

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“ADICIÓN DE FIBRAS SINTÉTICAS RECICLADO PARA  
MEJORAR LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE UN  
SUELO ARCILLOSO DE PUENTE PIEDRA.”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**  
JACINTO SEGUNDO CHACON VENTURA

**ASESOR**  
Dr. ZENÓN AGUILAR BARDALES

**Lima - Perú**

**2022**



©2022, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados  
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Jacinto Segundo Chacon Ventura  
Correo: [j.chaconv@uni.pe](mailto:j.chaconv@uni.pe); [jchaconuni@gmail.com](mailto:jchaconuni@gmail.com)  
Teléf.: 981-222-592



## **DEDICATORIA**

A mis padres Jacinto Chacón Huamán y Sonia Ventura Gómez que siempre me apoyaron en la parte económica y moral para la culminación de la tesis.

A mis hermanos y demás familiares en general, por el apoyo incondicional que me brindaron día a día para culminar la tesis.



## **AGRADECIMIENTOS**

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería, y en especial al **Dr. Zenón Aguilar Bardales** por su apoyo en la asesoría para el desarrollo de la investigación. De igual manera a todos los colaboradores del laboratorio geotécnico MARJET ENGINEERING LAB S.A.C quienes me apoyaron con los ensayos de laboratorio para el desarrollo de la tesis.

A los amigos que me apoyaron en calidad de asesoría de la investigación y me apoyaron moralmente para terminar el trabajo de investigación.

ÍNDICE	
<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>PRÓLOGO</b> .....	7
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	8
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS</b> .....	14
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	15
1.1 GENERALIDADES .....	15
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos .....	17
1.4 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL</b> .....	20
2.1 MARCO TEÓRICO .....	20
2.1.1 Suelo arcilloso .....	20
2.1.2 Propiedades principales que poseen las arcillas .....	21
2.1.2.1 Plasticidad .....	21
2.1.2.2 Hidratación e hinchamiento.....	21
2.1.2.3 Tixotropía.....	21
2.1.3 Parámetros mecánicos .....	22
2.1.3.1 Ángulo de Fricción .....	22
2.1.3.2 Cohesión .....	22
2.1.3.3 Resistencia al corte.....	22
2.1.4 Contenido de humedad.....	23
2.1.5 Presión de poros.....	24
2.1.6 Esfuerzos.....	25
2.1.7 Ensayo de compactación Proctor modificado.....	26
2.1.8 Ensayo de compresión no confinada .....	27
2.1.9 Ensayo California Bearing Ratio (CBR).....	28
2.1.10 Polietileno tereftalato (PET) .....	28
2.1.10.1 Definición .....	28
2.2 MARCO CONCEPTUAL .....	29
2.2.1 Comportamiento de los suelos cohesivos .....	29
2.2.2 Problemas en suelos cohesivos.....	30
2.2.3 Técnicas de mejoramiento de suelos .....	31
2.2.3.1 Reforzamiento de suelo .....	31



2.2.4 Adición de fibras a suelos arcillosos.....	32
2.2.5 Interacción suelo-fibra.....	32
2.2.6 Propiedades y características del PET (polietileno tereftalato).....	32
2.2.7 Tipo, contenido y longitud de fibra de refuerzo.....	33
2.2.8 Determinación de los parámetros de resistencia cortante.....	34
2.2.9 Ventajas y aplicaciones.....	34
<b>CAPÍTULO III. MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON FIBRAS SINTÉTICAS</b>	<b>35</b>
3.1 UNIVERSO.....	35
3.2 MUESTRA EN ESTUDIO.....	35
3.3 FIBRAS SINTÉTICAS RECICLADAS (PET).....	36
3.4 REFORZAMIENTO DEL SUELO ARCILLOSO CON FIBRAS SINTÉTICAS	37
<b>CAPÍTULO IV. ENSAYOS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MUESTRA TESTIGO.....	40
4.1.1 Granulometría por tamizado.....	40
4.1.2 Contenido de humedad.....	41
4.1.3 Límite líquido.....	41
4.1.4 Límite plástico.....	41
4.1.5 Índice plástico.....	42
4.1.6 Peso Volumétrico.....	42
4.1.7 Clasificación de suelo.....	42
4.2 ENSAYOS MECÁNICOS.....	43
4.2.1 Ensayo Proctor modificado.....	43
4.2.2 Ensayo de compresión simple no confinada.....	47
4.2.3 Ensayo de California Bearing ratio (CBR).....	48
<b>CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>50</b>
5.1 CLASIFICACIÓN DE SUELO PATRÓN.....	50
5.2 ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO.....	51
5.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE NO CONFINADA.....	54
5.4 ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR).....	56
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>64</b>
ANEXO A: REGISTROS Y PANEL FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DE LA TESIS.....	64

## RESUMEN

En esta investigación se estudió la adición de fibras sintéticas recicladas en un suelo de arcilla de baja plasticidad extraído en la Urb. La Rinconada del Norte ubicado en el distrito de Puente Piedra, Lima, altura del cruce Av. Guardia Civil y la panamericana Norte, como alternativa de solución para reforzar y mejorar los parámetros de resistencia del suelo arcilloso de baja plasticidad. Los suelos arcillosos por lo general tienen baja resistencia cortante y alta compresibilidad, siendo ello un problema para su uso como suelo de cimentación o como material de construcción.

Se realizó la caracterización física de la muestra testigo extraída para clasificar el tipo de suelo y luego el ensayo de Proctor modificado para obtener su máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad. Los resultados de máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad obtenidos del ensayo de Proctor modificado se utilizaron como datos iniciales para los ensayos de compresión no confinada y CBR para determinar su resistencia cortante y capacidad de soporte del suelo. Luego se incorporó 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm y 6cm de longitud al suelo natural, para realizar los ensayos de Proctor modificado y obtener la máxima densidad seca, así como el óptimo contenido de humedad de las diferentes combinaciones de suelo con fibra sintética recicladas. Los resultados obtenidos fueron utilizados como datos iniciales para realizar los ensayos de compresión no confinada y CBR, con el fin de evaluar el desempeño de la resistencia cortante y capacidad de soporte de las muestras que se elaboraron con diferentes porcentajes y longitud de fibras sintéticas recicladas.

Los resultados obtenidos de la caracterización física determinaron que la muestra extraída es un suelo arcilloso de baja plasticidad, que clasifica como CL según el sistema SUCS o un suelo arcilloso de malo a regular índice 5, A-6 según la clasificación AASHTO.

De los resultados del ensayo de CBR al 95% de la MDS se comprobó que la adición de fibras sintéticas mejoró la capacidad de soporte del suelo hasta un 20.2%, lo que representa un incremento del 60.32% de la capacidad del suelo sin refuerzo. Dicho resultado se obtiene de la combinación del suelo con fibras sintéticas que obtuvo el mayor CBR, lo cual ocurre para la combinación de suelo arcilloso con 1% de fibras sintéticas recicladas de longitud 6 cm. Por otro lado, los resultados del ensayo a la compresión no confinada muestran que la incorporación de fibras sintéticas mejora la resistencia al corte hasta en 493.74 Kpa, lo que

representa un incremento del 126.25% de la capacidad del suelo sin refuerzo. Dicho resultado se obtiene de la combinación del suelo con fibras sintéticas que obtuvo el mayor valor de capacidad de corte y esto ocurre para la combinación del suelo arcilloso con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3 cm de longitud.

De los resultados de los ensayos realizados se concluye que 1% es la mejor dosificación óptima de fibras sintéticas recicladas que se debe adicionar al suelo arcilloso para mejorar los parámetros de resistencia del suelo arcilloso. Además, para dicha dosificación óptima se concluyó que cuando la fibra sintética reciclada es 3 cm de longitud, mejoró la resistencia cortante del suelo arcilloso sin reforzar y cuando la fibra sintética reciclada es 6 cm de longitud, mejoró la capacidad de soporte del suelo arcilloso sin reforzar. Por lo tanto, se concluye que el suelo arcilloso reforzado con una dosificación óptima de 1% de fibras sintéticas recicladas pueden ser usados a gran escala como una alternativa de solución para el mejoramiento de suelos.

## ABSTRACT

In the investigation, the addition of recycled synthetic fibers was studied in a low plasticity clay soil extracted in the Urb. La Rinconada del Norte located in the district of Puente Piedra, Lima, height of the intersection Av. Guardia Civil and the Panamericana Norte, as an alternative solution to reinforce and improve the resistance parameters of clay soil with low plasticity. Clay soils generally have low shear strength and high compressibility, which is a problem for their use as foundation soil or as a construction material.

The physical characterization of the extracted control sample was carried out to classify the type of soil and then the modified proctor test to obtain its maximum dry density and optimum moisture content. The results of maximum dry density and optimum moisture content obtained from the modified proctor test were used as initial data for the unconfined compression and CBR tests to determine its shear strength and soil bearing capacity. Then, 0.5%, 1% and 1.5% of recycled synthetic fibers of 3cm and 6cm lengths were incorporated into the natural soil, to carry out the modified proctor tests and obtain the maximum dry density and optimum moisture content of the different combinations of soil with recycled synthetic fiber. The results obtained serve as initial data to carry out the unconfined compression and CBR tests, in order to evaluate the performance of the shear strength and support capacity of the samples that were made with different percentages and lengths of recycled synthetic fibers.

The results obtained from the physical characterization determined that the extracted sample is a clayey soil with low plasticity, which is classified as CL according to the SUCS system or a clayey soil from poor to fair index 5, A-6 according to the AASHTO classification.

From the results of the CBR test at 95% of the MDS, it was found that the addition of synthetic fibers improved the bearing capacity of the soil up to 20.2%, which represents an increase of 60.32% of the capacity of the soil without reinforcement. Said result is obtained from the combination of the soil with synthetic fibers that obtained the highest CBR, which occurs for the combination of clay soil with 1% recycled synthetic fibers of length 6 cm. On the other hand, the results of the unconfined compression test show that the incorporation of synthetic fibers improves shear strength up to 493.74 Kpa, which represents an increase of 126.25% of the capacity of the soil without reinforcement. Said result is obtained from the combination of the soil with synthetic fibers that obtained the highest shear

capacity value and this occurs for the combination of clay soil with 1% recycled synthetic fibers of 3 cm in length.

From the results of the tests carried out, it is concluded that 1% is the best optimal dosage of recycled synthetic fibers that should be added to the clay soil to improve the resistance parameters of the clay soil. In addition, for said optimal dosage, it was concluded that when the recycled synthetic fiber is 3 cm long, it improves the shear strength of the unreinforced clay soil and when the recycled synthetic fiber is 6 cm long, it improves the support capacity of the clay soil without beef up. Therefore, it is concluded that reinforced clay soil with an optimal dosage of 1% recycled synthetic fibers can be used on a large scale as an alternative solution for soil improvement.

## PRÓLOGO

Los suelos finos generalmente presentan serias limitaciones para su uso como material de construcción o como soporte de elementos de cimentación, debido principalmente a su baja capacidad de soporte y su alta compresibilidad. Diversas alternativas de estabilización y de mejoramiento de suelos se han venido investigando con la finalidad de incrementar la resistencia cortante y el comportamiento mecánico de estos suelos. Para este fin es común la adición de aditivos químicos, pero en los últimos tiempos se viene utilizando elementos de refuerzo elaborados principalmente por residuos plásticos reciclados, en especial las fibras recicladas de PET. Precisamente, en esta tesis se analiza el mejoramiento del suelo con dichas fibras, evaluando la influencia de la dosificación y la longitud de los elementos de refuerzo.

Los resultados de los ensayos de laboratorio muestran que la resistencia del suelo se incrementa grandemente cuando es reforzados con las fibras recicladas. Se encuentra que la dosificación óptima para lograr las mayores resistencias es de 1% de fibras recicladas, con longitudes de 3 cm a 6 cm. Los valores de resistencia alcanzados en el suelo reforzado son adecuados para utilizar el suelo arcilloso en la conformación de terraplenes o para la conformación de la subrasante para pavimentos; por lo cual, esta metodología de reforzamiento de suelo puede ser una alternativa para la construcción de este tipo de estructuras en zonas de suelos arcillosos blandos.

Los resultados de esta investigación complementan y dan un mayor sustento a las diversas investigaciones realizadas sobre el uso de este tipo de elementos de refuerzo para el mejoramiento del suelo blando. El principal aporte es la definición de un porcentaje de dosificación óptimo de las fibras recicladas, parámetro que es de mucha importancia en este tipo de mejoramiento de suelos.

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1 Capacidad de intercambio de cationes en minerales de arcilla (Hurtado, 2018) .....	30
Tabla 2 Análisis granulométrico de la muestra patrón por tamizado según ASTM D6913.....	40
Tabla 3 Contenido de humedad muestra patrón según ASTM D2216.....	41
Tabla 4 Límite Líquido muestra patrón .....	41
Tabla 5 Límite plástico muestra patrón .....	42
Tabla 6 Índice plástico muestra patrón.....	42
Tabla 7 Densidad (peso volumétrico) muestra patrón .....	42
Tabla 8 MDS y OCH de suelo patrón .....	46
Tabla 9 MDS Y OCH de suelo patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3cm.....	46
Tabla 10 MDS y OCH de suelo patrón reforzado con fibras sintéticas de 6 cm .	46
Tabla 11 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón .....	47
Tabla 12 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón reforzado con fibras sintéticas 3cm.....	47
Tabla 13 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón reforzado con fibras sintéticas 6cm.....	47
Tabla 14 CBR al 95% de la MDS del suelo patrón .....	48
Tabla 15 CBR al 95% de la MDS del suelo reforzado con diferentes % de adición de fibras sintéticas de 3cm de longitud .....	48
Tabla 16 CBR al 95% de la MDS del suelo reforzado con diferentes % de adición sintéticas recicladas de 6 cm de longitud.....	49
Tabla 17 Resumen de resultados del análisis granulométrico del suelo patrón .	50
Tabla 18 Resultados resumen de ensayo Proctor modificado de la muestra patrón con los diferentes porcentajes de combinaciones de fibras sintéticas.	51
Tabla 19 Resultado resumen ensayo Proctor modificado de muestra patrón	51
Tabla 20 Resultados de esfuerzo último y cohesión de la muestra testigo.....	54
Tabla 21 Esfuerzo último y cohesión muestra patrón con combinaciones de fibras sintéticas de 3cm .....	54
Tabla 22 Esfuerzo último y cohesión muestra patrón con combinación de fibras sintéticas de 6cm .....	55
Tabla 23 Incremento de compresión simple no confinada 3cm y 6cm.....	56

Tabla 24	Resultados de expansión a 96 horas de muestra patrón .....	56
Tabla 25	Resultados de expansión a 96 horas de combinaciones de fibras sintéticas con la muestra patrón .....	56
Tabla 26	Resultado de CBR al 95% de muestra patrón.....	56
Tabla 27	Resultados de CBR al 95% de combinaciones de fibras sintéticas con muestra patrón.....	57
Tabla 28	Incremento de CBR de 3cm y 6cm longitud con respecto al CBR de la muestra patrón .....	58
Tabla 29	Distribución de peso de fibras sintéticas para diferentes dosificaciones y longitudes .....	71



