos del suelo en cuestión.

Se sabe que “las fibras más frecuentemente utilizadas son las de polipropileno (Consoli et al., 1998; Ibraim y Fourmont, 2006; Zhang et al., 2006; Tang et al., 2007; Jadhao y Nagarnaik, 2008). También se utilizan fibras de monofilamento de poliamida (Michalowski y Cermak, 2003) y alcohol de polivinilo (Park, 2009)”. La figura 5 presenta fibras de polipropileno usadas en el estudio realizado por Tang et al. (2007).

Figura 5. Fibras de polipropileno. Adaptado de “Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones”, Vittorelo & Clariá, 2014

- Fibras naturales:

El refuerzo de suelos mediante fibras naturales constituye una técnica de mejoramiento de suelos ecológicamente amigable y de muy bajo costo.

Cabe mencionar que según Vettorelo y Clariá (2014) que existen diversos ejemplos del uso de estas adiciones como en las investigaciones de:

Prabakar & Sridharb (2002) donde se emplearon fibras de sisal, Sivakumar Babu y Vasudevan (2008) quienes emplearon fibras de coco, Marandi et al. (2008) que utilizaron fibras de palmera (ver Fig. 6), y Khattak y Alrashidi (2006) donde se emplearon fibras de palmera procesada (p. 28).

Figura 6. Fibras de palmera. Adaptado de “Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones”, Vittorelo & Clariá, 2014

De acuerdo con diversos estudios concluyen que:

- ✓ La adición de estas fibras en suelos granulares y cohesivos aumenta en la resistencia al corte a grandes niveles de deformación.
- ✓ Las fibras son sometidas a tensiones de tracción debido al movimiento relativo de los granos de suelo. Por lo tanto, el refuerzo de fibras contribuye a la resistencia al corte del suelo a partir de un cierto nivel de deformación.

2.3.2 Resistencia de suelo arcilloso estabilizado con cal y la adición de fibras

El polietileno de alta densidad es el resultado de la polimerización del etileno. Se presenta de dos maneras, de baja y alta densidad respectivamente. Por otro lado, la ASTM los clasifica de la siguiente manera:

- Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE)
- Polietileno Lineal de Baja Densidad (PELBD o LLDPE)
- Polietileno de Alta Densidad (PEAD o HDPE)
- Polietileno de Alta Densidad Alto Peso Molecular (HMW-HDPE)
- Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (UHMWPE)

En su investigación Rosales (2014) menciona que, el refuerzo del suelo se planteó a través de adiciones aleatorias de fibras sintéticas discretas (polipropileno), las cuales fueron distribuidas de manera aparentemente homogénea y uniformes en la masa de suelo generando un compost. Por otro lado, Calderón y Velosa (2017), en su tesis “Análisis de resistencia a la compresión no confinada y durabilidad de un suelo arcilloso estabilizado con cal adicionando fibras de material no biodegradable, polietileno de alta densidad (polisombra) reciclada”, menciona que en la investigación se propuso la adición de diferentes dosificaciones de fibras (0.5, 1.0, 1.5 %) y se determinó la influencia de cada porcentaje de fibra a la muestra. Se espera que la implementación de estas fibras en el suelo estabilizado aporte con la mitigación del impacto ambiental que la producción de plástico genera al ambiente, de tal manera se espera la mejora de las propiedades mecánicas del suelo. Por último, la adición de fibras de polietileno, respecto a la mezcla sin adición, y cuál de los porcentajes, aportó en la mejora con respecto a la resistencia a la compresión no confinada y durabilidad. De esta investigación se concluyó que la adición del 1% de estas fibras presentó mayor esfuerzo con un valor del 538kpa, siendo esta mezcla no falló por cortante.

2.4 Polietileno de tereftalato (PET)

Es un polímero usado en la fabricación de recipientes para bebidas, agua, aceites, limpiadores y envasado de alimentos. Este es conformado por una larga cadena de moléculas donde las unidades de repetición son oxígeno, carbono e hidrógeno. Este material fue elaborado inicialmente para producir fibras sintéticas. A inicios de los años 70's su uso se radicó en la elaboración de botellas de plástico mediante la técnica de moldeo por soplado, siendo este su principal uso en la actualidad. El PET, perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, cuya denominación técnica es polietileno de tereftalato o politereftalato de etileno. El PET forma parte del grupo de los termoplásticos, por lo que es posible reciclarlo. Se elabora con derivados del petróleo, gas y aire. En 1941, los científicos británicos Whinfield y Dickson, lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Para 1946 se comenzó a dar uso industrial como fibra y como textil es utilizado hasta la actualidad. Ya en 1952, se empleó en forma de film para el envasado de alimentos, siendo la aplicación de envases rígidos el principal mercado. Desde 1976 se inició el embotellado por su adaptabilidad de bebidas carbonatadas. Cabe mencionar que según Gil (2018):

El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad, de acuerdo con su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química; este polímero no se estira y no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, es resistente al calor y absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles, también películas (p. 46).

El polímero es resistente a la exposición de microorganismo y debido a que su punto de fusión es elevado, es más fácil su planchado. Entre otras propiedades relevantes se tiene:

- Apto para producir botellas, películas, láminas, fibras y piezas.
- Transparencia y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Buena resistencia química y térmica.
- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Apto para estar en contacto con productos alimenticios.
- Destacables propiedades mecánicas.

- Biorientable, cristalizable y liviano.
- Buena relación costo / performance.

2.5 Interacción suelo – fibras poliméricas

Tanto el mecanismo de interacción entre el suelo y la fibra, y el criterio habitual de suelo reforzado, busca la manera de mejorar la resistencia a la tensión del suelo.

Las fibras se esparcen de forma homogénea y aleatoria en la composición del suelo, incluyendo los diversos planos de falla de este, aumentando su resistencia al corte y estabilidad.

La aplicación central de las fibras es limitar las deformaciones del suelo. En consecuencia, los esfuerzos se transfieren del suelo al refuerzo por fricción. Estos esfuerzos son tolerables por el refuerzo de corte y flexión.

Se estudió de manera profunda el impacto al adherir fibras sobre el suelo para ensayos triaxiales de compresión y pull-out, de acuerdo con diversos esfuerzos de confinamiento y porcentajes de fibra variables (Gil, 2018). También se sabe, que de acuerdo con Vettorelo & Clariá (2014) los aspectos más relevantes en el análisis del funcionamiento de mecanismos en suelos reforzados con fibras son:

- Características de la fibra: tipo de fibra, longitud, forma, relación de aspecto (longitud – diámetro), rugosidad
- Características del suelo: distribución granulométrica; tamaño, forma y rugosidad de partículas; contenido de humedad; entre otros
- Contenido de fibras
- Orientación de las fibras
- Relación de vacíos del suelo reforzado
- Mecanismo de extracción
- Método de compactación del suelo reforzado

No obstante, cuando se analiza la estabilidad interna y las interacciones de enlace, la prueba de la extracción parece ser la más apropiada, por lo que se realizó esta prueba a probetas de suelo con fibra reforzada, para su posterior análisis de los resultados con el microscopio electrónico de barrido o SEM (Tang, 2010) como se muestra en la figura 7.

Figura 7. SEM: a) Después de compactación, b) Después de prueba de extracción, por Tang, Shi, & Zhao, 2010

Además de la fricción interfacial, se puede ver en el dibujo del bosquejo de la Fig. 8. a que la fuerza de unión entre el área de contacto de las partículas de suelo –fibra (fase sólida-sólida) y poro-fibra (fase líquido-sólida) también haga contribuciones a la resistencia al corte interfacial, y la fuerza de unión generalmente varía con las composiciones mineralógicas/químicas del suelo. Durante la compactación, algunas partículas angulares duras (por ejemplo, arenas) en el suelo pueden causar la deformación plástica del cuerpo de la fibra (Fig. 8.b), especialmente con una carga de compactación alta. Este fenómeno fue confirmado por Tang et al. (2007) que investigaron las morfologías de interfaz de suelo de arcilla reforzada con fibra.

Figura 8. Esquema del comportamiento mecánico en la interfaz entre la superficie de la fibra y la matriz del suelo. Adaptado de “Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil”, Tang, 2007

3 METODOLOGÍA

En el proyecto de investigación, se utilizará el Método científico como método general, pues se desea comprobar y comparar los efectos de una intervención específica. El diseño de la investigación es analítico – experimental, ya que se proponen diversas combinaciones de suelo arcilloso utilizando diferentes porcentajes de PET reciclado con fin de hallar la óptima cantidad de PET a adicionar para mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso del caserío de Bello Horizonte, distrito de Curimaná.

Técnicas de recolección de datos:

El proyecto de investigación se realizará a través de trabajo de campo y laboratorio. Para la realización del trabajo de campo se utilizará la observación con la finalidad de conocer y recopilar datos acerca del proceso de recolección de PET reciclado y el proceso de trituración hasta el tamaño requerido; así como también, para la extracción del suelo en Curimaná. En el trabajo de laboratorio se realizarán ensayos controlados, la información y resultados de estos se tomarán con formatos elaborados para cada ensayo, los mismos se analizarán mediante gráficas.

Caracterización de los suelos arcillosos:

Se realizará la extracción del material en el distrito de Curimaná de la Carretera Federico Basadre km. 60 con dirección a Lima ingresando alrededor de 20 km, en el Departamento de Ucayali. Para lo cual se consiguió alrededor de 130 kg de arcilla.

Caracterización del PET:

Se buscará que el PET presente dimensiones de 3 a 5 mm de longitud como máximo, las cuales deben pasar por la malla N° 8. Según (Espinosa M. 2013), de acuerdo a su investigación realizada observa que el PET utilizado fue en tiras de 3 cm y 5 cm de largo, los cuales fueron utilizadas para los distintos ensayos realizados en su estudio, concluyendo que a mayor longitud el material no se deja moldear y se produce desprendimiento con facilidad, de tal manera que no se presenta la adherencia deseada en la combinación Suelo vs. PET, lo que conlleva a tener tiras de menor longitud para un mejor comportamiento en el suelo. Por lo tanto, se optará realizar la trituración del PET reciclado de acuerdo con las dimensiones anteriormente expuestas para fines prácticos, obtención de resultados óptimos y generación de data para futuras investigaciones.

3.1 Procesamiento de la información

- 1) Primero se realizará la recolección de las muestras de PET reciclado con las dimensiones requeridas y suelo arcilloso en el caserío de Bello Horizonte, distrito de Curimaná.
- 2) Se caracterizará físicamente el PET. Por otro lado, se realizarán los 5 ensayos descritos en el cuadro N 1, para la caracterización del material de estudio.
- 3) Se realizarán 5 probetas para cada combinación de suelo - PET y del suelo natural, los porcentajes de PET a adicionar son elegidos basadas investigaciones pasadas, las cuales son las siguiente: 0.5%, 1.0, 2.5% y 3.5%. Asimismo, se adoptarán las siguientes nomenclaturas: S100+0%PET, S100+0.5%PET, S100+1.0%PET, S100+2.5%PET, S100+3.5%PET respectivamente.
- 4) A continuación, se harán los ensayos de Compactación Proctor Estándar ASTM D 698 para evaluar los resultados del mejoramiento de las propiedades mecánicas. Cabe resaltar que los ensayos de Compactación, permitirá graficar las curvas de compactación, para obtener la densidad seca máxima y humedad óptima, permitirán conformar los cuerpos de prueba bajo las mismas condiciones.
- 5) A través del ensayo de Corte Directo ASTM D3080, se busca caracterizar mecánicamente el comportamiento de las diferentes combinaciones del suelo-PET, con el fin de obtener la máxima resistencia al corte, con diferentes tipos de cargas normales aplicadas, para poder determinar el ángulo fricción interna y la cohesión.
- 6) Establecer la influencia de la adición de fibras de PET sobre las propiedades mecánicas del suelo arcilloso extraído del Caserío Bello Horizonte, distrito de Curimaná.

En la figura 9 se presenta el esquema de la metodología a utilizar en el trabajo de investigación.

Figura 9. Se elaboró un resumen de la metodología experimental de investigación. Elaboración propia, 2019

La información de los ensayos se recopilará con los formatos elaborados y los resultados se analizarán con los gráficos.

3.1.1 Granulometría por tamizado (ASTM D 6913)

La granulometría por tamizado tiene como objetivo cuantificar la distribución de tamaños de partículas de suelo; es decir, este método determina los porcentajes de suelo pasantes por los tamices del ensayo teniendo como último filtro el tamiz N°200.

3.1.2 Granulometría por sedimentación (ASTM D 422)

El análisis granulométrico por medio del hidrómetro tiene como objeto hallar el porcentaje de partículas de suelos finos dispersos, que se encuentran suspendidos en un tiempo determinado. Se realiza este ensayo a partículas de suelo muy finas que pasan el tamiz N°200.

3.1.3 Límite líquido (ASTM D 4318)

Es el contenido de humedad, expresado en porcentaje, para el cual el suelo se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. De manera que, se denomina límite líquido al contenido de humedad que separa dos mitades de una pasta de suelo que se reduce a lo largo de su fondo en una longitud de 13 mm (1/2") cuando se deja caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de dos caídas por segundo. Esta técnica se realiza en el conocido equipo llamado "cuchara de Casagrande".

3.1.4 Límite plástico (ASTM D 4318)

Es el contenido de agua con el cual el suelo se cuarteo y quiebra al formar pequeños rollitos de 3.2 mm de diámetro.

3.1.5 Gravedad específica (ASTM D 854)

Este método de ensayo se empleó para la determinación de la gravedad específica de sólidos de suelo que pasan el tamiz de 4.75 mm (N.º 4) mediante un picnómetro de agua. Suelos con su humedad natural.

3.2 Compactación Proctor estándar (ASTM D 698)

El objetivo de este ensayo es determinar el contenido de humedad óptima y el peso específico seco máximo para una muestra de suelo compactado en el laboratorio. La densificación del suelo se obtiene mediante el proceso mecánico de la compactación, disminuyendo su relación de vacíos. La compactación tiene como finalidad el mejoramiento de las propiedades geotécnicas del suelo, para tener comportamiento mecánico adecuado.

Procedimiento del ensayo

Se utiliza un molde cilíndrico de 1 litro de capacidad que se rellena con 3 capas de material debidamente compactadas mediante una maza estandarizada de 2,5 kg que se deja caer libremente una altura de 305mm. El material por ensayar previamente se ha secado y pasado por el tamiz correspondiente según el método a elegir: N° 4 (4,75 mm), 3/8pulg (9,5 mm) ó 3/4pulg (19,0 mm) y posteriormente humedecido con distintos porcentajes de humedad, una por cada muestra necesaria. Para la compactación de cada capa se aplican 25 golpes a la muestra distribuidos de manera uniforme sobre la superficie. Las tres capas deben tener aproximadamente la misma altura. Al tener compactada la muestra, esta se enraza en el molde y se tomará una muestra del centro de este. Para finalmente realizar las mediciones para obtener la densidad y humedad para cada muestra. Este proceso se repite variando el contenido de humedad, culminando el ensayo al obtener de 4 a más puntos que forman una curva que relaciona la densidad seca máxima con el óptimo contenido humedad. (Montenegro, 2011).

Figura 10. Curva de compactación. Adaptado de “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, Braja M. Das, 2013.

3.3 Corte directo (ASTM D 3080)

Previo al ensayo

- Si se usa una muestra inalterada, debe ser suficientemente grande para proveer un mínimo de tres muestras para la realización del ensayo.
- La elaboración de la muestra debe realizarse de forma que la pérdida de humedad sea la mínima posible.
- Se determina el peso inicial de la muestra para el cálculo posterior del contenido inicial de humedad de acuerdo con la norma.
- El espesor mínimo de la muestra de ensayo debe ser aproximadamente 12 mm ($\frac{1}{2}$ "), pero no menor de un sexto el tamaño máximo de las partículas del suelo.
- La relación mínima diámetro/espesor o ancho/espesor, según la muestra, debe ser 2:1.

Procedimiento de ensayo

- Se ensambla la caja de corte con los marcos alineados y se bloquea. Se aplica una capa de grasa entre los marcos para lograr impermeabilidad durante la consolidación y reducir la fricción durante el corte. Pueden también usarse espaciadores o

superficies recubiertas con tetrafluoroetileno carbono, para reducir la fricción durante el corte.

- Se introduce la muestra de ensayo con sumo cuidado. Se conecta el dispositivo de carga y se ajusta el dial para medir tanto la deformación durante el corte, como el cambio del espesor de la muestra y luego se determina el espesor inicial. La costumbre de humedecer las piedras porosas antes de la colocación y aplicación de la fuerza normal sobre las muestras dependerá del tipo de problema. Para muestras inalteradas obtenidas bajo el nivel freático, deben humedecerse las piedras. Para suelos expansivos se debe efectuar el humedecimiento después de la aplicación de la fuerza normal, para evitar expansiones que no son representativas de las condiciones de campo. Ver Figura 10.a.
- La fuerza normal que se aplique a cada una de las muestras depende de la información requerida. Un solo incremento de ella puede ser apropiado para suelos relativamente firmes. Para los demás suelos pueden ser necesarios varios incrementos con el objeto de prevenir el daño de la muestra. El primer incremento dependerá de la resistencia y de la sensibilidad del suelo. En general, esta fuerza no debe ser tan grande que haga fluir el material constitutivo de la muestra por fuera del dispositivo de corte.
- Anote la lectura inicial o ajuste los dispositivos para tener una lectura de cero, tanto de la celda como del instrumento de medida de los desplazamientos horizontales. Ver Figura 10.b.
- Durante el proceso de la consolidación deben registrarse las lecturas de deformación normal, en tiempos apropiados, antes de aplicar un nuevo incremento de la fuerza.
- Cada incremento de la fuerza normal debe durar hasta que se complete la consolidación primaria. El incremento final debe completar la fuerza normal especificada. Ver Figura 10.c.
- Se representan gráficamente las lecturas de la deformación normal contra el tiempo.
- Corte de la muestra. Luego de terminada la consolidación se deben soltar los marcos separándolos aproximadamente 0,25mm (0,01"), esto permite el corte de la muestra. Se debe efectuar la fuerza de corte paulatinamente con el fin de disipar por completo el exceso de presión de poros.

Para hallar la velocidad de aplicación de la carga hasta la falla, se permite usar la expresión siguiente:

$$\text{Tiempo para falla} = 50_{t50}$$

Donde: 50_{t50} = Tiempo necesario de la muestra para obtener el 50% de consolidación bajo la fuerza normal.

Para la prueba con control de deformaciones, la velocidad de aplicación de cargas puede hallarse dividiendo la deformación estimada de corte, durante el esfuerzo máximo de corte, por el tiempo hallado para la falla.

Se prosigue con el ensayo hasta que el esfuerzo de corte sea constante, o hasta que se logre una deformación del 10% del diámetro o de la longitud original.

En el ensayo con control de esfuerzos, se comienza con incrementos de la fuerza de corte de aproximadamente un 10 % de la máxima estimada.