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Disposición tetraédrica (Castro, 2017) .....	20
Figura 2 Disposición hexagonal (Castro, 2017).....	20
Figura 3 Detalle de la disposición de átomos de oxígeno de una lámina aluminica (Castro, 2017).....	21
Figura 4 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb (Suarez, 2009) ....	23
Figura 5 Representación de las zonas de agua en una partícula arcillosa (Carrillo, 2019) .....	23
Figura 6 Influencia de la presión del agua sobre las partículas en suelo saturado y no saturado (Suarez, 2009) .....	25
Figura 7 Esfuerzos totales y efectivos (Suarez, 2009).....	26
Figura 8 Molde para Proctor modificado (Das, 1985) .....	27
Figura 9 Ensayo de compresión no confinada (López, 2015).....	27
Figura 10 Código, propiedades y uso de resinas plásticas (López, 2015).....	29
Figura 11 Arcilla Montmorillonitica (Gil & Nuñez, 2018).....	30
Figura 12 Muestra de arcilla ubicada en el distrito de Puente Piedra, Lima (Paita, 2011) .....	35
Figura 13 Extracción de muestra patrón para 1m de profundidad .....	36
Figura 14 Fibras sintéticas recicladas de 3cm.....	36
Figura 15 fibras sintéticas recicladas de 6cm.....	37
Figura 16 Suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm .....	37
Figura 17 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm.....	37
Figura 18 Suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3cm .....	38
Figura 19 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3cm.....	38
Figura 20 Suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 6cm .....	38
Figura 21 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 6cm.....	38
Figura 22 Suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm .....	38

Figura 23 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm.....	38
Figura 24 Suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm .....	39
Figura 25 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm.....	39
Figura 26 Suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm .....	39
Figura 27 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm.....	39
Figura 28 Curva granulométrica de la muestra patrón .....	41
Figura 29 Curva de compactación del suelo patrón .....	43
Figura 30 Curva de compactación suelo patrón con 0.5% fibras sintéticas de 3cm de longitud .....	44
Figura 31 Curva de compactación suelo patrón con 1% fibras sintéticas de 3cm longitud.....	44
Figura 32 Curva de compactación suelo patrón con 1.5% fibras sintéticas de 3cm longitud.....	44
Figura 33 Curva de compactación suelo patrón con 0.5% fibras sintéticas de 6 cm longitud.....	45
Figura 34 Curva de compactación suelo patrón con 1% fibras sintéticas de 6 cm longitud.....	45
Figura 35 Curva de compactación suelo patrón con 1.5% fibras sintéticas de 6 cm longitud.....	45
Figura 36 Curvas de compactación de suelo arcilloso y sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 3cm de longitud .....	52
Figura 37 Curvas de compactación de suelo arcilloso y sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 6cm .....	52
Figura 38 Curvas de compactación de muestra patrón con 0,5% de fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud .....	53
Figura 39 Curvas de compactación muestra patrón con 1% fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud .....	53
Figura 40 Curvas de compactación de la muestra patrón con 1.5% fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud .....	54

Figura 41 Variación de la cohesión versus la combinación de suelo arcilloso con contenido de fibras sintéticas .....	55
Figura 42 Variación de la curva CBR 95% versus la combinación de fibras sintéticas en la muestra .....	57
Figura 43 Ubicación de la muestra de arcilla en el distrito de Puente Piedra, Lima (Paita, 2011) .....	64
Figura 44 Calicata para extracción de muestra a una profundidad de 1 metro ..	65
Figura 45 Muestra de arcilla recolectada para ensayos de laboratorio .....	65
Figura 46 Fibras sintéticas recicladas (PET) de 6cm de longitud .....	66
Figura 47 Fibras sintéticas recicladas (PET) de 3cm de longitud .....	66
Figura 48 Tamices empleados en el ensayo granulométrico.....	66
Figura 49 Equipo empleado en el ensayo límite líquido .....	67
Figura 50 Barras de muestras 3.2 mm preparadas para el cálculo del límite plástico .....	67
Figura 51 Preparación de muestra para el ensayo de peso volumétrico .....	67
Figura 52 Muestra envuelta con la parafina para ensayo volumétrico .....	67
Figura 53 Peso de muestra patrón para ensayo de proctor modificado.....	68
Figura 54 Preparación de la muestra para el ensayo de proctor modificado ....	68
Figura 55 aplicación de 25 golpes con un pistón la primera capa de la muestra	69
Figura 56 Enrasado del molde con regla metálica.....	69
Figura 57 Peso de la muestra compacta más el molde .....	69
Figura 58 Extracción de muestra para el registro del peso.....	70
Figura 59 Peso de la muestra húmeda más la tara .....	70
Figura 60 Colocación de muestra en el horno para luego determinar la humedad .....	70
Figura 61 Mezcla de muestra natural con 0.5% fibras sintéticas de longitud 6cm para ensayo de proctor modificado .....	72
Figura 62 Colocación de la primera capa de la muestra con 0.5% fibras de Longitud 6 cm en el molde .....	72
Figura 63 Compactación de la primera capa de la muestra con 0.5% fibras de longitud 6cm .....	72
Figura 64 Peso de la muestra con 0.5% de fibras de longitud 6cm mas el molde .....	73
Figura 65 Muestra con 1% fibras sintéticas de longitud 3cm para ensayo de compresión no confinada .....	73

Figura 66 Rotura probeta A de muestra patrón .....	74
Figura 67 Rotura de probeta B de muestra patrón .....	74
Figura 68 Rotura de probeta A y B muestra con 1.5% fibras sintéticas de 6cm .	74
Figura 69 Rotura de probeta A y B muestra con 1.5% fibras sintéticas de 3 cm	75
Figura 70 rotura de probeta A y B muestra con 0.5% fibras sintéticas de 6cm	75
Figura 71 Rotura de probeta A y B muestra con 1% fibras sintéticas de 3cm	75
Figura 72 Rotura de probeta A y B muestra con 1% fibras sintéticas de 6cm.....	76
Figura 73 Rotura de probeta A y B muestra con 0.5% fibras sintéticas de 3cm .	76
Figura 74 Herramienta para el ensayo del CBR.....	76
Figura 75 Pesado de muestra patrón para el ensayo CBR .....	77
Figura 76 Suelo patrón con 1% fibras sintética 3cm de longitud para ensayo CBR .....	77
Figura 77 Muestra patrón con 1% fibras sintéticas 3cm de longitud con humedad al 12.8% .....	77
Figura 78 Suelo patrón con 1% fibras sintéticas 3cm longitud periodo de inmersión 96 horas .....	77
Figura 79 Sistema de Clasificación SUCS (López, 2015).....	78
Figura 80 Sistema de Clasificación AASHTO (Castro, 2017) .....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

°C= Grados centígrados

$\sigma$ =Esfuerzos

$\Delta\mu$  = exceso de presión de poros o deficiencia de presión de poros inducidos

%= Porcentaje

W%= porcentaje de contenido de humedad

AASHTO= American Association of State Highway and transportation officials

CBR= ensayo California Bearing Ratio

Cm= Centímetros

CU= Consolidado no drenado

CD=Consolidado drenado

IP=Índice de Plasticidad

KPa= Presión en Kilo pascal

LL= Limite Liquido

LP= Limite Plástico

m= Metros

mm= Milímetros

MDS= Máxima densidad seca

mw= masa secada en horno.

mD= masa de suelo seco

OCH= Optimo contenido de humedad

OMS= Organización Mundial de la Salud

PET= Polietilentereftalato

PVC= Policloruro de vinilo

Psi= Presión en libras por pulgada cuadrada

SUCS= Sistema Unificado de clasificación de suelos

UU= No consolidado no drenado.

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Los suelos arcillosos, por su baja resistencia cortante y alta compresibilidad, generalmente presentan comportamientos desfavorables para ser utilizados como suelo de cimentación o material de construcción. Muchas investigaciones se han realizado para evaluar este comportamiento, habiéndose propuesto diferentes alternativas de solución para mejorar las características mecánicas de los suelos arcillosos.

La presente investigación se enfocó en el reforzamiento de suelos como una alternativa de solución. Dicha técnica de mejoramiento de suelos consiste en la adición de fibras sintéticas recicladas en diferentes porcentajes y longitudes, con el fin de incrementar y mejorar los parámetros de resistencia cortante y capacidad de resistencia del suelo arcilloso. Para tal fin, se ha tomado como caso de estudio una arcilla extraída de la Urb. La Rinconada del Norte ubicado en el distrito de Puente de Piedra, Lima, altura del cruce Av. Guardia Civil y la panamericana Norte.

La tesis está comprendida en 5 capítulos: el capítulo I describe los antecedentes relacionados a la investigación, la problemática que ocasiona y los objetivos a desarrollar en la tesis. En el capítulo II se describe el marco teórico y conceptual de los suelos arcillosos, sus propiedades principales, parámetros mecánicos, contenido de humedad, esfuerzos, ensayos de laboratorio y las técnicas de mejoramiento de suelos. Asimismo, se describe los conceptos sobre el polietileno tereftalato, que es usado como elemento de refuerzo, sus propiedades y características, ventajas y aplicaciones. El capítulo III describe el desarrollo del trabajo de tesis como: ubicación del proyecto, descripción del proyecto y la utilización de fibras sintéticas recicladas para realizar el mejoramiento de suelo. El capítulo IV menciona los ensayos de laboratorio y los análisis de resultados de los ensayos realizados para determinar los parámetros de resistencia del suelo reforzado con diferentes dosificaciones de fibras recicladas. El capítulo V presenta la discusión de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados en la investigación, donde se analiza las bondades del método de mejoramiento evaluado.

Finalmente se menciona las conclusiones y recomendaciones en base a la ejecución de la presente investigación.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Una gran extensión del distrito de Puente de Piedra, Lima, se encuentra conformado por suelos arcillosos, los cuales presentan baja resistencia cortante y alta compresibilidad, siendo ello un problema para su uso como suelo de cimentación o como material de construcción. Por ello, existe la necesidad de reforzar y mejorar su resistencia cortante y capacidad de soporte que presentan. A partir de lo señalado, en esta investigación se evalúa la técnica de mejoramiento de suelos arcillosos con adición de fibras sintéticas recicladas, con el fin de mejorar su resistencia cortante y capacidad de soporte, que haga viable su uso como suelo de cimentación o material de construcción.

Vettorelo & Clariá (2014) realizaron una investigación acerca de la adición de fibras sintéticas recicladas a suelos arcillosos, obteniendo resultados favorables en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y estabilidad de este tipo de suelo, que muchas veces debido a su baja resistencia de corte y capacidad de soporte hace imposible su uso en las diferentes obras civiles.

López (2015) en su investigación buscó el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, agregando fibras sintéticas recicladas, con lo cual da una posible alternativa de solución a la baja resistencia de corte y capacidad de carga que tienen generalmente los suelos arcillosos. Así mismo, el reciclaje de estos materiales que se generan en las industrias, evita la contaminación ambiental, pues es sabido que la mayoría de estos son arrojados a los ríos, al mar o tienen como disposición final un relleno sanitario, ocasionando un problema negativo al medio ambiente.

Gil & Nuñez (2018) plantearon en su investigación determinar la influencia de la adición de fibras recicladas sobre la resistencia cortante de suelos arcillosos, esto mediante el estudio en el laboratorio con diferentes porcentajes de adición de fibras recicladas de 20mm de longitud, para que luego concluyan que las mezclas de suelo arcilloso con fibras sintéticas mejoran su resistencia cortante. De esta manera contribuyeron con el estudio de una alternativa técnica para la problemática de resistencia cortante que presentan los suelos arcillosos.

### 1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

#### 1.3.1 Objetivo general

Evaluar la adición de fibras sintéticas recicladas para mejorar los parámetros de resistencia de un suelo arcilloso del distrito de Puente Piedra.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar mediante los ensayos de laboratorio de suelos las características físicas y mecánicas del suelo arcilloso en su estado natural, así como del suelo mezclado con diferentes porcentajes de fibras sintéticas recicladas.
- Realizar un análisis comparativo de los parámetros de resistencia del suelo arcilloso en su estado natural con los diferentes porcentajes de dosificación de la fibra sintética reciclada mezclada en dicho suelo, a partir de los ensayos de compresión no confinada y CBR.
- Determinar la dosificación óptima de fibras sintéticas recicladas que se debe adicionar a la muestra natural para mejorar los parámetros de resistencia de un suelo arcilloso.

### 1.4 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Arrelucé & Solís (2021) realizaron una investigación acerca del reforzamiento de suelos arcillosos en base a la incorporación de fibras de polipropileno con la finalidad de incrementar la resistencia y mejorar las características mecánicas del suelo arcilloso de Palian-Huancayo.

La investigación propuso la adición de fibras sintéticas como método de reforzamiento para lo cual se analizó el suelo remoldeado con diferentes porcentajes de fibras adicionadas 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 y una longitud de fibra de 10 milímetros. Se realizaron ensayos de caracterización física para identificar el suelo natural remoldeado: granulometría por sedimentación, límites de consistencia y gravedad específica de los sólidos. Se sometió el suelo natural remoldeado y las mezclas con diferentes porcentajes de fibras a los siguientes ensayos de caracterización mecánica para determinar las variaciones en el comportamiento: Ensayo de compactación estándar, ensayo de corte directo y ensayo de compresión simple. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados demostraron la mejora de las características mecánicas del suelo siendo la mezcla



de 0.4% de fibras de polipropileno la que ofrece un mejor resultado en comparación con las mezclas de menor proporción.

Carrillo (2019) estudio el uso y el reforzamiento de un suelo cohesivo de alta plasticidad extraído del kilómetro 52 de la carretera Trujillo-Otusco, La Libertad. Planteó la adición de fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado al suelo en estudio para su uso en terraplenes de obras viales. El refuerzo del suelo se realizó adicionando aleatoriamente las fibras PET, las cuales fueron distribuidas de manera homogénea en la muestra de suelo. Se realizó la caracterización inicial y luego fue realizado un ensayo de compactación del tipo Proctor estándar para obtener los parámetros de peso específico seco máximo y contenido de agua óptimo para poder realizar el experimento bajo estas condiciones. Se tomó como variables para el suelo fibra-reforzado la longitud y el porcentaje de dosificación. Se utilizaron longitudes de 30 y 60 mm bajo la dosificación de adición 0.4%, 0.8%, 1.2% y 1.5%. Se evaluó el desempeño físico-mecánico de las diferentes combinaciones elaboradas de suelo-fibra, mediante los ensayos de capacidad de soporte relativo y pruebas triaxiales, con confinamientos de 0.5 kg/cm<sup>2</sup>, 1.0 kg/cm<sup>2</sup> y 1.5kg/cm<sup>2</sup>. Con el resultado obtenido de las pruebas se comprobó que el reforzamiento de suelos cohesivos con fibras PET mejoró hasta un 60% la resistencia del suelo y aumentó la capacidad de deformación en un 40%.

Almanza (2015) en su investigación utilizó fibras PET recicladas para el mejoramiento de suelos arcillosos con alto índice de plasticidad, para luego aplicarlo como bordes para protección de ríos. Realizó la caracterización geotécnica del suelo cohesivo, luego de realizar la distribución homogénea en la muestra natural a diferentes proporciones, procedió a los ensayos de resistencia y encontró la dosificación óptima a partir de diferentes porcentajes de adición entre el suelo y las fibras PET de 50 mm. A partir de ello concluye que el reforzamiento de suelos cohesivos con fibras PET incrementa el ángulo de fricción y disminuye la cohesión, asimismo, el análisis de estabilidad y deformación del terraplén con suelo reforzado cumple con los parámetros de seguridad.

López (2015) en su investigación analizó el cambio de la resistencia al corte de un suelo arcilloso cuando se adicionan fibras de materiales de plástico reciclado, para lo cual realizó la caracterización geotécnica del suelo arcilloso, luego elaboró manualmente las fibras PET a partir de botellas recicladas y mezcló el suelo con las fibras PET de 30 mm y 50 mm en proporciones de 0.2%, 0.5%, 1% y 1.5%. Después de realizar los ensayos de proctor modificado y compresión no

confinada, concluyó que existe mayor resistencia al corte con la fibra de longitud de 30 mm y 1.5% en contenido de fibras sintéticas, esto puede ser debido a que las longitudes iguales o mayores a 50 mm con mayor o igual a 1.5% en contenido de fibras no pueden ser compactadas adecuadamente y se desmoronan fácilmente, generando poca adherencia entre las partículas del suelo.

Gil & Nuñez (2018) investigaron la aplicación de fibras sintéticas PET como alternativa para el mejoramiento de la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de un suelo arcilloso de alta plasticidad (CH). El refuerzo del suelo se realizó a través de inclusiones aleatorias de fibras PET recicladas, las cuales fueron distribuidas de manera homogénea en el suelo arcilloso. La Muestra de 120 kg fue extraída del talud lateral derecho ubicado a la altura del kilómetro 172 de la carretera Trujillo-Huamachuco. Se realizó el ensayo de compactación del tipo Proctor Estándar con el fin de obtener los parámetros de densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo para realizar los ensayos experimentales en base a lo determinado anteriormente. se tomó como variable para el suelo reforzado con fibra la dosificación al 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2% y 1.5% del peso seco del suelo en estudio, para una fibra sintética PET reciclada de 20 mm de longitud. Posteriormente se realizó el ensayo triaxial UU con confinamiento de 30, 60, 120 kPa. Los ensayos dieron como resultado que el porcentaje de adición de fibras PET mejoró hasta en un 49.45% la resistencia del suelo; asimismo los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna mejoraron en un 22.28% y 72.73% respectivamente. Determinándose que el 0.6% es el porcentaje óptimo de adición de fibras sintéticas recicladas PET. Finalmente se verifica que las fibras de PET reciclado, al mezclarse de manera homogénea con la muestra, tienen el potencial suficiente para lograr mejorar la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de los suelos arcillosos.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1 Suelo arcilloso

La arcilla se define como aquel sedimento o depósito mineral constituido principalmente de silicato de aluminios hidratados y se caracteriza por adquirir plasticidad cuando es mezclado con el agua. Está compuesta por materiales muy finos, formados por partículas particularmente pequeñas con un tamaño menor a los 0.002 mm.

Los átomos de las arcillas adoptan una disposición laminar. Existen dos variedades de dicha disposición: la silícica y la alumínica. La variedad silícica está compuesta por un átomo de silicio y tres átomos de oxígeno dispuestos en forma de un tetraedro (ver Figura N°1), que al agruparse en patrones hexagonales con otros semejantes constituyen una retícula laminar (ver Figura N°2). (Castro, 2017)

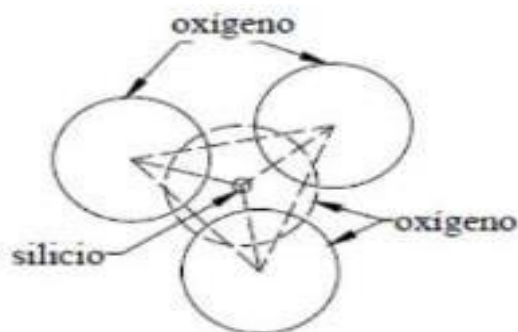


Figura 1 Disposición tetraédrica (Castro, 2017)

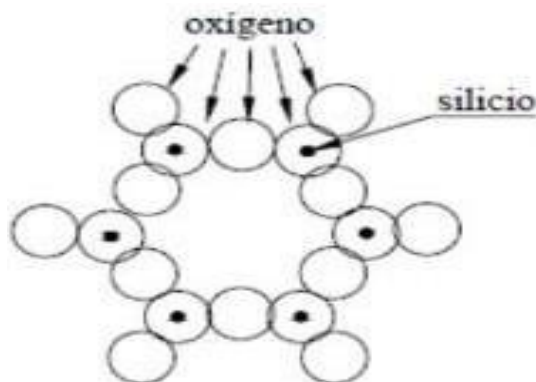


Figura 2 Disposición hexagonal (Castro, 2017)

Por su parte, la variedad aluminica consiste en un átomo de aluminio enlazado con seis átomos de oxígeno formando el conjunto un octaedro (ver Figura 3). Estos se agrupan mediante un átomo de oxígeno para llegar a constituir una redícula laminar. (Castro, 2017)

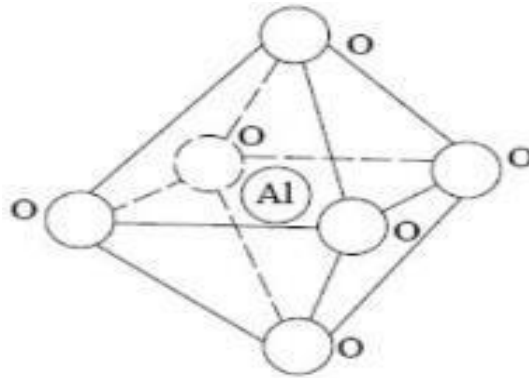


Figura 3 Detalle de la disposición de átomos de oxígeno de una lámina aluminica (Castro, 2017)

## 2.1.2 Propiedades principales que poseen las arcillas

### 2.1.2.1 Plasticidad

La principal característica de los suelos arcillosos es la plasticidad. Esta propiedad se deriva del hecho que el agua al formar una estructura envolvente sobre las partículas laminares genera un efecto lubricante. La propiedad mencionada depende de la morfología laminar y del tamaño de las partículas. La plasticidad puede ser cuantificada aplicando los límites de Atterberg. (Gil & Núñez, 2018)

### 2.1.2.2 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las arcillas. El grado de hidratación está relacionado con la naturaleza del catión interlaminar y con la carga de la lámina. El hinchamiento es producto del ingreso del agua en los espacios interlaminares separando las láminas. La penetración del agua separando las láminas produce también el surgimiento de fuerzas electrostáticas de repulsión acentuando el proceso de hinchamiento hasta llegar a separar por completo unas láminas de otras. (Castro, 2017)

### 2.1.2.3 Tixotropía

Es el fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia de un cuerpo fluido al ser amasado y su recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas llegan a convertirse en líquido al ser amasadas. No obstante, cuando se les deja en reposo

recuperarán su cohesión. Este fenómeno ocurre cuando el contenido de agua del suelo arcilloso está cerca de su límite líquido y, en cambio, cuando dicho contenido alcance el límite plástico no existirá la posibilidad de comportamiento tixotrópico. (Castro, 2017)

### 2.1.3 Parámetros mecánicos

#### 2.1.3.1 Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción está determinado por la inclinación de un plano imaginario y expresa la resistencia al desplazamiento entre una partícula y otra del suelo, antes de que ocurra un deslizamiento entre las dos. Es el ángulo donde la tangente es la relación entre la fuerza de fricción, a lo largo del plano, y la fuerza normal que se aplica en éste. El ángulo de fricción resulta de la fricción existente entre los granos del suelo y la trabazón existente entre ellos. (López, 2015)

#### 2.1.3.2 Cohesión

Se entiende como la adherencia entre las partículas del suelo debida a su mutua atracción en virtud de las fuerzas moleculares y las películas de agua. Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará al cambiar su humedad. Se mide en kg/cm<sup>2</sup>. Los suelos arcillosos tienen una cohesión alta entre 0.25 kg/cm<sup>2</sup> y 1.5 kg/cm<sup>2</sup>. En sentido contrario, los suelos limosos tienen muy poca cohesión en tanto que las arenas no la tienen en absoluto. (Gil & Nuñez, 2018)

#### 2.1.3.3 Resistencia al corte

La propiedad de los suelos para soportar cargas y conservar su estabilidad, depende de la resistencia al corte de los suelos. Cualquier masa de suelo se rompe cuando esta resistencia es superada. Las fuerzas cortantes son fuerzas que se aplican tangencialmente a lo largo del suelo y se determina a partir de la ecuación de Coulomb (ver Figura 4). Dichas fuerzas se miden en Newtons por metro cuadrado o kilogramos por centímetro cuadrado. (Arrelucé, 2021)

De acuerdo con la ecuación de Coulomb:

$$\tau = C + (\sigma - u) * \tan \phi$$

Donde:

$\tau$ : Resistencia al cortante tangencial del suelo

C: Cohesión del suelo

$\sigma$ : Esfuerzo normal al plano de corte

$\mu$ : Presión de poros

$\phi$ : Ángulo de fricción interna.

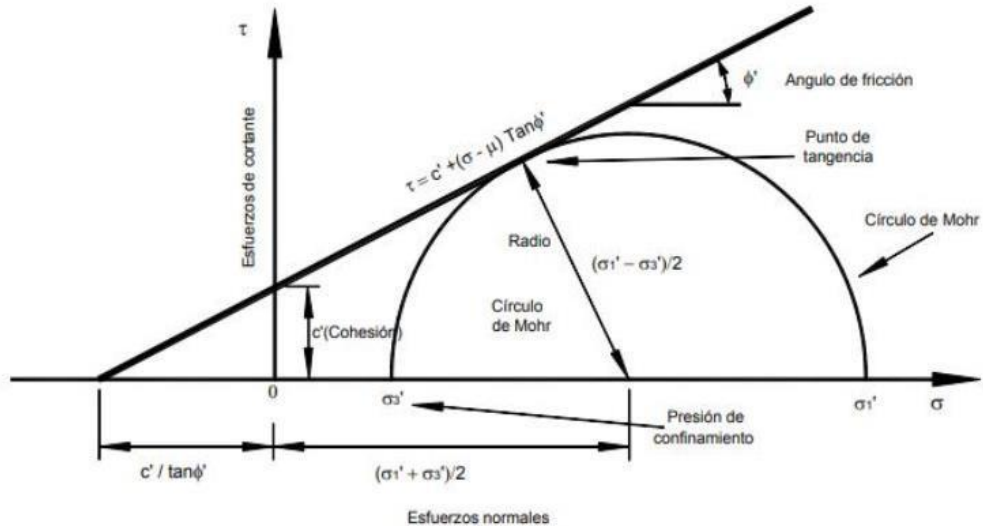


Figura 4 Representación gráfica de la ecuación de Coulomb (Suarez, 2009)

### 2.1.4 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un suelo es la cantidad de agua presente en los espacios/poros existentes entre los granos del suelo. Dicho contenido es factible de ser eliminado por secado en horno a 105-110°C por un periodo de 12-24 horas al cabo del cual se obtiene un suelo seco.

En la Figura 5 se muestra de forma esquemática las cinco zonas que se forman cuando el agua rodea a la partícula de arcilla; las mismas son explicadas líneas abajo.



Figura 5 Representación de las zonas de agua en una partícula arcillosa (Carrillo, 2019)

- 1) Agua absorbida, retenida en la superficie de la partícula por grandes fuerzas de atracciones eléctricas y virtualmente en estado sólido. Esta capa es de un espesor muy pequeño, del orden de  $0.005\mu\text{m}$ . Esta agua no se puede remover por secado en horno a  $110^{\circ}\text{C}$ , por lo que se considera parte del grano del suelo sólido.
- 2) Agua que no está fuertemente retenida y puede ser removida por secado en horno, pero no por secado al aire (humedad higroscópica).
- 3) Agua capilar, retenida por tensión superficial, generalmente removible por secado al aire.
- 4) Agua gravitacional, la cual se puede mover entre los espacios vacíos de los granos del suelo, se remueve por drenaje.
- 5) Agua combinada químicamente. Crea hidratación dentro de la estructura cristalina, exceptuando el yeso y otras arcillas tropicales. Esta agua generalmente no se remueve por secado en horno.

Para los ensayos en el suelo se considera el contenido de humedad que se remueve a  $105\text{-}110^{\circ}\text{C}$ . El agua mencionada en la categoría 1 no se toma en cuenta en la determinación de contenido de humedad. El contenido de humedad se expresa usualmente como porcentaje, pero siempre en base a la masa del suelo secado al horno. Si la masa de agua removida por secado en horno se denota por  $m_w$  y la masa del suelo seco por  $m_D$ , el contenido de agua  $w$  se obtiene por la siguiente ecuación: (Carrillo, 2019)

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

### 2.1.5 Presión de poros

La presión de poros consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo y se la designa con la letra “ $\mu$ ”. La presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre las partículas, trata de separarlas y disminuye la resistencia a la fricción (ver Figura 6). Al colocar una carga se puede producir un cambio en la presión de poros que se denomina como  $\Delta\mu$  (exceso de presión de poros) o déficit de presión de poros cuando es inducido por las condiciones de carga. (Suarez, 2009)

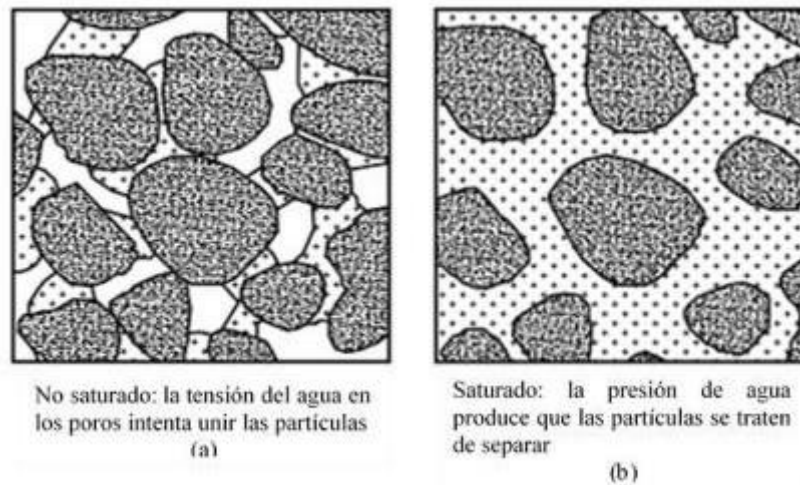


Figura 6 Influencia de la presión del agua sobre las partículas en suelo saturado y no saturado (Suarez, 2009)

### 2.1.6 Esfuerzos

El esfuerzo o presión intergranular se define como la fuerza por unidad de área transferida a las partículas de la masa del suelo. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo, es soportado por la estructura de las partículas y también por la presión del agua (Figura 7).