Antes de aplicar un nuevo incremento, se permitirá por lo menos un 95 % de consolidación bajo el incremento anterior.

Cuando se ejecutó el 50% al 70% de la fuerza de falla estimada, los nuevos incrementos serán de la mitad del valor de los aplicados hasta ese momento, siendo el 5% de la máxima fuerza de corte.

Antes de la falla, se sugiere que los incrementos de la fuerza pueden ser equivalentes a un cuarto del incremento asumido inicialmente (2,5 % de la fuerza normal de corte inicial).

Se registra las fuerzas de corte aplicada, las deformaciones normales y de corte para intervalos determinados de tiempo. De preferencia el incremento de la fuerza de corte debe ser gradual.

Al culminar el ensayo, se retira la muestra completa de la caja de corte, se seca y se obtiene el peso de los sólidos. Ver Figura 11.d.

Figura 11. Metodología del ensayo de corte. Elaboración propia, 2019

4 DESARROLLO DE ENSAYOS

4.1 Caracterización de los suelos arcillosos

Para realizar la caracterización del material se realizó la extracción del distrito de Curimaná de la Carretera Federico Basadre km. 60 con dirección a Lima ingresando alrededor de 20 km, en el Departamento de Ucayali. Para lo cual se consiguió alrededor de 130 kg de arcilla como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Material extraído en campo. Elaboración propia, 2019

Luego procedimos a llevar el material al Laboratorio del HUB-San Miguel para lo cual tuvimos que realizar un tamizado por lavado.

4.1.1 Granulometría por tamizado (ASTM D 6913) y por hidrometría (ASTM D 422)

El análisis granulométrico se realizó de forma manual, debido a que el material de estudio es un suelo fino el cual requirió de lavado en la malla 200.

Con los datos que se recolectaron en el laboratorio (número de mallas, P. retenido y abertura de las mallas) ubicadas respectivamente en la Tabla 1.

Tabla 1. *Datos recolectados y calculados en laboratorio*

Mallas	%Retenido	%Retenido acumulado	% Pasante	Abertura (mm)
20	0.00	0.00	100	0.850
30	0.10	0.10	99.90	0.600
40	0.10	0.20	99.80	0.425
60	0.60	0.80	99.20	0.250
100	2.30	3.10	96.90	0.150
140	3.40	6.50	93.50	0.106
200	5.50	12.00	86.50	0.075
Pasante	86.50	100.0	0.00	

Nota: Se realizaron los cálculos de los porcentajes de suelo retenido y pasante de los datos recolectados en el laboratorio. Elaboración propia, 2019

Con los datos de la Tabla 1 se realizó parte de la curva granulométrica y se completó con ayuda del ensayo de sedimentación o también llamado hidrómetro. Obteniendo finalmente la curva presentada en la Figura 13 en una escala logarítmica.

Figura 13. Curva Granulométrica completada por hidrometría del suelo arcilloso natural. Elaboración propia, 2019

De la curva granulométrica se puede determinar que más del 86.5% del suelo pasa por la malla 200, por lo cual se realizó el ensayo de Hidrometría y así determinar la cantidad de arcilla y limo que existe en la muestra.

Se presenta la Tabla 2, la cual muestra los resultados del ensayo de granulometría por hidrómetro, el cual muestra los porcentajes de los componentes de nuestro material de estudio.

Tabla 2: *Componentes del suelo al realizar el ensayo de granulometría tanto por tamizado e hidrómetro*

RESULTADOS		
Gravas (%)	:	0.00
Arenas (%)	:	13.52
Limos (%)	:	42.50
Arcillas y Coloides (%)	:	43.98

Nota: Se elaboró un resumen según los porcentajes de los componentes de suelo al realizar la granulometría. Elaboración propia, 2019

4.1.2 Límites de Atterberg

4.1.2.1 Límite líquido y límite plástico (ASTM D 4318)

Para realizar este ensayo se tamizó el material por la malla 40 y se dejó saturar por 24 horas antes del ensayo.

Luego de realizar los ensayos en el laboratorio, se analizaron los datos recolectados, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. *Resultados de los ensayos de Límite plástico y Límite líquido*

Prueba N°	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	5
Frasco N°	A-15	M-10	M-4	A-3	83
N° de golpes	32	27	18		
1 Peso de frasco + suelo húmedo (gr)	27.28	34.21	42.46	18.64	19.21
2 Peso de frasco + suelo seco (gr)	24.35	27.18	29.62	17.87	18.37
3 Peso de Agua	2.93	7.03	12.84	0.77	0.84
4 Peso de frasco (gr)	13.72	13.57	14.55	13.74	13.75
5 Peso de suelo seco (gr)	10.63	13.61	15.07	4.13	4.62
6 Contenido de humedad	27.56	51.65	85.20	18.64	18.18
				18.41	

Nota: Se una tabla con los resultados de los ensayos de límite líquido y límite plástico

Una vez obtenido el contenido de humedad se realiza la Figura 14, para poder realizar una línea de tendencia lineal que una los tres puntos, para poder hallar el contenido de humedad para 25 golpes, siendo este la representación del límite líquido.

Figura 14. Límite líquido (Nº de golpes vs Contenido de humedad). Elaboración propia, 2019

El límite plástico se obtiene del promedio del contenido de humedad, de ambas muestras. El índice de plasticidad (IP) se obtiene de la diferencia del Límite líquido y del Límite plástico. En la Tabla 4 se muestra los resultados de los límites, así como también el Índice de plasticidad.

Tabla 4: Resultados de los límites de Atterberg

Límite Líquido	57.52
Límite Plástico	18.41
Índice de plasticidad	39.11

Nota: Se hizo un resumen de los resultados de los límites de Atterberg. Elaboración propia, 2019

Con estos valores obtenidos anteriormente se colocan en la carta de plasticidad como se muestra en la figura 15 para clasificar nuestra muestra de suelo.

Figura 15. Carta de Casagrande para clasificar el tipo de suelo. Adaptado de "Fundamentos de la ingeniería geotécnica", Braja M. Das, 2013

Al final del ensayo se obtuvo un límite líquido de 57.52% y un límite plástico de 23.46%. De esta diferencia se obtuvo el índice de plasticidad siendo este de 34.06%. Con estos valores se determina con la ayuda de la Carta de Casagrande que se trata de un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH).

4.1.3 Gravedad específica (ASTM D 854)

De acuerdo con la Norma ASTM D 854, debido a que el picnómetro utilizado en el laboratorio era de 500 ml se tomó una muestra de 122.50 gr la cual fue tamizada por la malla N.º 4. Los datos tomados del ensayo se encuentran en la Tabla 5 obteniendo un $G_s = 2.71$.

Tabla 5: *Datos de gravedad específica*

Gravedad específica - G_s (ASTM D 854)	
Capacidad Picnómetro (cm ³)	500.00
Peso Picnómetro (gr)	168.80
Peso Picnómetro + suelo seco(gr)	291.30
Peso suelo seco(gr)	122.50
Peso Picnómetro + suelo seco+ agua (gr)	745.73
Peso Picnómetro + agua (gr)	668.80
Peso Picnómetro + agua a Temp. de ensayo(gr)	668.47
G_s a temperatura de ensayo	2.708
G_s a 20° C	2.706

Nota: Se elaboró la tabla anterior con los datos tomados del ensayo de Gravedad específica. Elaboración propia, 2019

4.2 Granulometría por tamizado del PET

El análisis granulométrico se realizó de forma manual, para determinar las partículas retenidas por cada malla.

Con los datos que se recolectaron en el laboratorio (número de mallas, P. retenido y abertura de las mallas) ubicadas respectivamente en la Figura 16.

Figura 16. Curva granulométrica del PET. Elaboración propia, 2019

De la granulometría presentada en la Figura 16 se observa que más del 98.57% del material pasa la malla N° 8, lo cual nos da a conocer que nuestro PET es apto para la continuidad de la investigación.

4.3 Compactación Proctor estándar (ASTM D 698)

La muestra de suelo se clasificó como método A.

En la Tabla 6 se presentan los datos que se tomaron durante el ensayo al suelo natural y para las adiciones de PET realizadas al suelo.

Tabla 6. Datos ensayo Proctor estándar

Molde de compactación	
Diámetro (cm)	10.16
Altura (cm)	11.64
Volumen (cm ³)	943.70
Peso (gr)	4125.00

Nota: Toma de datos del ensayo Proctor Estándar. Elaboración propia, 2019

En la Tabla 7, se muestran los valores obtenidos del laboratorio para el ensayo de Proctor Estándar de suelo natural.

Tabla 7: Valores para la realización de la curva de compactación S100+0%PET.

S100+0%PET				
Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698)				
# de Ensayo	1	2	3	4
P. Suelo húmedo+molde (gr)	5785.00	5908.00	5974.00	5976.00
P. Suelo húmedo (gr)	1660.00	1783.00	1849.00	1851.00
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.76	1.89	1.96	1.96
Tara N°	220	1000	BL-7	47
P. Suelo húmedo + Tara (gr)	123.70	124.10	126.00	111.60
P. Suelo seco + tara (gr)	109.40	107.30	106.30	93.20
P. recipiente (gr)	16.20	14.10	14.30	18.00
P. Agua (gr)	14.30	16.80	19.70	18.40
P. Suelo seco (gr)	93.20	93.20	92.00	75.20
Contenido de humedad	15.343%	18.026%	21.413%	24.468%
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.525	1.601	1.614	1.576

Nota: Se muestran los valores para la realización de la curva de compactación del S100+0%PET.