Típicamente, el esqueleto del suelo puede transmitir esfuerzos normales y de corte por los puntos de contacto entre las partículas. El agua, a su vez, puede ejercer una presión hidrostática de igual valor en todas las direcciones. Los esfuerzos ejercidos únicamente por el esqueleto del suelo se conocen como esfuerzos efectivos y los esfuerzos hidrostáticos del agua reciben la denominación de “presión de poros”. Los esfuerzos efectivos y no los esfuerzos totales son los que controlan el comportamiento del suelo frente al esfuerzo cortante. (Arrelucé, 2021)



Esfuerzo efectivo ( $\sigma'$ ) = esfuerzo total( $\sigma$ ) - presión de poros( $\mu$ )

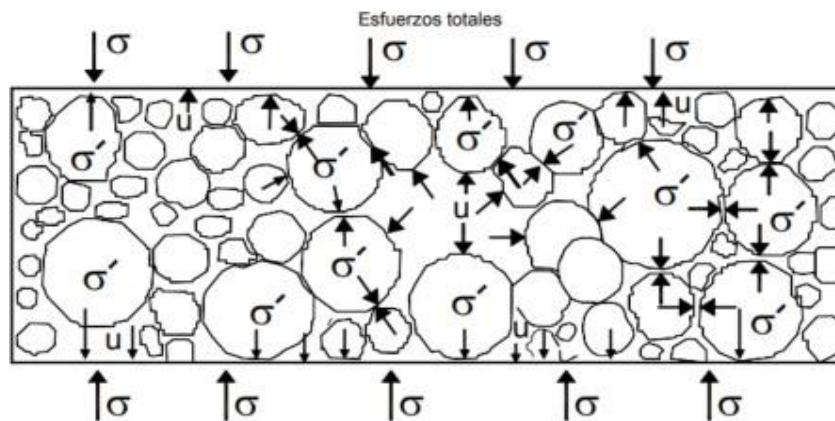


Figura 7 Esfuerzos totales y efectivos (Suarez, 2009)

### 2.1.7 Ensayo de compactación Proctor modificado

El ensayo de Proctor modificado permite determinar la densidad seca máxima de un suelo en relación con su contenido óptimo de humedad, a una energía de compactación establecida. Este ensayo se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz 3/4". Para suelos con peso retenido en el tamiz 3/4" mayor al 30% se realizará el ensayo de Proctor estándar. (Castro, 2017)

Este ensayo fue desarrollado por el ingeniero Ralph R. Proctor y es uno de los procedimientos más usados para el control de la compactación de suelos. Éste consiste en un proceso repetitivo, cuyo objetivo es alcanzar una densidad específica con cierto contenido de agua, con el fin de garantizar y obtener la densidad máxima o requerida del suelo. El ensayo consiste en mezclar el suelo con diferentes cantidades de agua que se colocan compactándolas con un pistón en moldes de medidas específicas (Figura 8). Se registran las humedades y densidades secas correspondientes. Estos valores se colocan en un gráfico cartesiano donde la abscisa corresponde a la humedad (%) y la ordenada a la densidad seca. En este gráfico se determina la densidad seca máxima y con ella la humedad óptima para dicho suelo. (Carrillo, 2019)

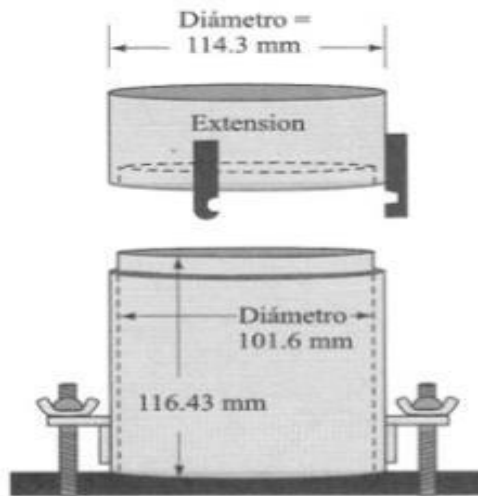


Figura 8 Molde para Proctor modificado (Das, 1985)

### 2.1.8 Ensayo de compresión no confinada

El ensayo de compresión no confinada es un tipo de prueba rápida que se realiza de forma no consolidada y no drenada y es usada comúnmente para especímenes de arcilla. La presión de confinamiento  $\sigma_3$  para este ensayo es igual a cero. Para generar la falla en el espécimen éste será cargado rápidamente por una carga axial. El esfuerzo principal menor es igual a cero y el esfuerzo principal mayor es  $\sigma_1$  (Figura 9), pues en este ensayo la resistencia de corte no drenada es independiente de la presión de confinamiento (López, 2015)

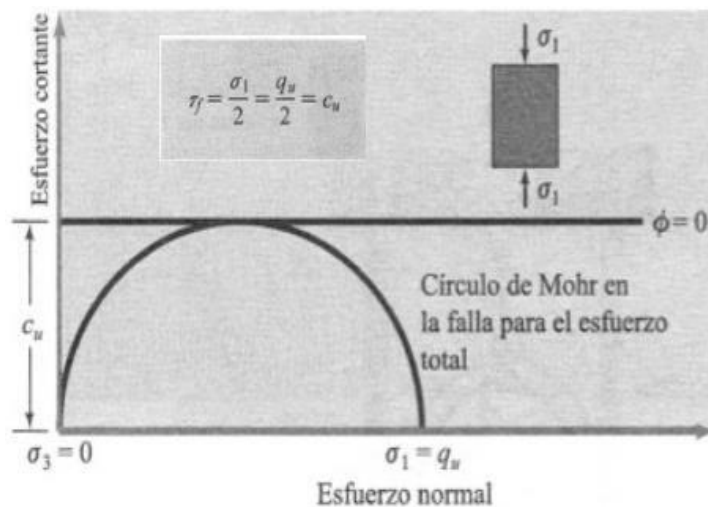


Figura 9 Ensayo de compresión no confinada (López, 2015)

### 2.1.9 Ensayo California Bearing Ratio (CBR)

Este ensayo relativamente simple es uno de los más difundidos y permite conocer la resistencia del suelo. Es mayormente usado para el diseño de pavimentos, evaluando la resistencia potencial en subrasantes, subbases y bases. Este ensayo se realiza sobre un suelo preparado en condiciones de humedad y densidad, aunque también puede realizarse sobre muestras inalteradas obtenidas del terreno.

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1" o 0.2" de penetración, expresada en porcentaje de su respectivo valor estándar.

$$CBR = \frac{\text{Resistencia a la penetración (psi) requerida para penetrar 0.1"}}{1000 \text{ PSI}} \times 100$$

Este ensayo se realiza luego de un periodo de 96 horas de inmersión en agua, para representar la condición más desfavorable del suelo. (Castro, 2017)

### 2.1.10 Polietileno tereftalato (PET)

#### 2.1.10.1 Definición

El PET es un material caracterizado por su gran ligereza y resistencia mecánica a la compresión, alto grado de transparencia y brillo, conserva el sabor y aroma de los alimentos, es una barrera contra los gases, reciclable al 100% y con posibilidad de producir envases reutilizables, desplazando a otros materiales, como el PVC, y experimentando una demanda global creciente. El PET es el material plástico de preferencia para elaborar los envases de bebidas gaseosas y aguas minerales, entre otros. Las botellas son desechables, por lo que su destino suele ser la bolsa de basura y, por extensión, los rellenos sanitarios donde se depositan los residuos domiciliarios. El PET es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. (Zenteno, 2018)

Los polímeros son codificados internacionalmente, para ser identificados y determinar las diferentes resinas plásticas presentes en los envases y facilitar su proceso de reciclaje como artículos para otros usos y aplicaciones. En la Figura 10 se enumeran los diferentes tipos de plástico, su uso y su código. (López, 2015)

Símbolo	Tipo de Plástico	Propiedades	Usos Comunes
 PET	PET PolietilenoTereftalato (Polyethylene Terephthalate)	Contacto alimentario, resistencia física, propiedades térmicas, propiedades barreras, ligereza y resistencia química.	Bebidas, refrescos y agua, envases para alimentos (aderezos, mermeladas, jaleas, cremas, farmacéuticos, etc.)
 HDPE	HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)	Poco flexible, resistente a químicos, opaco, fácil de pigmentar, fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C	Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helados, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.
 PVC	PVC Policloruro de vinilo (Plasticised Polyvinyl Chloride PCV-P)	Es duro, resistente, puede ser claro, puede ser utilizado con solventes, se suaviza a los 80°C. Flexible, claro, elástico, puede ser utilizado con solventes.	Envases para plomería, tuberías, "blister packs", envases en general, mangueras, suelas para zapatos, cables, correas para reloj.
 LDPE	LDPE Polietileno de baja densidad (Low density Polyethylene)	Suave, flexible, translucido, se suaviza a los 70°C, se raya fácilmente.	Película para empaque, bolsas para basura, envases para laboratorio.
 PP	PP Polipropileno (Polypropylene)	Difícil pero aún flexible, se suaviza a los 140°C, translucido, soporta solventes, versátil.	Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico.
 PS	PS Poliestireno (Polystyrene)	Claro, rígido, opaco, se rompe con facilidad, se suaviza a los 95°C. Afectado por grasas y solventes.	Cajas para discos compactos, cubiertos de plástico, imitaciones de cristal, juguetes, envases cosméticos.
 PS-E	PS-E Poliestireno Expandido (Expanded Polystyrene)	Esponjoso, ligero, absorbe energía, mantiene temperaturas	Tazas para bebida calientes, charolas de comida para llevar, envases de hielo seco, empaques para proteger mercancía frágil
 OTHER	OTHER Otros (SAN, ABS, PC, Nylon )	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos.	Auto partes, heladeras, electrónicos, piezas para empaques.

Figura 10 Código, propiedades y uso de resinas plásticas (López, 2015)

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1 Comportamiento de los suelos cohesivos

Los factores medioambientales del área en la que se sitúan los suelos cohesivos juegan un papel importante en el comportamiento de estos mismos. La frecuencia de la lluvia, la tasa de evaporación, así como la profundidad y la actividad de la arcilla, son parámetros importantes a considerar en el desarrollo del estudio de las propiedades ingenieriles del suelo. (Carrillo, 2019)

El mineral arcilloso juega un papel importante en la determinación de la expansión en los suelos expansivos. De los tres tipos principales de minerales arcillosos-illita, kaolinita, montomorillonita-, la última posee la característica de expandirse en una mayor proporción que las otras. El potencial de expandir del mineral depende de

la estructura cristalina de la hoja y la capacidad de cambios de cationes del mineral, como se muestra en Tabla 1. (Hurtado, 2018)

Tabla 1 Capacidad de intercambio de cationes en minerales de arcilla (Hurtado, 2018).

Mineral	Capacidad de cambio de cationes ( mili equivalentes/gramo)
Kaolinita	0.03-0.1
Illita	0.2-0.3
Clorita	0.2-0.3
Attapulgita	0.2- 0.35
Halloysita hidratada	0.4-0.5
Montmorillonita	0.8-1.2

La montmorillonita, que debe su nombre a Montmorrillon, una localidad de Francia, es un mineral que pertenece al grupo de las bentonitas, y que se forma por la interposición indefinida de una lámina alumínica entre dos láminas silícicas (Figura 11), pero cuyas retículas débilmente unidas permiten que el agua pueda penetrar con facilidad en su estructura. Estas arcillas en contacto con el agua sufren una fuerte expansión que provoca inestabilidad en ellas. (Gil & Nuñez, 2018)

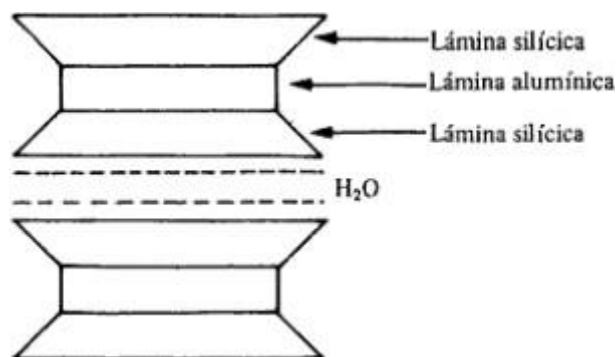


Figura 11 Arcilla Montmorillonitica (Gil & Nuñez, 2018)

### 2.2.2 Problemas en suelos cohesivos

Los suelos cohesivos no cumplen generalmente con los requerimientos necesarios para un proyecto de terraplenes o pavimentación por su baja

capacidad de soporte y mala calidad; debido a su particular naturaleza, este tipo de suelos presentan altas deformaciones e índice de plasticidad, lo que dificulta el trabajo y su uso en obras viales. El suelo expansivo es un problema recurrente en todo el mundo principalmente en regiones áridas. Se han reportado daños causados por estos suelos en regiones tan diversas como África, Australia, Canadá, India, Israel, Rusia, España y los Estados Unidos (Popesc1979); Perú no es la excepción y su presencia se ha detectado en numerosos departamentos como Piura, San Martín, La Libertad, Lima, Loreto, etc. (Carrillo, 2019)

### 2.2.3 Técnicas de mejoramiento de suelos

Las técnicas de mejoramiento de suelos consisten en modificar las características de un suelo por una acción física o por la mezcla del suelo con un material más resistente, a efectos de conseguir:

- Aumento en la capacidad y/o la resistencia al corte.
- Disminución de los asentamientos, tanto absolutos como diferenciales y aceleración cuando sucedan.
- La eliminación o mitigación de los efectos de la licuación de suelos arenosos.
- El mejoramiento de las propiedades del suelo: resistencia mecánica, estabilidad volumétrica, permeabilidad y compresión.

Los ámbitos de aplicación de las distintas técnicas dependen esencialmente de la naturaleza y de la granulometría de los suelos que se desean mejorar, siendo la estabilización y el reforzamiento las principales técnicas utilizadas en suelos arcillosos. (Gil & Núñez, 2018)

#### 2.2.3.1 Reforzamiento de suelo

Consiste en crear un sistema de suelo reforzado in situ por medio de inclusiones en direcciones predeterminadas para mejorar las características de resistencia al corte y la capacidad de carga de un suelo existente. Las tecnologías de reforzamiento de suelo experimentan un aumento constante en las diferentes técnicas de instalación y de materiales de refuerzo que, dependiendo de la aplicación ingenieril, se diseñan para resistir las fuerzas requeridas (tensión, compresión, flexión o sus combinaciones) por encima de la vida útil de la estructura. (Zenteno, 2018)

Generalmente, las fibras reprocesadas o regeneradas (fibras que vuelven a procesarse después de haber pasado por uno o más procesos de fabricación)

tienen precios de mercado inferiores a los de las fibras vírgenes, las cuales tienen las características suficientes para cumplir con los requisitos necesarios para su uso como refuerzo de suelos. (Gil & Nuñez, 2018)

#### 2.2.4 Adición de fibras a suelos arcillosos

Entre las fibras utilizadas como reforzamiento de suelos se encuentran las fibras naturales y sintéticas. Los estudios realizados en suelos cohesivos muestran un aumento en las variables de resistencia al cortante cuando se emplean fibras sintéticas de polietileno. Las fibras sufren esfuerzos de tracción debido al acomodo relativo de los granos de suelo. En consecuencia, el refuerzo con fibras ayuda a la resistencia al corte del suelo a partir de un cierto nivel de deformación. (Vettorelo & Clariá, 2014)

La adición de fibras de polietileno al suelo mejora la resistencia cortante y la capacidad de soporte. Otras de las mejoras son el aumento de la resistencia a la compresión simple no confinada, así como del valor del CBR. Esto es debido a que las fibras de polietileno se adhieren al suelo generando una mayor consistencia. (Carrillo, 2019)

#### 2.2.5 Interacción suelo-fibra

Las fibras adicionadas al suelo causan el aumento de la resistencia al corte de éste, la ductilidad mediante la movilización de su propia resistencia a la tracción cuando el suelo está sometido a tensión externa. La interacción de las fibras con las partículas del suelo se realiza mediante la fricción de la superficie y el enganche; de esta manera, las tensiones normales son transmitidas del suelo a la fibra. Las fibras son envueltas en partículas entrelazadas del suelo, lo que propicia que compartan resistencias y se incremente la fricción entre ambos elementos. (Arreluce, 2021)

#### 2.2.6 Propiedades y características del PET (polietileno tereftalato)

El PET, en general, se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo a 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 y también películas. Su punto de fusión es alto, lo que

facilita su planchado, es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos. (Gil & Nuñez, 2018)

Según (Zenteno, 2018) las características más relevantes son las siguientes:

- Alta transparencia y cristalinidad, aunque admite cargas de colorantes.
- Liviano, permite que una botella pese 20 veces menos que su contenido.
- Alto coeficiente de deslizamiento.
- Alta resistencia química y buenas propiedades térmicas, posee una indeformabilidad al calor.
- Levemente tóxico, liberan antimonio (Sb) por debajo de los límites admisibles por la OMS (20 µg/L)
- Actúa como barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y a la humedad.
- Compatible con otros materiales que mejoran en su conjunto la calidad de barrera que permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Estabilidad a la intemperie.
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad, adecuado para fibras.
- Biodegradación muy lenta.
- Alta resistencia a la corrosión, a esfuerzos permanentes y transitorios.
- Impermeable

#### 2.2.7 Tipo, contenido y longitud de fibra de refuerzo

Son muchas las posibilidades a la hora de seleccionar el tipo de fibra a incluir en el suelo reforzado. Se buscan materiales sintéticos caracterizados por una alta resistencia a los efectos del tiempo. Se utilizan fibras sintéticas provenientes de la reutilización de desechos, tales como fibras de polietileno tereftalato PET, polietileno de alta densidad y fibras de gomas de neumático. Con respecto a los contenidos de fibras usuales en el suelo, se emplea un porcentaje en peso de suelo seco que varía entre el 0.25% y el 3%. Más allá de este límite, el aumento en la resistencia del suelo debido al refuerzo de fibras es prácticamente nulo. Por otro lado, cuando los contenidos de fibras son elevados, resulta difícil obtener una muestra de suelo con fibras distribuidas homogéneamente. (Vettorelo & Clariá, 2016)



### 2.2.8 Determinación de los parámetros de resistencia cortante

Los parámetros de resistencia cortante se determinan experimentalmente mediante ensayos de laboratorio, siendo el ensayo de compresión triaxial UU el más confiable para determinar los parámetros de resistencia cortante de un suelo arcilloso, debido a que se ajusta a las condiciones reales de esfuerzos del suelo. Este ensayo es llevado a cabo sobre especímenes de arcilla. En primer lugar, se aplica sobre el espécimen una presión hidrostática de confinamiento y de inmediato, se falla el suelo con la aplicación controlada de la carga axial, generándose información de esfuerzo axial (esfuerzo desviador) versus deformación hasta que se alcance la máxima resistencia. Se dibujan tres círculos con diferentes valores del esfuerzo principal menor, cuidando que cada ensayo soporte el doble de presión que el anterior y se traza la envolvente Mohr-Coulomb para, finalmente, hallar la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo. (Fresneda *et al*, 2014)

### 2.2.9 Ventajas y aplicaciones

Según (Gil & Núñez, 2018) las ventajas más importantes de mejorar suelos mediante la adición de fibras son:

- El refuerzo de fibras puede realizarse empleando equipos convencionales de construcción. Es posible realizar con métodos tradicionales la compactación del suelo reforzado con fibras, sin correr el riesgo de dañar el refuerzo.
- A diferencia de los materiales geosintéticos, las fibras no requieren, para desplegar la totalidad de su resistencia, de una zona de anclaje extendida.
- A diferencia de otros métodos de refuerzo y/o estabilización, como la adición de cemento o cal, el que contempla la incorporación de fibras obtiene un suelo que no es afectado ni por las condiciones climáticas ni por la presencia de agua.
- Los materiales que pueden ser usados como fibras son de muy bajo costo, haciendo a este tipo de refuerzo altamente competitivo, además se pueden obtener del reciclaje de polímeros PET.

### CAPÍTULO III. MEJORAMIENTO DE SUELO ARCILLOSO CON FIBRAS SINTÉTICAS

En el presente capítulo se describe el procedimiento del desarrollo de la tesis desde cuando se extrajo la muestra patrón hasta la obtención del mejoramiento del suelo arcilloso con fibras sintéticas recicladas al 0.5%, 1.0% y 1.5% de 3cm y 6cm de longitud.

#### 3.1 UNIVERSO

La presente investigación tiene como objeto de estudio muestras de suelo arcilloso provenientes del distrito de Puente Piedra, en Lima.

#### 3.2 MUESTRA EN ESTUDIO

La muestra fue extraída (ver Figura 12) de una locación ubicada en las cercanías del cruce de la Av. Guardia Civil con la Panamericana Norte, en la Urbanización La Rinconada del Norte, Puente Piedra, Lima.

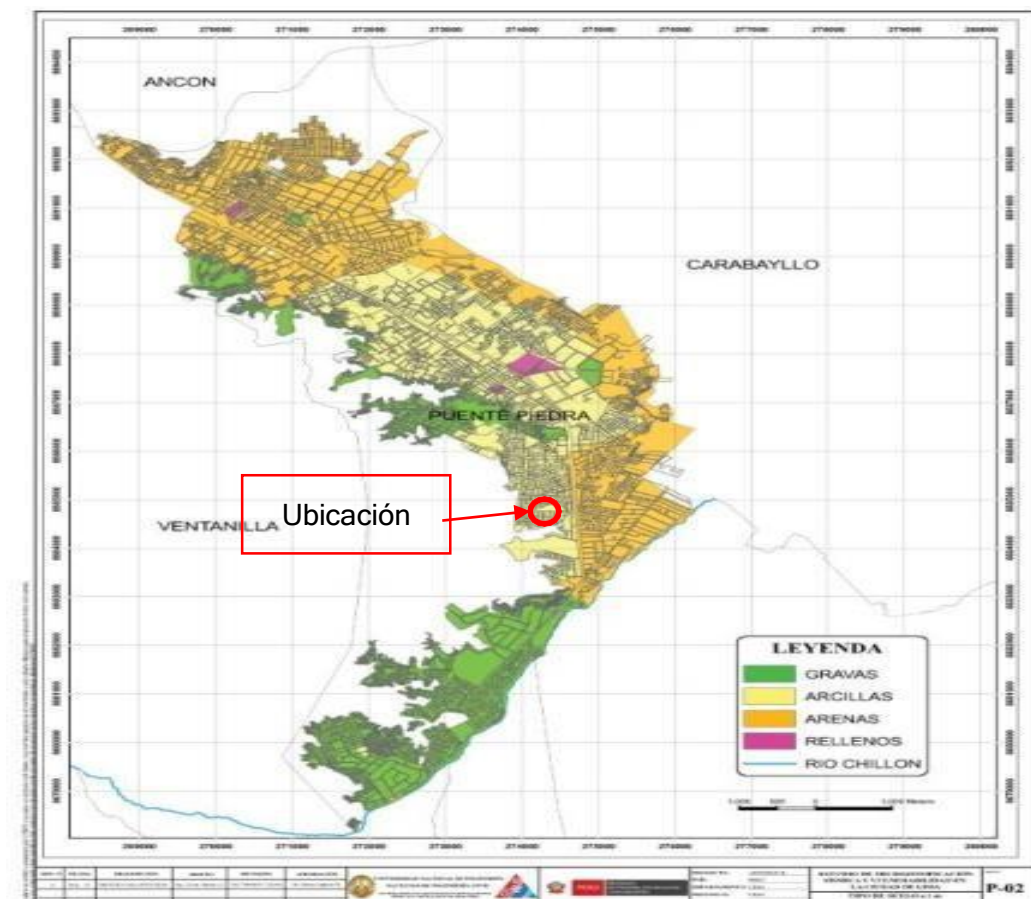


Figura 12 Muestra de arcilla ubicada en el distrito de Puente Piedra, Lima (Paíta, 2011)

Se realizó una calicata con el propósito de obtener una cantidad de muestra de 442.66 kg suficiente (ver Figura 13) a una profundidad 1 m para realizar los diversos ensayos durante el desarrollo experimental.



Figura 13 Extracción de muestra patrón para 1m de profundidad

### 3.3 FIBRAS SINTÉTICAS RECICLADAS (PET)

Se utilizó fibras sintéticas recicladas (PET) con 3 cm y 6 cm de longitud (ver Figura 14 y 15) en porcentajes, en relación al peso seco de la muestra, de 0.5%, 1.0% y 1.5%, con el propósito de evaluar los parámetros de resistencia cortante y capacidad de soporte del suelo arcilloso.



Figura 14 Fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 15 fibras sintéticas recicladas de 6cm

### 3.4 REFORZAMIENTO DEL SUELO ARCILLOSO CON FIBRAS SINTÉTICAS

Para realizar el mejoramiento del suelo con fibras sintéticas en esta investigación se ha utilizado fibras sintéticas de 3 cm y 6 cm de longitud. Se realizó la incorporación de dichas fibras sintéticas en proporciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% a la muestra patrón como se muestran en las Figuras 16, 18, 20, 22, 24 y 26.

Se realizó la elaboración y rotura de las probetas al suelo reforzado con fibras sintéticas al 0.5%, 1%, 1.5% de 3cm y 6cm de longitud (ver Figuras 17, 19, 21, 23, 25 y 27), con el fin de determinar cuál es la dosificación óptima de fibras sintéticas recicladas que se debe incorporar a la muestra patrón para mejorar los parámetros de resistencia cortante y capacidad de soporte del suelo natural.



Figura 16 Suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 17 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 18 Suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 19 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 20 Suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 21 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 22 Suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 23 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 6cm



Figura 24 Suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 25 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 26 Suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm



Figura 27 Rotura de probeta suelo natural reforzado con 0.5% de fibras sintéticas recicladas de 3cm

## CAPÍTULO IV. ENSAYOS DE LABORATORIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra los resultados de los ensayos físicos y mecánicos del suelo natural (muestra de arcilla extraída). Se realizó los ensayos mecánicos del suelo reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3 cm y 6 cm de longitud en proporciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% del peso seco del suelo natural. Los ensayos de laboratorio se realizaron en MARJENT ENGINEERING LAB S.A.C. y de acuerdo a la norma ASTM (American Society for Testing and Materials). Posteriormente se analizó los resultados obtenidos en los ensayos del laboratorio.

### 4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA MUESTRA TESTIGO

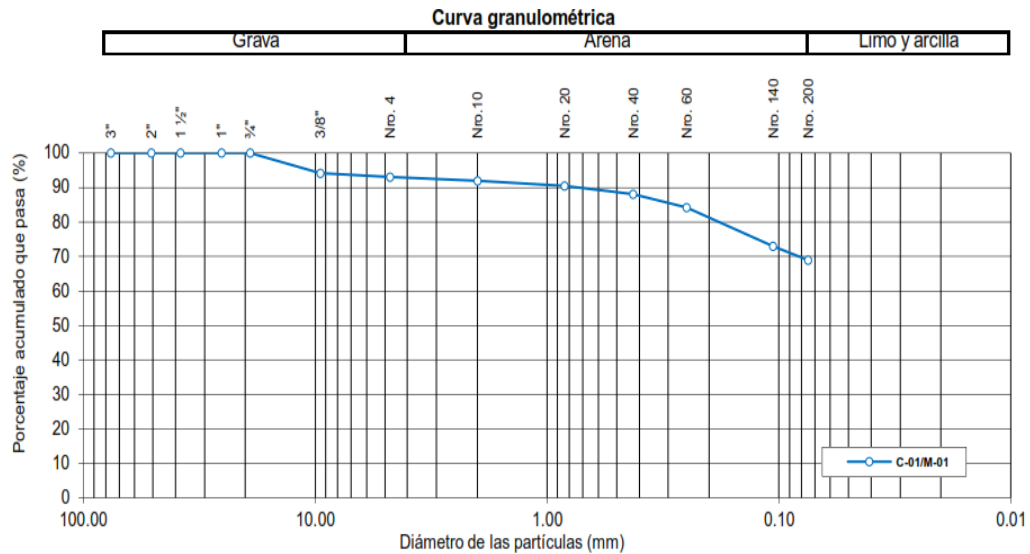
#### 4.1.1 Granulometría por tamizado

El análisis granulométrico por tamizado se realizó bajo la norma ASTM D6913. Dicho ensayo permitió determinar la distribución de tamaño de partículas del suelo mediante la determinación de los porcentajes que pasan por los distintos tamices usados en el ensayo hasta la malla N°200. Los resultados obtenidos de la caracterización física de la muestra testigo se muestran en la Tabla 2 y su curva granulométrica se muestra en la Figura 28.

Tabla 2 Análisis granulométrico de la muestra patrón por tamizado según ASTM D6913

Descripción	Resultado
Contenido de grava	7%
Contenido de arena	24%
Contenido de finos	69%

En la Tabla 2 se observa que la muestra está conformada por 7% de grava, 24% de arena y un 69% de finos, siendo este porcentaje el mayor que presenta la muestra patrón.





entre la palma de la mano y una superficie. En la Tabla 5 se muestra el resultado del ensayo.

Tabla 5 Límite plástico muestra patrón

Descripción	Resultado
Límite plástico (LP)	18

#### 4.1.5 Índice plástico

El ensayo de Índice plástico se realizó bajo la norma ASTM D4318. Este ensayo permite identificar el contenido de humedad del suelo en el que éste permanece antes de cambiar al estado líquido. Se calcula con la fórmula:

Índice plástico= límite líquido- límite plástico.

En la Tabla 6 se muestra el resultado del ensayo.

Tabla 6 Índice plástico muestra patrón

Descripción	Resultado
Límite Líquido (LL)	32%
Límite plástico (LP)	18%
Índice plástico (IP)	14%

#### 4.1.6 Peso Volumétrico

Mediante este ensayo se determinó el peso volumétrico de la muestra patrón a partir de la relación del peso y el volumen de acuerdo con la norma ASTM D7263. El resultado del ensayo se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Densidad (peso volumétrico) muestra patrón

Descripción	Resultado
Densidad suelo seca corregida	16.5 KN/m <sup>3</sup>

#### 4.1.7 Clasificación de suelo

A partir de los resultados indicados en las Tablas 2, 3, 4, 5, 6 y 7 correspondientes a la caracterización física de la muestra patrón y teniendo en cuenta los sistemas de clasificación más utilizados como el AASHTO y el SUCS, se determinó que la

muestra patrón tiene las características propias de un suelo tipo CL de acuerdo a la clasificación SUCS y al grupo de clasificación 5(A-6) según la clasificación AASHTO.

## 4.2 ENSAYOS MECÁNICOS

### 4.2.1 Ensayo Proctor modificado

El ensayo de Proctor modificado se realizó bajo la norma ASTM D1557. Este ensayo permitió determinar la relación entre el peso unitario seco y el contenido de agua. A través de dicha relación se elaboró las gráficas de relación contenido de humedad vs densidad seca del suelo natural y del suelo reforzado con dosificaciones al 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3 cm y 6 cm de longitud para identificar la máxima densidad seca para su correspondiente óptimo contenido de humedad.

Los gráficos de la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH) del suelo natural y el suelo reforzado con dosificaciones al 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3 cm y 6 cm de longitud se muestran en las Figuras 29, 30, 31, 32, 33, 34 y 35.