Elaboración propia, 2019

De la curva de compactación mostrada en la figura 17, se obtiene una máxima densidad seca de 1.618 g/cm³ y un máximo contenido de humedad de 20.25%.

Figura 17. Curva de compactación del S100+0%PET. Elaboración propia, 2019

En la Tabla 8, se muestran los valores obtenidos del laboratorio para el ensayo de Proctor estándar de S100+ 0.5% PET.

Tabla 8. Valores para la realización de la curva de compactación S100+0.5%PET

S100+0.5%PET				
Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698)				
# de Ensayo	1	2	3	4
P. Suelo húmedo+ molde (gr)	5767.00	5883.00	5969.00	5975.00
P. Suelo húmedo (gr)	1642.00	1758.00	1844.00	1850.00
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.74	1.86	1.95	1.96
Tara N°	P-3	P-7	P-23	P-25
P. Suelo húmedo + Tara (gr)	104.90	88.60	76.90	72.90
P. Suelo seco + tara (gr)	92.00	76.40	65.50	61.00
P. recipiente (gr)	10.80	10.40	10.70	11.60
P. Agua (gr)	12.90	12.20	11.40	11.90
P. Suelo seco (gr)	81.20	66.00	54.80	49.40
Contenido de humedad	15.887%	18.485%	20.803%	24.089%
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.501	1.572	1.618	1.580

Nota: Se muestran los valores para la realización de la curva de compactación del S100+ 0.5% PET.

Elaboración propia, 2019

De la curva de compactación mostrada en la Figura 18, se obtiene una máxima densidad seca de 1.622 g/cm³ y un máximo contenido de humedad de 21.70%.

Figura 18. Curva de compactación del S100+0.5%PET. Elaboración propia, 2019

En la Tabla 9, se muestran los valores del laboratorio para el ensayo de Proctor estándar para S100+ 1.0% PET.

Tabla 9. Valores para la realización de la curva de compactación S100+1.0%PET

S100+1.0%PET				
Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698)				
# de Ensayo	1	2	3	4
P. Suelo húmedo+molde (gr)	5754.00	5856.00	5959.00	5968.00
P. Suelo húmedo (gr)	1629.00	1731.00	1834.00	1843.00
Densidad húmeda (gr/cm ³)	1.73	1.83	1.94	1.95
Tara N°	P-29	P-13	P-20	P-18
P. Suelo húmedo + Tara (gr)	78.20	76.80	84.10	87.60
P. Suelo seco + tara (gr)	69.30	66.60	71.70	72.50
P. recipiente (gr)	10.60	11.40	13.60	10.50
P. Agua (gr)	8.90	10.20	12.40	15.10
P. Suelo seco (gr)	58.70	55.20	58.10	62.00
Contenido de humedad	15.162%	18.478%	21.343%	24.355%
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.499	1.548	1.602	1.570

Nota: Se muestran los valores para la realización de la curva de compactación del S100+1.0%PET.

Elaboración propia, 2019

De la curva de compactación mostrada en la Figura 19, se obtiene una máxima densidad seca de 1.606 g/cm³ y un máximo contenido de humedad de 22.23%.

Figura 19. Curva de compactación del suelo S100+1.0%PET. Elaboración propia, 2019

En la Tabla 10, se muestran los valores del laboratorio para el ensayo de Proctor estándar para S100+ 2.5% PET.

Tabla 10. Valores para la realización de la curva de compactación S100+2.5%PET

S100+2.5%PET				
Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698)				
# de Ensayo	1	2	3	4
P. Suelo humedo+ molde (gr)	5778.00	5846.00	5933.00	5965.00
P. Suelo humedo (gr)	1653.00	1721.00	1808.00	1840.00
Densidad humeda (gr/cm ³)	1.75	1.82	1.92	1.95
Tara N°	P-32	P-31	P-10	P-6
P. Suelo humedo + Tara (gr)	84.20	85.40	92.50	84.10
P. Suelo seco + tara (gr)	74.20	73.70	78.00	69.90
P. recipiente (gr)	11.10	10.90	11.00	11.40
P. Agua (gr)	10.00	11.70	14.50	14.20
P. Suelo seco (gr)	63.10	62.80	67.00	58.50
Contenido de humedad	18.850%	22.500%	24.800%	27.300%
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.418	1.452	1.488	1.483

Nota: Se muestran los valores para la realización de la curva de compactación del S100+2.5%PET.

Elaboración propia, 2019

De la curva de compactación mostrada en la Figura 20, se obtiene una máxima densidad seca de 1.495 g/cm³ y un máximo contenido de humedad de 26.0%.

Figura 20. Curva de compactación del suelo S100+2.5%PET. Elaboración propia, 2019

En la Tabla 11, se muestran los valores del laboratorio para el ensayo de Proctor estándar para S100+ 3.5% PET.

Tabla 11. Valores para la realización de la curva de compactación S100+3.5%PET

S100+3.5%PET				
Ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698)				
# de Ensayo	1	2	3	4
P. Suelo humedo+ molde (gr)	5778.00	5846.00	5933.00	5965.00
P. Suelo humedo (gr)	1653.00	1721.00	1808.00	1840.00
Densidad humeda (gr/cm ³)	1.75	1.82	1.92	1.95
Tara N°	P-32	P-31	P-10	P-6
P. Suelo humedo + Tara (gr)	84.20	85.40	92.50	84.10
P. Suelo seco + tara (gr)	74.20	73.70	78.00	69.90
P. recipiente (gr)	11.10	10.90	11.00	11.40
P. Agua (gr)	10.00	11.70	14.50	14.20
P. Suelo seco (gr)	63.10	62.80	67.00	58.50
Contenido de humedad	22.150%	25.280%	27.740%	30.800%
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.435	1.472	1.473	1.405

Nota: Se muestran los valores para la realización de la curva de compactación del S100+3.5%PET.

Elaboración propia, 2019

De la curva de compactación mostrada en la figura 21, se obtiene una máxima densidad seca de 1.477 g/cm³ y un máximo contenido de humedad de 26.75%.

Figura 21. Curva de compactación del suelo S100+3.5%PET. Elaboración propia, 2019

Debido a la naturaleza del suelo el cual tiene más del 80% de finos, se puede decir que es un suelo cohesivo, dando como resultado que las partículas de suelo, con el óptimo contenido de humedad, logran una distribución eficiente durante la compactación.

Se observa una mejora en la densidad seca de la muestra de suelo cuando se le adiciona 0.5% PET en comparativa al suelo sin reforzar. Asimismo, se observa que el contenido de humedad óptima aumenta proporcionalmente cuando se le refuerza al suelo con un porcentaje de PET como se muestra en el cuadro comparativo de la Tabla 12:

Tabla 12. *Resultados ensayo Proctor Estándar*

	S100+ 0%PET	S100+ 0.5%PET	S100+ 1.0%PET	S100+ 2.5%PET	SUELO + 3.5% PET
Max. densidad seca (g/cm ³)	1.618	1.622	1.606	1.495	1.477
óptimo cont. humedad (%)	20.25	21.7	22.23	26	26.75
% Variación en el cont. de humedad	100%	107%	110%	128%	132%

Nota: Resumen de los resultados de los ensayos de Proctor Estándar para cada muestra. Elaboración propia, 2019

4.4 Corte directo (ASTM D 3080)

Se realizaron los ensayos de corte directo a las cinco mezclas seleccionadas que son: S100+0%PET, S100+0.5%PET, S100+1.0%PET, S100+2.5%PET, S100+3.5%PET. Para lo cual se presentan los valores obtenidos del laboratorio en la Tabla 13.

Tabla 13. *Valores obtenidos de los ensayos de Corte Directo*

Nomenclatura	Esfuerzo cortante (kg/cm ²)			Esfuerzo normal(kg/cm ²)			Angulo de Fricción Interna Ø (°)	Cohesión (kg/cm ²)
	τ1	τ2	τ3	σ1	σ2	σ3		
S100+0%PET	0.331	0.484	0.767	0.500	1.000	2.000	16.200	0.190
S100+0.5%PET	0.334	0.484	0.755	0.500	1.000	2.000	15.600	0.200
S100+1.0%PET	0.334	0.478	0.755	0.500	1.000	2.000	15.700	0.200
S100+2.5%PET	0.325	0.479	0.771	0.500	1.000	2.000	16.500	0.180
S100+3.5%PET	0.319	0.472	0.770	0.500	1.000	2.000	16.700	0.170

Nota: Se muestran los valores obtenidos de los ensayos de corte directo para cada tipo de muestra con sus respectivos porcentajes de adiciones de refuerzo. Elaboración propia, 2019

4.5 Verificación de la resistencia al corte según el criterio de Mohr Coulomb

Para la confiabilidad de los datos obtenidos del ensayo de corte directo se analizaron los parámetros de cohesión y ángulo de fricción según el criterio de resistencia al corte de Mohr Coulomb como se muestra en la Tabla 14. Esto con la finalidad de corroborar la veracidad de los resultados y su coherencia con el ensayo.