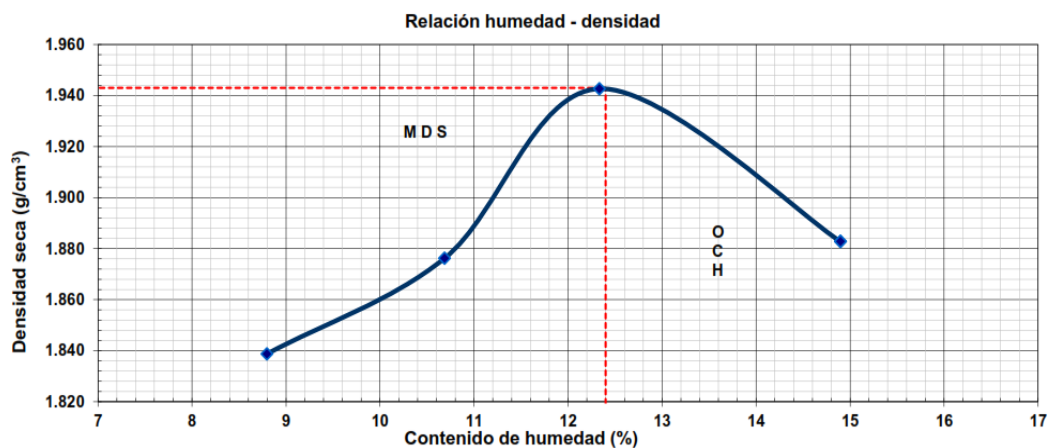


Figura 29 Curva de compactación del suelo patrón

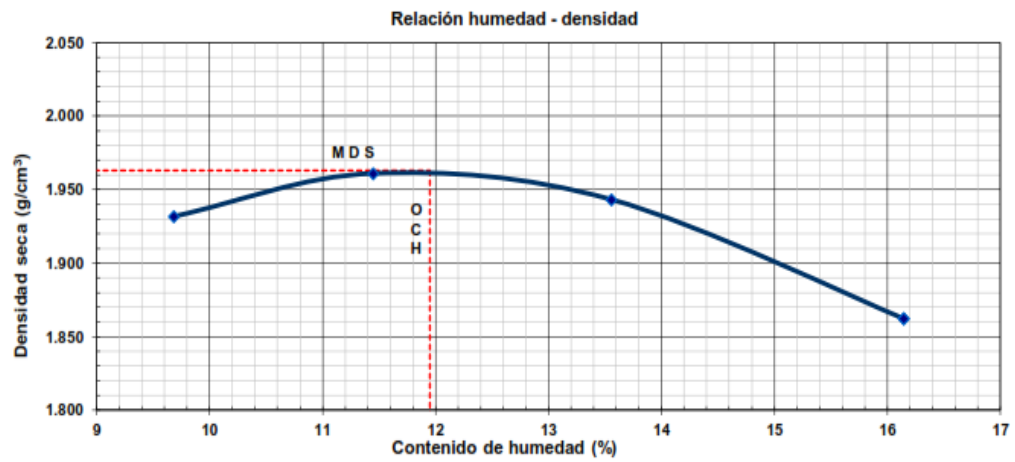


Figura 30 Curva de compactación suelo patrón con 0.5% fibras sintéticas de 3cm de longitud

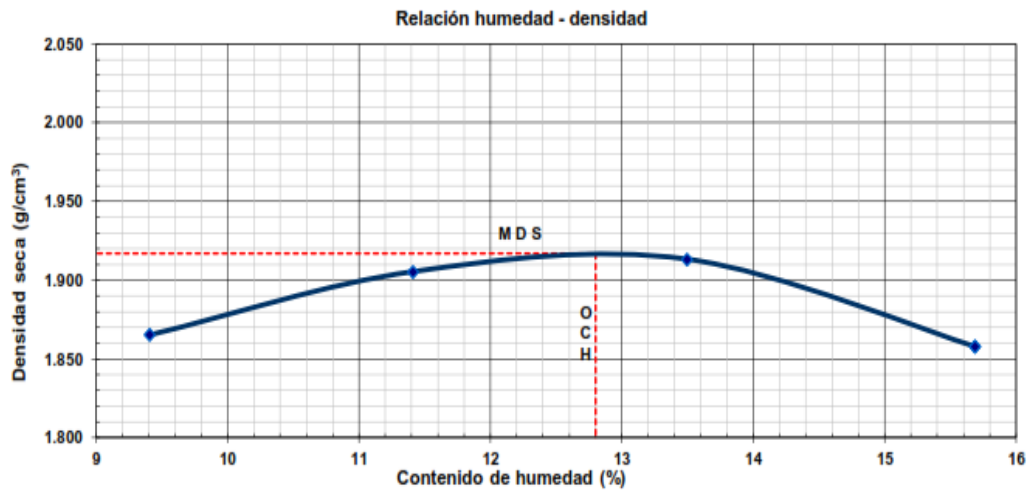


Figura 31 Curva de compactación suelo patrón con 1% fibras sintéticas de 3cm longitud

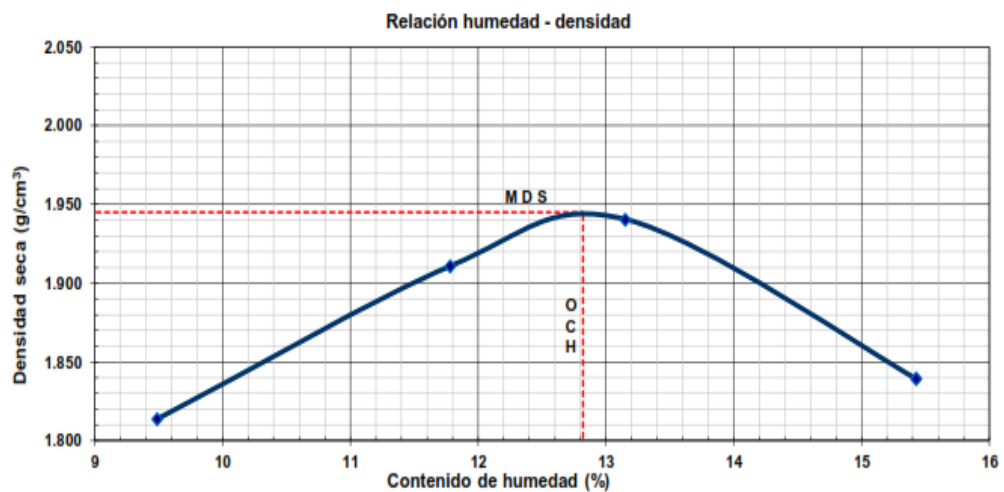


Figura 32 Curva de compactación suelo patrón con 1.5% fibras sintéticas de 3cm longitud

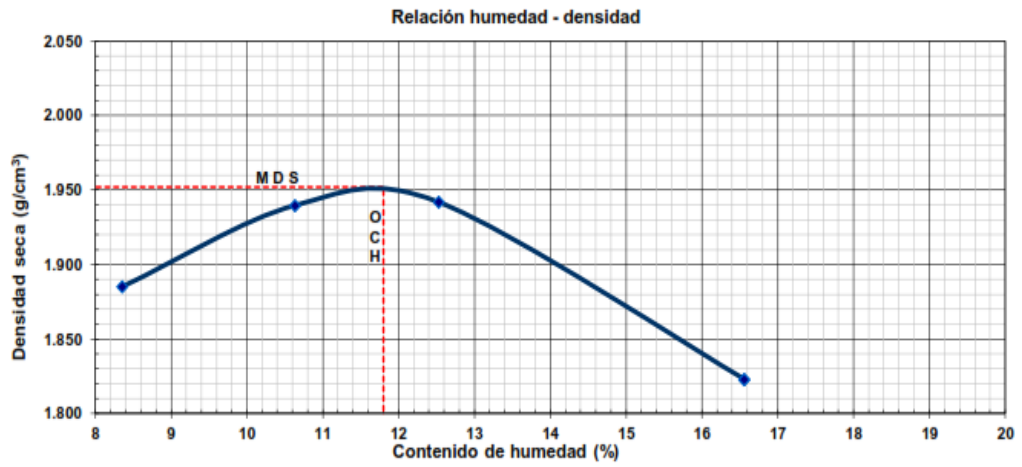


Figura 33 Curva de compactación suelo patrón con 0.5% fibras sintéticas de 6 cm longitud

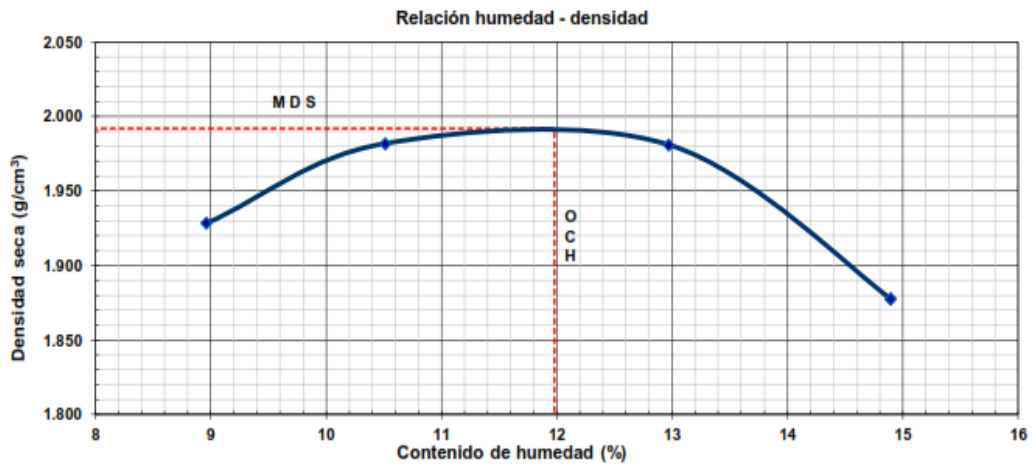


Figura 34 Curva de compactación suelo patrón con 1% fibras sintéticas de 6 cm longitud

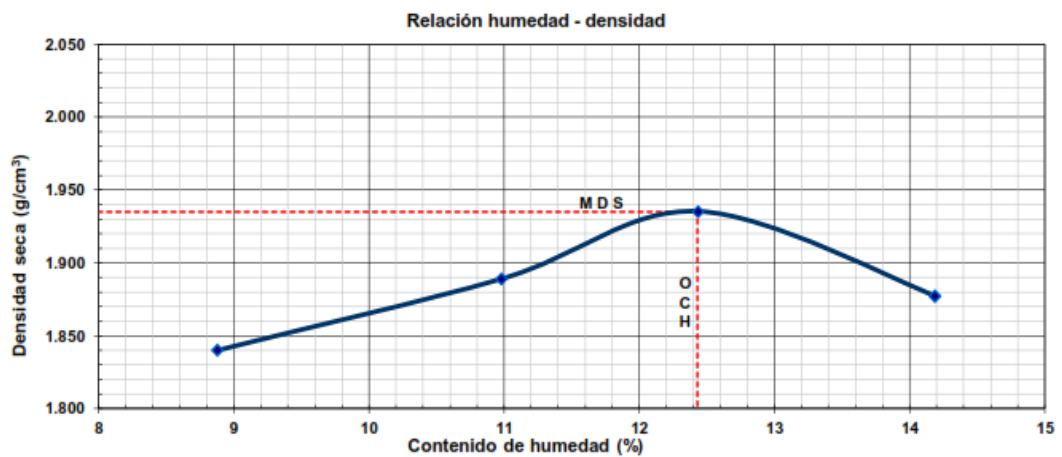


Figura 35 Curva de compactación suelo patrón con 1.5% fibras sintéticas de 6 cm longitud

Los resultados de la máxima densidad seca (MDS) y el óptimo contenido de humedad (OCH) del suelo natural y del suelo reforzado con dosificaciones al 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas recicladas de 3 cm y 6 cm de longitud se muestran en las Tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8 MDS y OCH de suelo patrón

Descripción	MDS (g/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
Muestra patrón	1.943	12.40

Tabla 9 MDS Y OCH de suelo patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3cm

Muestra patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3 cm longitud		
Dosificación	MDS (g/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
0.5%	1.963	11.95
1.0%	1.917	12.80
1.5%	1.945	12.82

Tabla 10 MDS y OCH de suelo patrón reforzado con fibras sintéticas de 6 cm

Muestra patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 6 cm longitud		
Dosificación	MDS (g/cm <sup>3</sup> )	OCH (%)
0.5%	1.952	11.80
1.0%	1.992	11.98
1.5%	1.935	12.43

A partir de los resultados del ensayo de Proctor modificado se pudo conocer la variación de la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo patrón sin fibras sintéticas, en relación al suelo patrón con 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas de 3 cm y 6cm de longitud. Los resultados obtenidos constituyen datos iniciales para realizar posteriormente los ensayos de compresión simple no confinada y CBR.

#### 4.2.2 Ensayo de compresión simple no confinada

El ensayo de compresión simple no confinada se realizó bajo la norma ASTM D2166. A partir de los resultados de la MDS y el OCH del suelo natural y el suelo reforzado con fibras sintéticas recicladas a 0.5%, 1% y 1.5% de 3cm y 6cm de longitud se realizó el ensayo, el cual permitió observar la variación de la curva de los esfuerzos a la compresión no confinada vs deformación del suelo patrón y del suelo reforzado con fibras sintéticas recicladas al 0.5%, 1.0% y 1.5% de 3 cm y 6 cm de longitud.

Los resultados del esfuerzo a la compresión no confinada de la muestra patrón sin fibras sintéticas y con fibras sintéticas al 0.5%, 1% y 1.5% de 3cm y 6cm de longitud se muestran en las Tablas 11, 12 y 13.

Tabla 11 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón

Descripción	$\sigma$ Esfuerzo (kpa)
Muestra patrón	436.47

Tabla 12 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón reforzado con fibras sintéticas 3cm

Muestra patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3 cm longitud	
Dosificación	$\sigma$ Esfuerzo (kpa)
0.5%	847.17
1.0%	987.48
1.5%	869.14

Tabla 13 Esfuerzo a la compresión no confinada suelo patrón reforzado con fibras sintéticas 6cm

Muestra patrón reforzado con fibras sintéticas recicladas de 6 cm longitud	
Dosificación	$\sigma$ Esfuerzo (kpa)
0.5%	827.89
1.0%	914.86
1.5%	902.05

A partir de los resultados indicados en las Tablas 11, 12 y 13 se observó que al adicionar las fibras sintéticas recicladas al suelo patrón el valor del esfuerzo de compresión no confinada va aumentando hasta llegar a un pico máximo para una mezcla de suelo patrón con 1% de fibras sintéticas recicladas de 3 cm de longitud. Posteriormente, al continuar adicionando fibras sintéticas recicladas al suelo

patrón, el valor del esfuerzo de compresión no confinada para las mezclas del suelo patrón con 0.5% y 1.5% de fibras sintéticas de 3 cm y 6 cm de longitud va disminuyendo, respectivamente.

#### 4.2.3 Ensayo de California Bearing ratio (CBR)

Se realizó el ensayo de CBR bajo lo norma ASTM D1883. Este ensayo permitió observar la variación de la capacidad de soporte del suelo versus la densidad seca de la muestra patrón y de la muestra reforzada con fibras sintéticas recicladas al 0.5%, 1%, 1.5% de 3 cm y 6 cm de longitud.

Los resultados de los ensayos de CBR para una densidad seca correspondiente al 95% de la máxima densidad seca del Proctor modificado del suelo patrón sin fibras sintéticas y con fibras sintéticas al 0.5%, 1% y 1.5% de 3cm y 6cm de longitud se muestran en las Tablas 14, 15 y 16.

Tabla 14 CBR al 95% de la MDS del suelo patrón

Descripción	CBR al 95% de la MDS
Suelo patrón( Arcilla )	12.6

Tabla 15 CBR al 95% de la MDS del suelo reforzado con diferentes % de adición de fibras sintéticas de 3cm de longitud

Suelo reforzado con fibras sintéticas recicladas de 3 cm de longitud	
% adición de fibras sintéticas	CBR al 95% de la MDS
0.5	14
1.0	14.8
1.5	12.8

Tabla 16 CBR al 95% de la MDS del suelo reforzado con diferentes % de adición sintéticas recicladas de 6 cm de longitud

---

Suelo reforzado con fibras sintéticas recicladas de 6 cm de longitud

---

% adición de fibras sintéticas	CBR al 95% de la MDS
0.5	14.5
1.0	20.2
1.5	10.4

---

De los resultados indicados en las Tablas 14, 15 y 16 se observó que los valores de CBR para densidades secas correspondientes al 95% de la máxima densidad seca del Proctor modificado obtenido, van aumentando hasta alcanzar un valor máximo para la mezcla del suelo patrón con 1% de fibras sintéticas y 6 cm de longitud, debido a una mejor adherencia entre el suelo patrón y las fibras sintéticas recicladas. Sin embargo, a partir del valor máximo CBR alcanzado, se incrementa el porcentaje de adición de fibras sintéticas recicladas para longitudes de 3 cm y 6 cm a la muestra patrón observando que va disminuyendo el valor del CBR, debido a que una mayor dosificación de fibras sintética recicladas no favorece la adherencia al suelo arcilloso.



## CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 CLASIFICACIÓN DE SUELO PATRÓN

La muestra patrón sometida a un análisis granulométrico y acorde con los resultados obtenidos, según el sistema de clasificación SUCS indicado en la Figura 79, clasifica como CL, correspondiente a un suelo arcilloso de baja plasticidad. En la Tabla 17 se encuentra el resumen de los resultados de la caracterización física del suelo patrón.

Tabla 17 Resumen de resultados del análisis granulométrico del suelo patrón

Descripción	Resultado
Contenido de grava	7%
Contenido de arena	24%
Contenido de finos	69%
Limite Liquido (LL)	32
Limite plástico (LP)	18
Índice plástico (IP)	14
Peso volumétrico suelo seco	16.5 KN/m <sup>3</sup>
Contenido de humedad	16.3%
Clasificación SUCS	CL

Por otro lado, según la clasificación AASHTO mostrada en la Figura 80, el suelo patrón tiene un índice de grupo 5 y grupo de clasificación A-6, correspondiente a un suelo arcilloso de calificación de regular a malo.

## 5.2 ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

De los resultados de la densidad seca y contenido de humedad obtenidos del ensayo de Proctor modificado de la muestra patrón sin fibras sintéticas y con 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas para 3cm y 6cm de longitud, se han elaborado las gráficas de contenido de humedad versus la densidad seca, con el fin de determinar la máxima densidad seca y el contenido óptimo de humedad. En las Tablas 18 y 19 se presenta el resumen de los resultados de los ensayos de Proctor modificado realizados a las combinaciones de las fibras sintéticas recicladas con el suelo patrón y a la muestra arcillosa de baja plasticidad (suelo patrón)

Tabla 18 Resultados resumen de ensayo Proctor modificado de la muestra patrón con los diferentes porcentajes de combinaciones de fibras sintéticas.

% Adición de fibras sintéticas	Proctor Modificado			
	Longitud 3cm		Longitud 6cm	
	OCH(%)	MDS (g/cm <sup>3</sup> )	OCH(%)	MDS (g/cm <sup>3</sup> )
0.5	11.95	1.963	11.80	1.952
1.0	12.80	1.917	11.98	1.992
1.5	12.82	1.945	12.43	1.935

Tabla 19 Resultado resumen ensayo Proctor modificado de muestra patrón

% Adición de fibras sintéticas	Proctor Modificado	
	OCH(%)	MDS (g/cm <sup>3</sup> )
0.0	12.40	1.943

En la Figura 36 se observa que el suelo reforzado con 0.5% y 1.5% de fibras sintéticas de 3 cm de longitud presentan un incremento insignificante en los valores de máxima densidad seca que la muestra de arcilla sin reforzar, por otro lado, el suelo reforzado con 1.0% de fibras de 3 cm de longitud, presenta una máxima densidad seca relativamente menor que la de la arcilla sin reforzar.

Así mismo, en cuanto al óptimo contenido de humedad se observa que las diversas combinaciones porcentuales (0.5%, 1.0% y 1.5%) de fibras sintéticas de 3cm presentan mínimas variaciones respecto al de la muestra de arcilla sin reforzar.

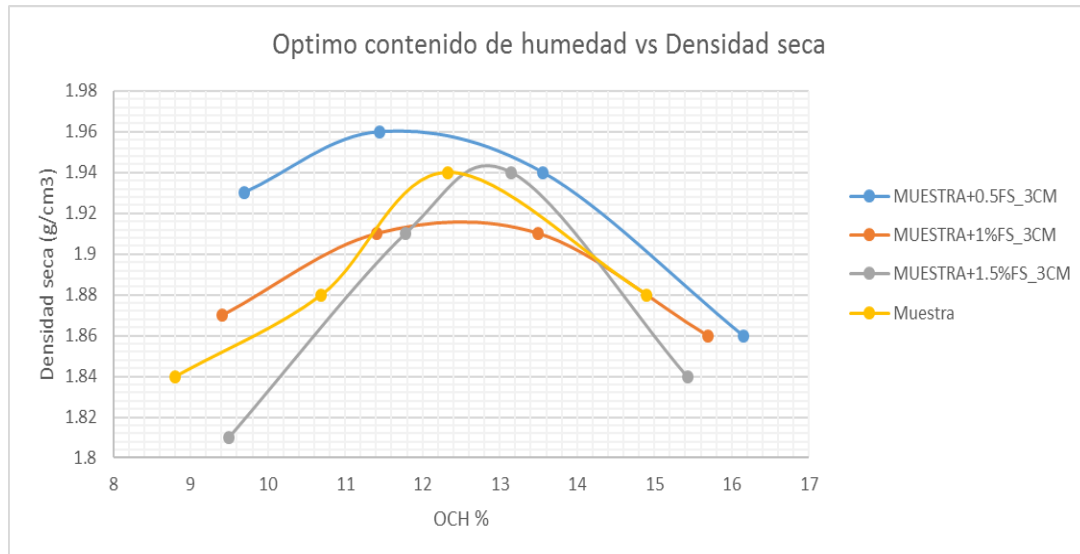


Figura 36 Curvas de compactación de suelo arcilloso y sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 3cm de longitud.

En la Figura 37 se observa que el suelo reforzado con 1% de fibras sintéticas de 6 cm presenta un mínimo incremento en el valor de máxima densidad seca que la muestra de arcilla sin reforzar y las muestras de arcilla con 0.5% y 1.5% de fibras sintéticas de 6cm, que prácticamente tienen el mismo valor que la muestra patrón. Respecto al óptimo contenido de humedad se observa una mínima variación entre las combinaciones porcentuales (0.5%, 1.0%, 1.5%) de fibras sintéticas de 6cm con los resultados de la muestra de arcilla sin reforzar.

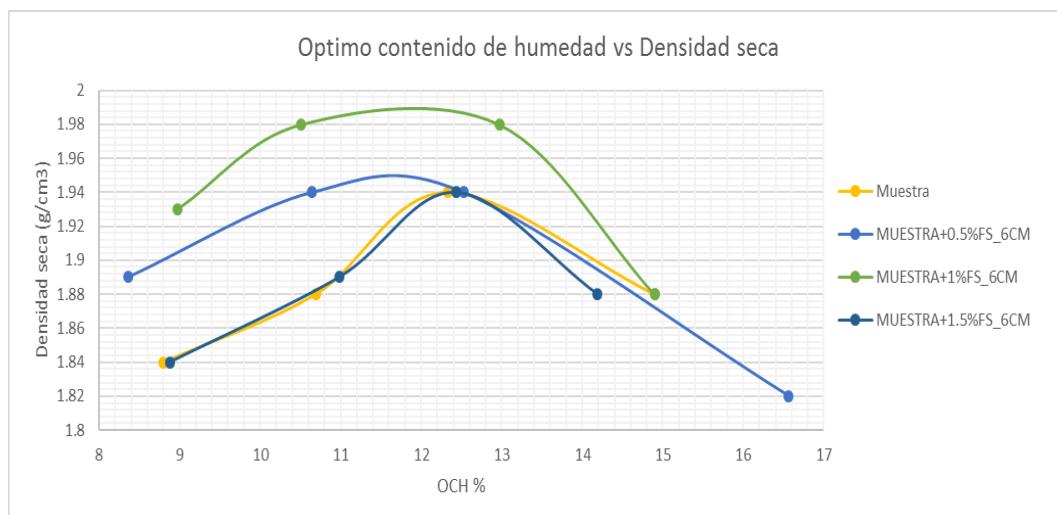


Figura 37 Curvas de compactación de suelo arcilloso y sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 6cm.

En las Figuras 38, 39 y 40 se observan que la máxima densidad seca y el óptimo contenido de humedad presentan una mínima variación entre las combinaciones porcentuales (0.5%, 1.0% y 1.5%) de fibras sintéticas recicladas con los resultados de la muestra de arcilla sin reforzar. Esto ocurre debida a la influencia del cambio de medida de longitud (de 3cm a 6cm) de las fibras sintéticas recicladas.

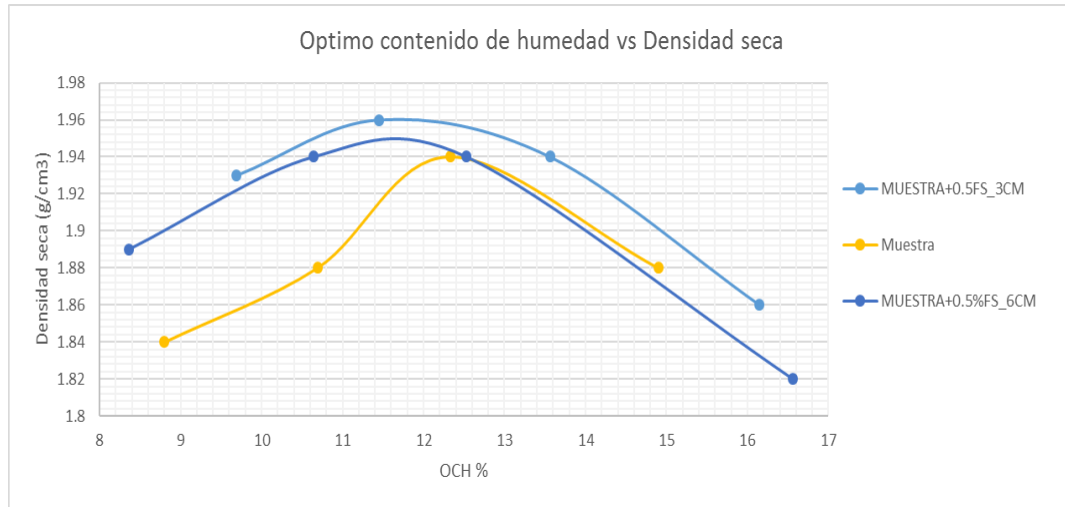


Figura 38 Curvas de compactación de muestra patrón con 0,5% de fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud

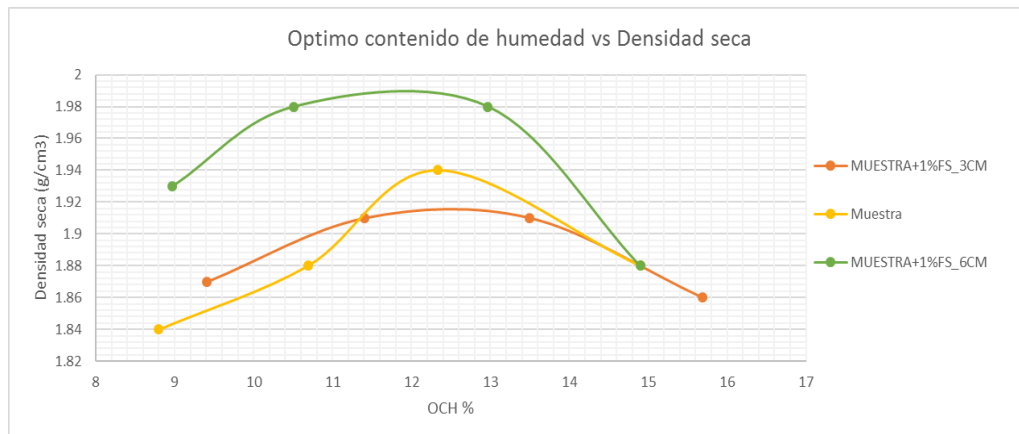


Figura 39 Curvas de compactación muestra patrón con 1% fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud

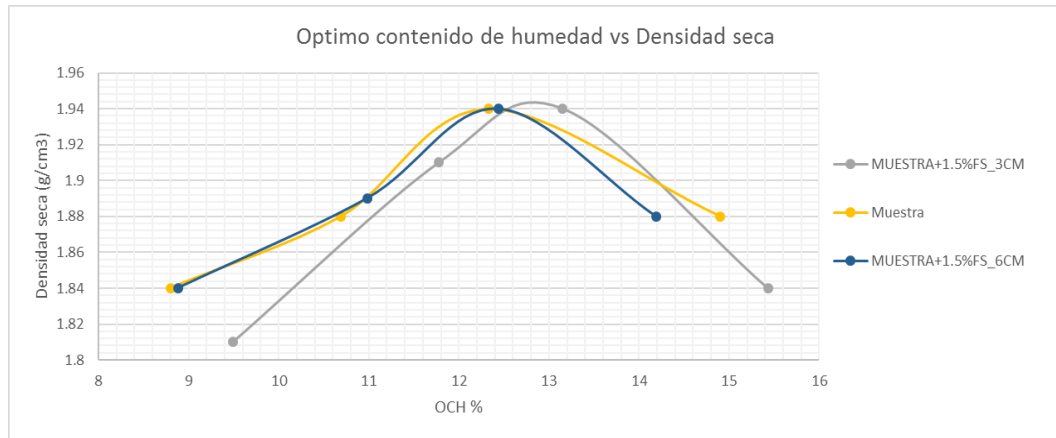


Figura 40 Curvas de compactación de la muestra patrón con 1.5% fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud.

### 5.3 ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE NO CONFINADA

En la Tabla 20 se muestra los resultados del esfuerzo último y cohesión obtenidos del ensayo de compresión no confinada de la muestra testigo; en la Tabla 21 se presenta los resultados de los porcentajes de adición de fibras sintéticas de 3cm de longitud y en la Tabla 22 se muestra los resultados de los porcentajes de adición de fibras sintéticas de 6cm de longitud.

Tabla 20 Resultados de esfuerzo último y cohesión de la muestra testigo

Muestra	Esfuerzo último ( $\sigma$ ) en kpa			Cohesión (Kpa)
	A	B	Promedio	Promedio
Testigo	428.12	444.73	436.47	218.23

Tabla 21 Esfuerzo último y cohesión muestra patrón con combinaciones de fibras sintéticas de 3cm

Muestra	Esfuerzo último ( $\sigma$ ) en Kpa, fibra sintética 3cm			Cohesión (Kpa)
	A	B	Promedio	Promedio
0.5%	869.94	824.41	847.17	423.59
1%	963.83	1011.13	987.48	493.74
1.5%	850.75	887.52	869.14	434.57

Tabla 22 Esfuerzo último y cohesión muestra patrón con combinación de fibras sintéticas de 6cm

Muestra	Esfuerzo último ( $\sigma$ ) en Kpa, fibra sintética 6cm			Cohesión (Kpa)
	A	B	Promedio	Promedio
0.5%	786.16	869.63	827.89	413.95
1%	870.11	959.60	914.86	457.43
1.5%	926.99	877.12	902.05	451.03

En la Figura 41 se aprecia el comportamiento de la cohesión respecto al porcentaje de fibras sintéticas, donde se observa que la cohesión alcanza su valor máximo para 1% de fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud después de lo cual comienza a disminuir su valor. Asimismo, la cohesión para el 1% de fibras sintéticas de 3cm es mayor que para el 1% de fibras de 6cm. Esto ocurre debido a la influencia de las fibras sintéticas recicladas al incorporarse a la muestra de arcilla permitiendo una mejor consistencia y mayor cohesión.