Tabla 14. Verificación según criterio de resistencia al corte de Mohr Coulomb

Nomenclatura	$\tau = c + \sigma \tan \phi$
S100+0%PET	0.771
S100+0.5%PET	0.758
S100+1.0%PET	0.762
S100+2.5%PET	0.772
S100+3.5%PET	0.770

Nota: Resistencia al corte según parámetros de cohesión y fricción obtenidos del ensayo de corte directo. Elaboración propia, 2019

4.6 Capacidad de carga última y admisible del suelo natural y reforzado con PET

Para mejor interpretación de nuestros resultados se aplicará la formula general con los factores basados en la teoría de Meyerhof. Siendo la formula General la siguiente:

$$q_u = c' N_c F_{cs} F_{cd} N_{ci} + q N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} \gamma N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i}$$

Ecuación 3. Ecuación general de Capacidad de carga última

Siendo las variables las siguientes:

c' = Cohesión

q = Esfuerzo efectivo a nivel del fondo de cimentación

γ = Peso específico del suelo

B = Ancho de la cimentación

$F_{cs} F_{qs} F_{\gamma s}$ = Factores de forma

$F_{cd} F_{qd} F_{\gamma d}$ = Factores de profundidad

$F_{ci} F_{qi} F_{\gamma i}$ = Factores de inclinación de carga

Para los cálculos de capacidad portante última, se tiene como datos de entrada la profundidad extraída de la muestra $D_f = 1.60\text{m}$, y una estimación de un área cuadrada de zapata de lado de 1.0 m. Para el cálculo de la capacidad portante admisible se consideró un Factor de Seguridad de 3.

Los cálculos de factores de carga, forma, profundidad, inclinación obtenidos según Meyerhof fueron los mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15: *Factores de carga, forma, profundidad e inclinación según Meyerhof*

Nomenclatura	N _q	N _c	N _y	F _{cs}	F _{qs}	F _{ys}	F _{cd}	F _{qd}	F _{yd}	F _{ci} , F _{qi} , F _{gi}
S100+0%PET	4.17	11.36	1.27	1.35	1.17	1.17	1.42	1.21	1.21	1.00
S100+0.5%PET	4.17	11.36	1.27	1.35	1.17	1.17	1.42	1.21	1.21	1.00
S100+1.0%PET	4.21	11.43	1.30	1.35	1.17	1.17	1.42	1.21	1.21	1.00
S100+2.5%PET	4.55	11.17	1.51	1.36	1.18	1.18	1.43	1.21	1.21	1.00
S100+3.5%PET	4.64	12.12	1.57	1.36	1.18	1.18	1.43	1.22	1.22	1.00

Nota: Resumen de los factores de corrección por carga, forma, profundidad e inclinación según Meyerhof. Elaboración propia, 2019

Con los factores calculados según la formula general se obtuvieron los siguientes resultados de Capacidad de carga última y Capacidad de carga admisible que se muestran en la Tabla 16:

Tabla 16: *Resultados de Capacidad de Carga Última y Capacidad de Carga Admisible*

Nomenclatura	q _{ult} (Kg/cm ²)	Q _{adm} (Kg/cm ²)
S100+0%PET	6.39	2.362
S100+0.5%PET	6.55	2.416
S100+1.0%PET	6.57	2.423
S100+2.5%PET	6.44	2.377
S100+3.5%PET	6.32	2.338

Nota: Resumen de la Capacidad carga última y Capacidad de Carga Admisible según los factores de corrección bajo el criterio de Meyerhof. Elaboración propia, 2019

4.7 Resumen de ensayos físicos

En la Tabla 17 se presenta el cuadro resumen de los ensayos físicos realizados.

Tabla 17. Cuadro resumen de ensayos físicos realizados

Ensayos	Simbología	Resultados	Observaciones
Contenido de humedad	-	18.30%	-
Límite líquido	LL	57.52%	-
Límite plástico	LP	18.41%	-
Índice de plasticidad	IP	39.11%	-
SUCS	SUCS	CH	Material inorgánico, arcilla de color rojo con blanco de alta plasticidad, mediana compresibilidad y alta expansión con características de drenaje permeable.
Gravedad específica	Gs	2.71	-

Nota: Se elaboró un cuadro resumen de ensayos físicos realizados según la simbología, resultados y observaciones de cada uno. Elaboración propia, 2019.

4.8 Resumen de ensayos mecánicos

En la Tabla 18 se presenta el resumen de los parámetros del ensayo de Proctor Estándar.

Tabla 18. Cuadro resumen de ensayos mecánicos realizados - Proctor Estándar

PROCTOR ESTÁNDAR		
NOMENCLATURA	MAX. DENSIDAD SECA (g/cm ³)	ÓPTIMO. CONT. HUM. (%)
S100+0%PET	1.618	20.25
S100+0.5%PET	1.612	21.7
S100+1.0%PET	1.606	22.23
S100+2.5%PET	1.495	26
S100+3.5%PET	1.477	26.75

Nota: Se elaboró un cuadro resumen del ensayo de Proctor Estándar. Elaboración propia, 2019.

En la Tabla 19 se presenta el resumen de los parámetros del ensayo de Corte Directo.

Tabla 19. Cuadro resumen de ensayos mecánicos realizados-Corte directo

CORTE DIRECTO								
Nomenclatura	Esfuerzo cortante (kg/cm ²)			Esfuerzo normal(kg/cm ²)			Angulo de Fricción Interna Ø (°)	Cohesión (kg/cm ²)
	τ_1	τ_2	τ_3	σ_1	σ_2	σ_3		
S100+0%PET	0.331	0.484	0.767	0.50	1.00	2.00	16.200	0.190
S100+0.5%PET	0.334	0.484	0.755	0.50	1.00	2.00	15.600	0.200
S100+1.0%PET	0.334	0.478	0.755	0.50	1.00	2.00	15.700	0.200
S100+2.5%PET	0.325	0.479	0.771	0.50	1.00	2.00	16.500	0.180
S100+3.5%PET	0.319	0.472	0.770	0.50	1.00	2.00	16.700	0.170

Nota: Se elaboró un cuadro resumen de los parámetros del ensayo de Corte Directo. Elaboración propia, 2019.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 1) Por medio de la caracterización física del suelo se pudo definir que se trabajó con una arcilla de alta plasticidad (CH), lo cual es válida para continuar con la investigación, el material es un suelo fino con un 86.48% pasante de la malla 200, presentando 13.52% de arenas, 42.5% de limos y 43.98% de arcillas y coloides, el cual tiene un límite líquido de 57.52%, límite plástico 18.41% e índice de plasticidad 39.11% y con una gravedad específica de 2.71.
- 2) El tereftalato de polietileno (PET) fue obtenido de la empresa Gexim S.A.C, la cual fue tratada y triturada en la misma. De la granulometría del PET se determinó que el porcentaje de retenidos, en la malla N.º 8, que cumple con nuestros requerimientos para la realización de la siguiente investigación es del 80%.
- 3) Al realizar la adición del PET triturado en nuestro suelo, se obtuvieron los distintos contenidos de humedad para cada combinación, tal como se puede observar en la Figura 22:

- ✓ Para el suelo natural, se obtuvo un contenido de humedad de 20,25%.
- ✓ Para suelo natural + 0.5% PET se obtuvo un contenido de humedad de 21,7%, con un aumento del 7.0%.
- ✓ Para suelo natural + 1.0% PET se obtuvo un contenido de humedad de 22,23%, con un aumento del 10%.
- ✓ Para suelo natural + 2.5% PET se obtuvo un contenido de humedad de 26.00%, con un aumento del 28%.
- ✓ Para suelo natural + 3.5% PET se obtuvo un contenido de humedad de 26.75%, con un aumento del 32%.

Figura 22. Variaciones de humedad de los ensayos de Proctor Estándar. Elaboración propia, 2019

Como se observa en la Figura 23, debido a la adición del PET se ha generado un aumento significativo del contenido de humedad, el cual puede estar ocurriendo debido al simple hecho de adicionar el material de refuerzo. Este material de características no permeable no permite el paso de la circulación del agua con facilidad, por lo que este refuerzo genera una retención de la humedad generando mayores porcentajes de contenido de humedad al aumentar los porcentajes de adiciones de PET.

Al realizar la adición del PET triturado en nuestro suelo, se obtuvieron las máximas densidades secas para cada combinación, tal como se observa en la figura 21:

- ✓ Para el suelo natural, se obtuvo una máxima densidad seca de 1.618 g/cm³.
- ✓ Para suelo natural + 0.5% PET una máxima densidad seca de 1.612 g/cm³, con un descenso de 0.37%.
- ✓ Para suelo natural + 1.0% PET una máxima densidad seca de 1.606 g/cm³, con un descenso de 0.74%.
- ✓ Para suelo natural + 1.5% PET una máxima densidad seca de 1.580 g/cm³, con un descenso de 2.35 %.
- ✓ Para suelo natural + 2.5% PET una máxima densidad seca de 1.495 g/cm³, con un descenso de 7.60 %.
- ✓ Para suelo natural + 3.5% PET una máxima densidad seca de 1.477 g/cm³, con un descenso de 8.71 %.

Figura 23. Variaciones de la máxima densidad seca de los ensayos de Proctor Estándar.
Elaboración propia. 2019

Se evidencia una disminución progresiva de la densidad máxima seca de las muestras con las adiciones de PET, esto es lógico debido a que los contenidos de humedad (%) aumentan en medida que se le adicionan los porcentajes de refuerzo PET a las muestras de suelo.

- 4) Respecto a la resistencia al corte se realizó la verificación según el criterio de falla de Mohr Coulomb obteniendo resultados muy similares a los ensayos para su esfuerzo aplicado según los esfuerzos normales aplicados. Esto se valida debido a que las variaciones de los resultados de laboratorio en comparación con los cálculos teóricos son menores a 1%. Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos del ensayo de Corte directo se obtiene las siguientes Figuras 24 y 25 las cuales demuestran la variación del intercepto cohesivo y ángulo de fricción interna por cada medida de desplazamiento horizontal en cada instante de tiempo.

Figura 24. Parámetros de intercepto cohesivo de cada mezcla en cada instante de desplazamiento horizontal. Elaboración propia, 2019

Se observa en la figura 24 que para el S100+0%PET su intercepto cohesivo va en aumento por lo menos hasta el 0.25 cm de desplazamiento horizontal para luego reducirse hasta 0.18885 y buscar una tendencia constante de C. Para S100+0.5%PET se observa un aumento progresivo del intercepto cohesivo lo cual da indicios de gran mejora del material de estudio al adicionar el PET, superando la cohesión del S100+0%PET en el esfuerzo residual. Por último, del S100+3.5%PET se observa discontinuidades en la gráfica y verificando que las partículas de esa mezcla no han

logrado un intercepto cohesivo superior al S100+0%PET, pudiendo afirmar que no es una mezcla óptima.

Figura 25. Parámetros de intercepto cohesivo de cada mezcla en cada instante de desplazamiento horizontal. Elaboración propia, 2019

Asimismo, en la Figura 25 para S100+0%PET, el ángulo de fricción interna para el desplazamiento de 0.25 cm es de 12.73° indicando que este valor va en aumento hasta que se consigue un ángulo de 16.18° hasta el desplazamiento de 0.80 cm. Por otro lado, para las demás mezclas se observa que el gráfico no varía mucho ya que todos los ángulos de fricción tienen valores similares en el desplazamiento de 0.70 cm, sólo se observa variaciones al inicio del ensayo siendo estos menores en las mezclas S100+2.5%PET y S100+3.5%PET.

- 5) Es importante considerar las variaciones volumétricas según el tipo de esfuerzo normal aplicado en cada instante de tiempo. Dicho esto, de los resultados de corte directo se analizaron dichas variaciones para cada tipo de muestra, tanto del S100+0%PET como del suelo con sus respectivas adiciones. Se hará hincapié en las muestras de S100+0%PET y en la muestra S100+1.0%PET debido a que es en este último en el cual se empieza a dar una mejora considerable en comparación a las otras adiciones. Asimismo, en la Figura 26 se muestran el desplazamiento horizontal versus la variación de la deformación vertical de la muestra de S100+0%PET para los esfuerzos de confinamiento de 0.5, 1.0 y 2.0 kg/cm². Para dicha mezcla se aprecia que para 0.5 kg/cm² existe un cambio volumétrico

constante, asimismo para 1.0 kg/cm² se observan ligeros reacomodos de las partículas del material de estudio, para el nivel de confinamiento de 2.0 kg/cm² la variación volumétrica cumple con la característica de una arcilla sobre consolidada que tiene la tendencia a expandirse y a mayor confinamiento mayor expansión.

Figura 26. Desplazamiento horizontal vs Variación de la deformación vertical del S100+0%PET para cada esfuerzo de confinamiento aplicado en el tiempo. Elaboración propia, 2019.

A su vez, en la figura 27 se observa que para la mezcla S100+1.0%PET en el esfuerzo de 0.5kg/cm² al inicio de la prueba se observa la contracción del material para que luego siga constante hasta el final del ensayo, para el esfuerzo de 1.0 kg/cm² se evidencia un comportamiento volumétrico uniforme en comparación a los otros niveles de confinamiento, sin embargo para el desplazamiento horizontal de 0.4 centímetros la expansión del material de estudio es un poco más pronunciada y llega a superar la expansión de la muestra a un nivel de confinamiento de 2.0 kg/cm². En cambio, para este último nivel de confinamiento se evidencia una expansión más constante, pero con menor variación de la deformación vertical, mostrando así que para este esfuerzo con respecto a S100+0%PET existe una mejora significativa al adicionar el PET reciclado.

Figura 27. Desplazamiento horizontal vs Variación de la deformación vertical del S100+1.0%PET para cada esfuerzo de confinamiento aplicado en el tiempo. Elaboración propia, 2019.

6) Al calcular la capacidad de carga admisible del suelo y sus porcentajes de adiciones de PET según la fórmula general de Meyerhof se obtuvieron los siguientes resultados, tal como se muestran en la Figura 28:

- ✓ Para el suelo natural, se obtuvo una capacidad de carga admisible de 2.36 kg/cm².
- ✓ Para suelo natural + 0.5% PET, se obtuvo una capacidad de carga admisible de 2.42 kg/cm².
- ✓ Para suelo natural + 1.0% PET, se obtuvo una capacidad de carga admisible de 2.42 kg/cm².
- ✓ Para suelo natural + 2.5% PET, se obtuvo una capacidad de carga admisible de 2.38 kg/cm².
- ✓ Para suelo natural + 3.5% PET, se obtuvo una capacidad de carga admisible de 2.35 kg/cm².

Figura 28. Resultados de Capacidad de carga admisible. Elaboración propia, 2019

Al calcular la capacidad de carga admisible de las muestras de suelo según los parámetros obtenidos del ensayo de corte directo, se concluyó que los resultados presentan un comportamiento de mejora ascendente hasta la adición de 1% de PET. A partir de este porcentaje de adicción, los valores de capacidad de carga admisible disminuyen.

6 CONCLUSIONES

- a) Se logró caracterizar el suelo como un material inorgánico, arcilla de color rojo con blanco de alta plasticidad (CH), mediana compresibilidad y alta expansión con características de drenaje permeable.
- b) Se determinó que el tereftalato de polietileno fue triturado hasta aproximadamente entre 3 a 5 mm. Además, que el 98.57% del material pasa la malla N° 8 lo cual cumplió los requerimientos planteados del trabajo para culminar con la investigación
- c) De la obtención de las curvas de compactación realizadas con el ensayo de Proctor estándar, según la norma ASTM D 698, se evidencia una disminución progresiva de la densidad máxima seca de las muestras con las adiciones de PET, esto es lógico debido a que los contenidos de humedad (%) aumentan en medida que se le adicionan los porcentajes de refuerzo PET a las muestras de suelo.
- d) Se obtuvieron los resultados de las muestras con sus respectivas adiciones de acuerdo con la normativa ASTM D 3080 con lo cual se pudo determinar los parámetros mecánicos de intercepto cohesivo C (kg/cm²) y ángulo de fricción interna ϕ (°), corroborándose con el paper “Compressibility and shearing behavior of clayey soil reinforced by plastic waste” que se evidencia una mejora en el intercepto cohesivo y una disminución del parámetro de ángulo de fricción interna.
- e) Se determinó que en el análisis volumétrico para niveles de confinamiento mayores como el de 2.0 kg/cm² se observa una mejora considerable en el S100+1.0%PET ya que este desarrolla un comportamiento más uniforme y con menor deformación normal en comparación al S100+0%PET. Asimismo, para niveles de confinamiento menores como el de 0.5kg/cm² se observa un aumento considerable de la deformación normal del S100+1.0%PET respecto al S100+0%PET.
- f) En el ensayo de corte directo se determinó que tanto los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, sus resistencias residuales de las distintas mezclas se aproximan a mayores desplazamientos horizontales.
- g) Se determinó que la mezcla S100+1.0%PET contiene el porcentaje de adición óptimo debido a que este adopta un mejor comportamiento reflejado en la determinación de la capacidad de carga admisible y la variación volumétrica en comparación a la mezcla S100+0%PET.

7 RECOMENDACIONES

- a) Como uso adicional, se podría utilizar el tereftalato de polietileno (PET) como agregado fino e investigar si este genera aporte alguno en la rama de construcción. Asimismo, se busca reducir el acumulamiento de estos plásticos, buscarles un nuevo uso y empezar con un aporte significativo al medio ambiente mediante nuevas técnicas utilizadas en la industria de la construcción. En este sentido se puede promover una campaña de reciclaje y así mejorar de cierta manera otros tipos de suelos inestables.
- b) Para futuras investigaciones se recomienda previamente procesar previamente el material de tereftalato de polietileno mediante un lijado con el fin obtener una superficie rugosa para mejorar tanto la adherencia, comportamiento y parámetros mecánicos de las mezclas a ensayar.
- c) Para obtener mayores resultados en cuanto a energía de compactación se puede evaluar las muestras con el ensayo de Proctor modificado para su análisis en zonas de alto tránsito.
- d) Para la obtención de parámetros más reales y evaluar un mejor comportamiento es preferible utilizar el ensayo Triaxial, ya sea en fibras o partículas de PET.
- e) Revisar el mantenimiento y calibración de los equipos a utilizar en los ensayos para obtener resultados más confiables.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sandoval, L. (2010). Informe anual de residuos sólidos municipales y no municipales en el Perú, gestión 2009.
2. Foad Changizi, Abdolhosein Haddad (2015), Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fibre, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 4, 367-378.
3. Mehdi Mirzababaei, Arul Arulrajah, Suksun Horpibulsuk, Mark Aldava (2017), Shear strength of a fibre-reinforced clay at large shear displacement when subjected to different stress histories, *Geotextiles and Geomembranes*, 4, 422-429.
4. Hossein Soltani – Jigheh (2016), Compressibility and Shearing Behavior of Clayey Soil Reinforced by Plastic Waste, *International Journal of Civil Engineering*, 7, 479 – 489
5. Sivrikaya, O., Kiyildi, K. R., & Karaca, Z. (2014). Recycling waste from natural stone processing plants to stabilise clayey soil. *Environmental earth sciences*, 71(10), 4397-4407.
6. Peddaiah, S., Burman, A., & Sreedeeep, S. (2018). Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 2907-2920.
7. Rosales Hurtado, D. (2014). Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras (Doctoral dissertation).
8. Suarez, J. (2009). Deslizamientos: análisis geotécnico. Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS, 340, 341pp.
9. Vettorelo, P., & Clariá, J. J. (2014). Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones. *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 27-34
10. Calderón Ramírez, J. L., & Velosa Hernández, M. A. Análisis de resistencia a la compresión confinada y durabilidad de un suelo arcilloso estabilizado con cal adicionando fibras de material no biodegradable, polietileno de alta densidad (polisombra) reciclada.
11. Diambra, A., Ibraim, E., Russell, A., & Muir, D. (2013). Fibre reinforced sands: from experiments to modelling and beyond. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37, 2427-2455.

12. Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., & Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber. Universidad de Nanjing, Departamento de Ciencias de la Tierra. Nanjing: Geotextiles and Geomembranes.
13. Villalaz, C. (2004). Mecánica de Suelos y Cimentaciones. México: Limusa.
14. Braja, D. (2013). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Cuarta ed.). México: International Thomson.
15. Ministerio del Ambiente. (2015). Mapa de Suceptibilidad Física del Perú. Lima.
16. De Matteis, Á. (2003). Geología y Geotécnica. Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
17. Sistema de Información para la Gestión de Residuos Sólidos. (2015). Informe Anual. Ministerio del Ambiente.
18. Mishra, B., & Gupta, M. K. (2018). Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials*, 190, 95-107.
19. Peddaiah, S., Burman, A., & Sreedeeep, S. (2018). Experimental Study on Effect of Waste Plastic Bottle Strips in Soil Improvement. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 2907-2920.
20. Das, B. M., & Cervantes, S. R. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica (4a. ed.). Mexico, DF: CENGAGE Learning.
21. Gil Carbonell, E. R., & Nuñez Quintana, I. K. (2018). Influencia de la adición de fibras de pet reciclado sobre la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de suelos arcillosos aplicado a la estabilidad de taludes.

9 ANEXOS

Ensayo de granulometría por hidrometría del suelo

En la figura 29 se puede observar la curva granulométrica por hidrometría realizada al suelo arcilloso de alta plasticidad (CH).

Figura 29. Granulometría de la muestra por hidrometría. Elaboración Laboratorio de mecánica de suelos FIC-UNI, 2019

Ensayo de granulometría por tamizado del PET

Para la caracterización física del material de refuerzo (PET) en nuestro suelo arcilloso se realizó el ensayo de granulometría por tamizado, tal como se observa en la figura 30, con el fin de determinar las dimensiones del mismo.

Figura 30. Muestra de PET vertido en las mallas. Elaboración propia, 2019

En la figura 31 y 32 se observa el tamizado para cada una de las mallas y el posterior pesaje de cada una de estas para realizar la curva granulométrica.

Figura 31. Tamizado de la muestra del PET manualmente. Elaboración propia, 2019

Figura 32. Colocación de material en bandejas para posterior pesaje. Elaboración propia, 2019

Ensayo de Límite líquido

En la figura 33 se observa que se está colocando la muestra dentro de la cuchara de casa grande

Figura 33. Colocación de la muestra en la cuchara de Casagrande. Elaboración propia, 2019

En la figura 34 se puede observar que debido al procedimiento de realizar el golpeo a la muestra en la cuchara de casa grande se obtiene un valor de 27 golpes para el rango de 25-30.

Figura 34. Golpeteo de la muestra. Elaboración propia, 2019

Ensayo de Límite plástico

En la Figura 35 se realizaron los rollos para comprobar que el material es plástico, para ello se formaron rollitos de 3mm de diámetro y así determinar su plasticidad.

Figura 35. Elaboración de los rollos. Elaboración propia, 2019

Ensayo de Gravedad específica

Luego de identificar los materiales a utilizar se vierte agua al picnómetro hasta la boca de este y luego se procedió a meter el material y se dejó reposar por 24 horas, como se observa en la Figura 36.

Figura 36. Vertimiento de agua y arcilla al picnómetro. Elaboración propia, 2019

Luego de dejar reposar se mueve el picnómetro con el fin de retirar las últimas burbujas de aire, como se observa en la figura 37.

Figura 37. Eliminación de burbujas de aire. Elaboración propia, 2019

Por último, la muestra queda como en la figura 38, se retira la mezcla y se deja secar en el horno, para su posterior análisis.

Figura 38. Picnómetro sin burbujas de aire. Elaboración propia, 2019

Ensayo de compactación de Proctor estándar

Para el ensayo de compactación de Proctor se utilizaron 3 porcentajes de adición de agua que fueron, 4%, 8% y 12%.

En la figura 39, se realizó un tamizado por la malla 4 para iniciar con el ensayo y así mismo se separó 4 muestras de 3kg cada una.

Figura 39. Tamizado de la muestra para ensayo de Proctor Estándar. Elaboración propia, 2019

En la figura 40 se procedió a la compactación de la primera capa, la cual se realizará los mismos procedimientos para los 3 porcentajes de agua a adicionar.

Figura 40. Compactación de la primera capa del ensayo de Proctor Estándar. Elaboración propia, 2019

En la figura 41 se observa el enrasado de la muestra para luego colocar la mitad de esta en el horno.

Figura 41. Enrasado de la muestra. Elaboración propia, 2019

En la figura 42 se observa el material de estudio, suelo natural y las adiciones de agua en sus distintos porcentajes después de realizar el ensayo de Proctor estándar.

Figura 42. Evidencia del suelo ensayado luego de la compactación de Proctor estándar. Elaboración propia, 2019

En la figura 43, se puede observar la curva de compactación para el suelo natural.

Figura 43. Curva de compactación del suelo natural (S100+0%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 44, se puede observar la curva de compactación para el suelo natural + 0.5%PET.

Figura 44. Curva de compactación del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 45, se puede observar la curva de compactación para el suelo natural + 1.0%PET.

Figura 45. Curva de compactación del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 46, se puede observar la curva de compactación para el suelo natural + 2.5%PET.

Figura 46. Curva de compactación del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 47, se puede observar la curva de compactación para el suelo natural + 3.5%PET.

Figura 47. Curva de compactación del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET). Elaboración propia, 2019

Ensayo de Corte Directo

En la figura 48, se puede observar los resultados del ensayo de corte directo del suelo natural

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA Nº 007966

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S19 - 723-1

SOLICITANTE : ANTHONY ALVAREZ CABRERA
PROYECTO : ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, ADICIONANDO PET RECICLADO
UBICACIÓN : UCAYALI
FECHA : 19 DE AGOSTO 2019

ENSAYO DE CORTE DIRECTO - REFERENCIA ASTM D3080
Procedimiento interno AT-PR.9

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural

Especimen N°	I	II	III
Diametro del anillo (cm)	5.95	5.95	5.95
Altura Inicial de la muestra (cm)	1.90	1.90	1.90
Densidad húmeda inicial (g/cm³)	1.870	1.870	1.870
Densidad seca inicial (g/cm³)	1.457	1.457	1.457
Cont. de humedad inicial (%)	28.4	28.4	28.4
Altura de la muestra antes de aplicar el esfuerzo de corte (cm)	1.89	1.89	1.86
Altura final de la muestra (cm)	1.88	1.87	1.85
Densidad húmeda final (g/cm³)	1.898	1.892	1.875
Densidad seca final (g/cm³)	1.470	1.479	1.494
Cont. de humedad final (%)	29.1	27.9	25.5
Esfuerzo normal (kg/cm²)	0.5	1.0	2.0
Esfuerzo de corte máximo (kg/cm²)	0.331	0.484	0.767
Angulo de fricción interna :	16.2 °		
Cohesión (kg/cm²) :	0.19		

Nota:
Los especímenes se remoldearon con el 90% de la densidad seca del ensayo Próctor Estandar del Informe S19 - 677-1.
Los resultados de los ensayos corresponden a la muestra que fueron proporcionadas por el cliente.
Los datos del solicitante, proyecto, procedencia e identificación fueron indicados por el cliente.

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Aprobación : Ing. D. Basurto R. / Ing. B. Ramirez P.

Ing. Daniel Basurto R.
RESPONSABLE TÉCNICO

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

ABET
Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por
Engineering Technology Accreditation Commission

Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú
Teléfono: (511) 381-3842, Central Telefónica: 481-1070 Anexo 4019
e-mail: lms_fic@uni.edu.pe, lms.servicios@uni.edu.pe

Figura 48. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural (S100+0%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 49, se puede observar las gráficas de deformación tangencial vs esfuerzo de corte y la gráfica esfuerzo de corte vs esfuerzo normal del ensayo de corte directo del suelo natural

Figura 49. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural (S100+0%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 50, se puede observar los resultados del ensayo de corte directo del suelo natural+0.5%PET.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA N° 008051

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S19 - 723-2

SOLICITANTE : ANTHONY ALVAREZ CABRERA
PROYECTO : ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, ADICIONANDO PET RECICLADO
UBICACIÓN : UCAYALI
FECHA : 19 DE AGOSTO 2019

ENSAYO DE CORTE DIRECTO - REFERENCIA ASTM D3080
Procedimiento interno AT-PR.9

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 0.5 % PET

Especimen N°	I	II	III
Diametro del anillo (cm)	5.95	5.95	5.95
Altura inicial de la muestra (cm)	1.90	1.90	1.90
Densidad húmeda inicial (g/cm³)	1.863	1.863	1.863
Densidad seca inicial (g/cm³)	1.451	1.451	1.451
Cont. de humedad inicial (%)	28.4	28.4	28.4
Altura de la muestra antes de aplicar el esfuerzo de corte (cm)	1.89	1.88	1.86
Altura final de la muestra (cm)	1.89	1.88	1.85
Densidad húmeda final (g/cm³)	1.907	1.883	1.882
Densidad seca final (g/cm³)	1.463	1.469	1.488
Cont. de humedad final (%)	30.4	28.2	26.5
Esfuerzo normal (kg/cm²)	0.5	1.0	2.0
Esfuerzo de corte máximo (kg/cm²)	0.334	0.484	0.755
Angulo de fricción interna :	15.6 °		
Cohesión (kg/cm²) :	0.20		

Nota:
Los especímenes se remoldearon con el 90% de la densidad seca del ensayo Próctor Estandar del Informe S19 - 677-2.
Los resultados de los ensayos corresponden a la muestra que fueron proporcionadas por el cliente.
Los datos del solicitante, proyecto, procedencia e identificación fueron indicados por el cliente.

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Aprobación : Ing. D. Basurto R. / Ing. B. Ramírez P.

LABORATORIO N°2
Ing. Daniel Basurto R.
RESPONSABLE TÉCNICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
JEFE LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS

MSc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por
Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú
Teléfono: (511) 381-3842, Central Telefónica: 481-1070 Anexo 4019
e-mail: lms_fic@uni.edu.pe, lms.servicios@uni.edu.pe

ABET
Engineering Technology Accreditation Commission

Figura 50. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 51, se puede observar las gráficas de deformación tangencial vs esfuerzo de corte y la gráfica esfuerzo de corte vs esfuerzo normal del ensayo de corte directo para el suelo natural+0.5%PET.

Figura 51. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 0.5%PET (S100+0.5%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 52, se puede observar los resultados del ensayo de corte directo para el suelo natural+1.0%PET.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA N° 008048

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S19 - 723-3

SOLICITANTE : ANTHONY ALVAREZ CABRERA
PROYECTO : ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, ADICIONANDO PET RECICLADO
UBICACIÓN : UCAYALI
FECHA : 19 DE AGOSTO 2019

ENSAYO DE CORTE DIRECTO - REFERENCIA ASTM D3080
Procedimiento interno AT-PR.9

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 1 % PET

Especimen N°	I	II	III
Diametro del anillo (cm)	5.95	5.95	5.95
Altura Inicial de la muestra (cm)	1.90	1.90	1.90
Densidad húmeda inicial (g/cm ³)	1.855	1.855	1.855
Densidad seca inicial (g/cm ³)	1.445	1.445	1.445
Cont. de humedad inicial (%)	28.4	28.4	28.4
Altura de la muestra antes de aplicar el esfuerzo de corte (cm)	1.89	1.89	1.86
Altura final de la muestra (cm)	1.88	1.88	1.86
Densidad húmeda final (g/cm ³)	1.880	1.879	1.867
Densidad seca final (g/cm ³)	1.460	1.462	1.479
Cont. de humedad final (%)	28.8	28.5	26.2
Esfuerzo normal (kg/cm ²)	0.5	1.0	2.0
Esfuerzo de corte máximo (kg/cm ²)	0.334	0.478	0.755
Angulo de fricción interna :	15.7 °		
Cohesión (kg/cm ²) :	0.20		

Nota:
Los especímenes se remoldearon con el 90% de la densidad seca del ensayo Próctor Estandar del Informe S19 - 677-3.
Los resultados de los ensayos corresponden a la muestra que fueron proporcionadas por el cliente.
Los datos del solicitante, proyecto, procedencia e identificación fueron indicados por el cliente.

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Aprobación : Ing. D. Basurto R. / Ing. B. Ramirez P.

LABORATORIO N°2 - MECÁNICA DE SUELOS
Ing. Dania Basurto R.
RESPONSABLE TÉCNICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
JEFE LABORATORIO N°2 - MECÁNICA DE SUELOS
Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por
ABET
Engineering Technology Accreditation Commission

Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú
Teléfono: (511) 381-3842, Central Telefónica: 481-1070 Anexo 4019
e-mail: lms_fic@uni.edu.pe, lms.servicios@uni.edu.pe

Figura 52. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 53, se puede observar las gráficas de deformación tangencial vs esfuerzo de corte y la gráfica esfuerzo de corte vs esfuerzo normal del ensayo de corte directo para el suelo natural +1.0%PET.

Figura 53. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 1.0%PET (S100+1.0%PET).
Elaboración propia, 2019

En la figura 54, se puede observar los resultados del ensayo de corte directo para el suelo natural+2.5%PET.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA N° 008868

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S19 - 820-1-1

SOLICITANTE : ANTHONY ALVAREZ CABRERA
PROYECTO : ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, ADICIONANDO PET RECICLADO
UBICACIÓN : UCAYALI
FECHA : 10 DE SEPTIEMBRE 2019

ENSAYO DE CORTE DIRECTO - REFERENCIA ASTM D3080
Procedimiento interno AT-PR.9

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 2.5 % PET

Especimen N°	I	II	III
Diametro del anillo (cm)	5.95	5.95	5.95
Altura Inicial de la muestra (cm)	1.87	1.87	1.87
Densidad húmeda inicial (g/cm³)	1.728	1.728	1.728
Densidad seca inicial (g/cm³)	1.345	1.345	1.345
Cont. de humedad inicial (%)	28.4	28.4	28.4
Altura de la muestra antes de aplicar el esfuerzo de corte (cm)	1.85	1.84	1.81
Altura final de la muestra (cm)	1.84	1.83	1.80
Densidad húmeda final (g/cm³)	1.823	1.805	1.800
Densidad seca final (g/cm³)	1.362	1.371	1.393
Cont. de humedad final (%)	33.8	31.7	29.2
Esfuerzo normal (kg/cm²)	0.5	1.0	2.0
Esfuerzo de corte máximo (kg/cm²)	0.325	0.479	0.771
Ángulo de fricción interna :	16.5 °		
Cohesión (kg/cm²) :	0.18		

Nota:
Los especímenes se remoldearon con la densidad del ensayo Próctor Estándar (90%).
Los resultados de los ensayos corresponden a la muestra que fueron proporcionadas por el cliente.
Los datos del solicitante, proyecto, procedencia e identificación fueron indicados por el cliente.

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Aprobación : Ing. D. Basurto R. / Ing. B. Ramirez P.

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Ing. Daniel Basurto R.
RESPONSABLE TÉCNICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO N°2 - MECANICA DE SUELOS
JEFE

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por
Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú
Teléfono: (511) 381-3842, Central Telefónica: 481-1070 Anexo 4019
e-mail: lms_fic@uni.edu.pe, lms.servicios@uni.edu.pe

ABET
Engineering
Technology
Accreditation
Commission

Figura 54. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET). Elaboración propia, 2019

En la figura 55, se puede observar las gráficas de deformación tangencial vs esfuerzo de corte y la gráfica esfuerzo de corte vs esfuerzo normal del ensayo de corte directo para el suelo natural +2.5%PET.

Figura 55. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 2.5%PET (S100+2.5%PET).
Elaboración propia, 2019

En la figura 56, se puede observar los resultados del ensayo de corte directo para el suelo natural+3.5%PET.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA N° 008864

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S19 - 820-2-I

SOLICITANTE : ANTHONY ALVAREZ CABRERA
PROYECTO : ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN SUELO ARCILLOSO EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, ADICIONANDO PET RECICLADO
UBICACIÓN : UCAYALI
FECHA : 10 DE SEPTIEMBRE 2019

ENSAYO DE CORTE DIRECTO - REFERENCIA ASTM D3080
Procedimiento interno AT-PR-9

Estado : Remoldeado (material < Tamiz N° 4)
Muestra : Suelo Natural + 3.5 % PET

Especimen N°	I	II	III
Diámetro del anillo (cm)	5.95	5.95	5.95
Altura inicial de la muestra (cm)	1.87	1.87	1.87
Densidad húmeda inicial (g/cm³)	1.706	1.706	1.706
Densidad seca inicial (g/cm³)	1.329	1.329	1.329
Cont. de humedad inicial (%)	28.4	28.4	28.4
Altura de la muestra antes de aplicar el esfuerzo de corte (cm)	1.85	1.83	1.82
Altura final de la muestra (cm)	1.85	1.82	1.82
Densidad húmeda final (g/cm³)	1.813	1.791	1.785
Densidad seca final (g/cm³)	1.342	1.360	1.365
Cont. de humedad final (%)	35.0	31.7	30.7
Esfuerzo normal (kg/cm²)	0.5	1.0	2.0
Esfuerzo de corte máximo (kg/cm²)	0.319	0.472	0.770
Angulo de fricción interna :	16.7 °		
Cohesión (kg/cm²) :	0.17		

Nota:
Los especímenes se remoldearon con la densidad del ensayo Proctor Estandar (90%).
Los resultados de los ensayos corresponden a la muestra que fueron proporcionadas por el cliente.
Los datos del solicitante, proyecto, procedencia e identificación fueron indicados por el cliente.

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Aprobación : Ing. D. Basurto R. / Ing. B. Ramirez P.

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Ing. Daniel Basurto R.
RESPONSABLE TÉCNICO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
JEFE LABORATORIO MECANICA DE SUELOS

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por

Av. Túpac Amaru 210, Lima 25, Apartado 1301 - Perú
Teléfono: (511) 381-3842, Central Telefónica: 481-1070 Anexo 4019
e-mail: lms_fic@uni.edu.pe, lms.servicios@uni.edu.pe

Engineering Technology Accreditation Commission
ABET

Figura 56. Resultados del ensayo de corte directo del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET). Elaboración propia,2019

En la figura 57, se puede observar las gráficas de deformación tangencial vs esfuerzo de corte y la gráfica esfuerzo de corte vs esfuerzo normal del ensayo de corte directo para el suelo natural +3.5%PET.

Figura 57. Diagramas obtenidos del ensayo de corte directo del suelo natural + 3.5%PET (S100+3.5%PET).
 Elaboración propia, 2019