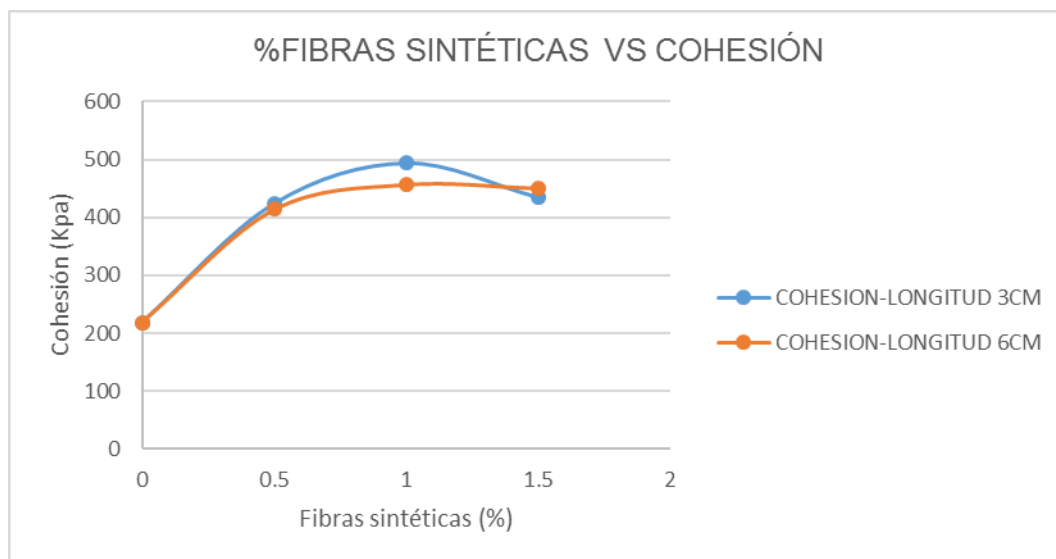


Figura 41 Variación de la cohesión versus la combinación de suelo arcilloso con contenido de fibras sintéticas

La compresión simple no confinada de la arcilla reforzada con las combinaciones porcentuales (0.5%, 1% y 1.5%) de fibras sintéticas de 3cm y 6cm se incrementan con respecto a los resultados de la muestra de arcilla sin reforzar. Dichos incrementos se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23 Incremento de compresión simple no confinada sintéticas 3cm y 6cm

% adición de fibras sintéticas	Longitud 3cm incremento (%)	Longitud 6cm incremento (%)
0.5	94.10	89.69
1.0	126.25	109.61
1.5	99.13	106.68

#### 5.4 ENSAYO DE CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

En las Tablas 24 y 25 se muestran los resultados de la expansión del suelo patrón con sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 3cm y 6cm. Se observa una leve variación de expansión a las 96 horas, debido a la influencia de la cantidad de fibras sintéticas que se adicionan a la muestra patrón de arcilla.

Tabla 24 Resultados de expansión a 96 horas de muestra patrón

Muestra	Expansión 96 horas (%)
Patrón( Arcilla )	0.70

Tabla 25 Resultados de expansión a 96 horas de combinaciones de fibras sintéticas con la muestra patrón

% Adición de fibras sintéticas	Expansión a 96 horas (%)	
	Longitud 3cm	Longitud 6cm
0.5	1.10	1.50
1	1.07	1.20
1.5	1.07	0.53

En las Tablas 26 y 27 se presentan los resultados de los CBR al 95% correspondiente a la muestra de arcilla y a sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas de 3cm y 6cm, respectivamente.

Tabla 26 Resultado de CBR al 95% de muestra patrón

Muestra	CBR al 95% de la MDS
Patrón( Arcilla )	12.6

Tabla 27 Resultados de CBR al 95% de combinaciones de fibras sintéticas con muestra patrón

% Adición de fibras sintéticas	CBR al 95% de la MDS	
	Longitud 3cm	Longitud 6cm
0.5	14	14.5
1	14.8	20.2
1.5	12.8	10.4

En la Figura 42 se observa que el valor del CBR al 95% se va incrementando hasta alcanzar un valor máximo de 14.8% para el suelo reforzado de combinación 1% de fibras sintéticas y 3cm de longitud, es decir un cambio desde 12.6% a 14.8% en la capacidad de soporte del suelo arcilloso. Se observa que el CBR al 95% disminuye su valor para mayores porcentajes al 1.0% de fibras sintéticas y 3cm de longitud. Por otro lado, el CBR al 95% aumenta hasta alcanzar un valor máximo de 20.2% para el suelo reforzado de combinación 1% de fibra sintética y 6cm de longitud, es decir un aumento desde 12.6% a 20.2% en la capacidad de soporte del suelo arcilloso; después el valor del CBR al 95% disminuye para porcentajes mayores al 1.0% de fibras sintéticas y 6cm de longitud.

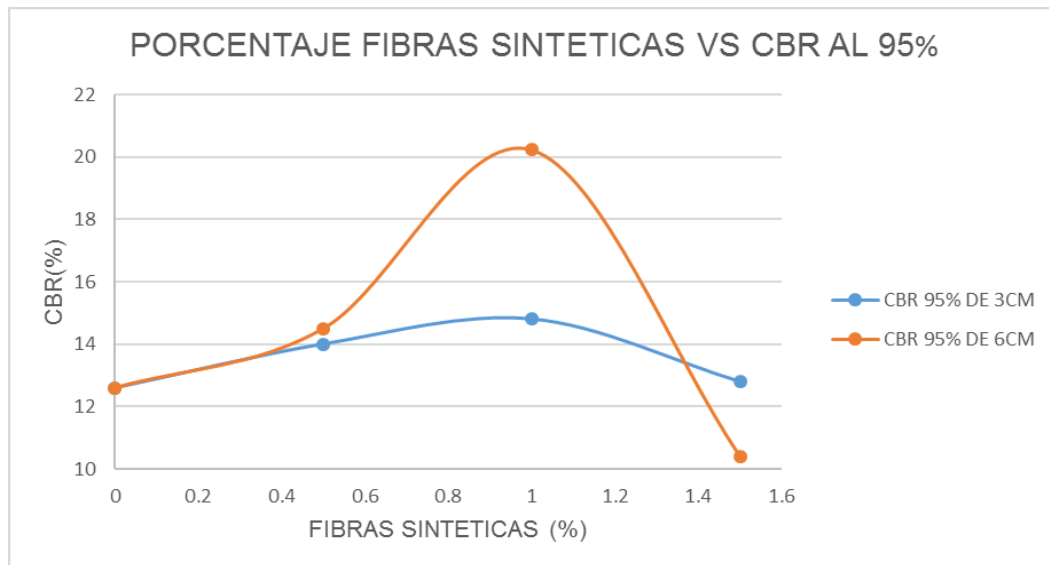


Figura 42 Variación de la curva CBR 95% versus la combinación de fibras sintéticas en la muestra

A continuación, en la Tabla 28 se muestra cómo influye en la capacidad de soporte del suelo arcilloso no reforzado con fibras sintéticas la incorporación en diversos porcentajes de fibras sintéticas recicladas al suelo arcilloso.



Tabla 28 Incremento de CBR de 3cm y 6cm longitud con respecto al CBR de la muestra patrón

% adición de fibras sintéticas	Longitud 3cm incremento (%)	Longitud 6cm incremento (%)
0.5	11.11	15.08
1.0	17.46	60.32
1.5	1.59	-17.46

Del análisis de resultados se concluye que 1% es la dosificación óptima de fibras sintéticas recicladas que se debe adicionar al suelo arcilloso, para el cual se obtiene un incremento hasta 126.25% en la resistencia de corte del suelo arcilloso sin reforzar para la muestra de suelo reforzada con fibra de 3 cm de longitud y un aumento de hasta 60.32% la capacidad de soporte del suelo arcilloso sin reforzar para la muestra de suelo reforzada con fibra de 6 cm de longitud.

## CONCLUSIONES

De la investigación se concluye lo siguiente:

- A partir del ensayo granulométrico se determinó que, según el sistema SUCS de clasificación de suelos, la muestra de suelo extraída en la Urb. La Rinconada del Norte, Puente Piedra, Lima, es del tipo CL correspondiente a un suelo arcilloso de baja plasticidad y, de acuerdo a la clasificación AASHTO, es de índice 5 y grupo de calificación A-6, correspondiente a un suelo arcilloso de calificación de malo a regular.
- Los ensayos de Proctor modificado de las muestras de arcilla combinadas homogéneamente con 0.5%, 1% y 1.5% de fibras sintéticas de 3cm y 6cm muestran que la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad del suelo patrón y con sus respectivas combinaciones de fibras sintéticas varían mínimamente al adicionar fibras sintéticas al 0.5%, 1% y 1.5% para longitudes de 3cm y 6cm. Dichos resultados serán útiles como datos iniciales para los ensayos de compresión simple no confinada y CBR. Por otra parte, se concluye que a mayor dosificación y longitud de fibras sintéticas el proceso de homogenizar la muestra con las fibras se complica considerablemente.
- Comparando los resultados de la compresión simple no confinada y CBR al 95% entre el suelo arcilloso y el suelo arcilloso reforzado con fibras al 0.5%, 1% y 1.5% de 3cm y 6cm, se observó un incremento en dichos parámetros hasta alcanzar valores máximos para una dosificación de 1% de fibras sintéticas. Esto quiere decir, que la compresión simple no confinada aumenta hasta alcanzar valores máximos de 987.48 Kpa y 914.86 Kpa para 1.0% en dosificación de fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud respectivamente, los cuales son superiores a los 436.47 Kpa de la muestra de arcilla sin reforzar. Idéntico patrón se reproduce en el CBR al 95% que llega a alcanzar valores de 14.8% y 20.2% para la dosificación de 1%, notoriamente superiores al 12.6% de la muestra de arcilla sin reforzar. Posteriormente tanto la compresión simple no confinada como el CBR al 95% van disminuyendo según se va incrementando el porcentaje de fibras sintéticas de 3cm y 6cm de longitud.

- Se encontró que el mayor incremento en el valor de la compresión simple no confinada se obtiene para la combinación del suelo reforzado con 1% de fibras sintéticas de 3cm, donde la cohesión aumentó de 436.47 Kpa hasta 987.48 Kpa, mientras que para las de 0.5% y 1.5% las compresiones simples no confinadas son relativamente menores. El CBR al 95% de la máxima densidad seca alcanzó su máximo valor para la combinación del suelo reforzado con 1% de fibras sintéticas de 6cm aumentando desde 12.6% hasta 20.2%, mientras para 0.5% y 1.5% se obtienen valores relativamente menores. Por lo tanto, se concluye que la adición de 1.0 % de fibras sintéticas recicladas es la dosificación óptima para mejorar los parámetros de resistencia del suelo arcilloso.

## RECOMENDACIONES

De la presente investigación se desprenden las siguientes recomendaciones:

- Basados en que la presente investigación demuestra que la adición de fibras sintéticas a la muestra de arcilla mejora los parámetros de resistencia del suelo; por lo tanto, se recomienda realizar investigaciones con el mismo enfoque en suelos diferentes, así como para diferentes tipos de formas de fibras sintéticas recicladas.
- Para combinaciones de muestra con fibras sintéticas recicladas no es recomendable el empleo de fibras sintéticas en dosificaciones superiores al 1.5% y 6cm de longitud, porque la mezcla manual de la muestra con las fibras sintéticas es más complicada. Además, se hace difícil la manipulación y el moldeo en las probetas.
- Realizar el estudio con el ensayo de compresión triaxial no consolidado no drenado (UU) para arcilla por ser el que más se ajusta a las condiciones reales del suelo in situ, sin embargo, su realización no es viable cuando se adicionan fibras sintéticas de forma alargada, pues éstas rompen la membrana látex del espécimen de ensayo.
- A partir de los resultados de los parámetros de resistencia del suelo arcilloso reforzado con fibras sintéticas recicladas obtenidos en la presente tesis, se recomienda realizar futuras investigaciones con la finalidad de aplicarlas como material para la construcción de terraplenes en obras viales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arrelucé Montenegro, S., & Solís Larrauri, G. L (2021). Incorporación de fibras de polipropileno como método de reforzamiento de suelos arcillosos en Palian-Huancayo.
- Almanza Álvarez, I. (2015). Estudio del Uso de Polietileno Tereftalato como Material de Refuerzo de Estructuras Téreas Conformadas por Suelos Cohesivos.
- Castro Cuadra, A. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Ingeniería).
- Carrillo Vega, C. M. (2019). Estudio de la inclusión de fibras Pet. en el reforzamiento de suelos cohesivos para terraplenes de obras viales, la libertad 2018.
- Das, B. M. (1985). Fundamentos de ingeniería geotécnica. En B. M. Das. Sacramento, California.
- De Paíta, M. P. (2011). Programa de apoyo a la gestión integral del riesgo de desastres naturales a nivel urbano. ATDM/MD-11383-PE.
- Fresneda, C. A., Rojas, K. R. C., Quintero, Y. M. G., Ramírez, O. E., & González, Y. V. (2014). Efecto en las propiedades mecánicas del suelo mediante el uso de fibras artificiales. Disponible:  
[https://www.researchgate.net/profile/Oscar\\_Echeverri3/publication/270899535\\_Efecto\\_en\\_las\\_propiedades\\_mecanicas\\_del\\_suelo\\_mediante\\_el\\_uso\\_de\\_fibras\\_artificiales/links/54b9178d0cf269d8cbf7300f/Efecto-en-las-propiedades-mecanicas-del-suelo-mediante-el-uso-de-fibras-artificiales.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Oscar_Echeverri3/publication/270899535_Efecto_en_las_propiedades_mecanicas_del_suelo_mediante_el_uso_de_fibras_artificiales/links/54b9178d0cf269d8cbf7300f/Efecto-en-las-propiedades-mecanicas-del-suelo-mediante-el-uso-de-fibras-artificiales.pdf)
- 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. Disponible:  
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11114>

- HURTADO, D. R. (2018). Mejoramiento de suelos expansivos mediante inclusiones de fibras.
- López Ortiz, J. A. (2015). *Suelos arcillosos reforzados con materiales de plástico reciclado (PET)*. Escuela de Ingeniería de Antioquia. Disponible: [https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/265/7/LopezJose\\_2013\\_SuelosArcillososReforzados.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/265/7/LopezJose_2013_SuelosArcillososReforzados.pdf)
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos Análisis geotécnico* (Vol. 1). Universidad Industrial de Santander.
- 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.
- Zenteno Enriquez, S. J. (2018). Efecto de la estabilización de suelos finos con Tereftalato de Polietileno como material de refuerzo en la estructura de pavimentos flexibles del Distrito de Puno.

## ANEXOS

### ANEXO A: REGISTROS Y PANEL FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DE LA TESIS

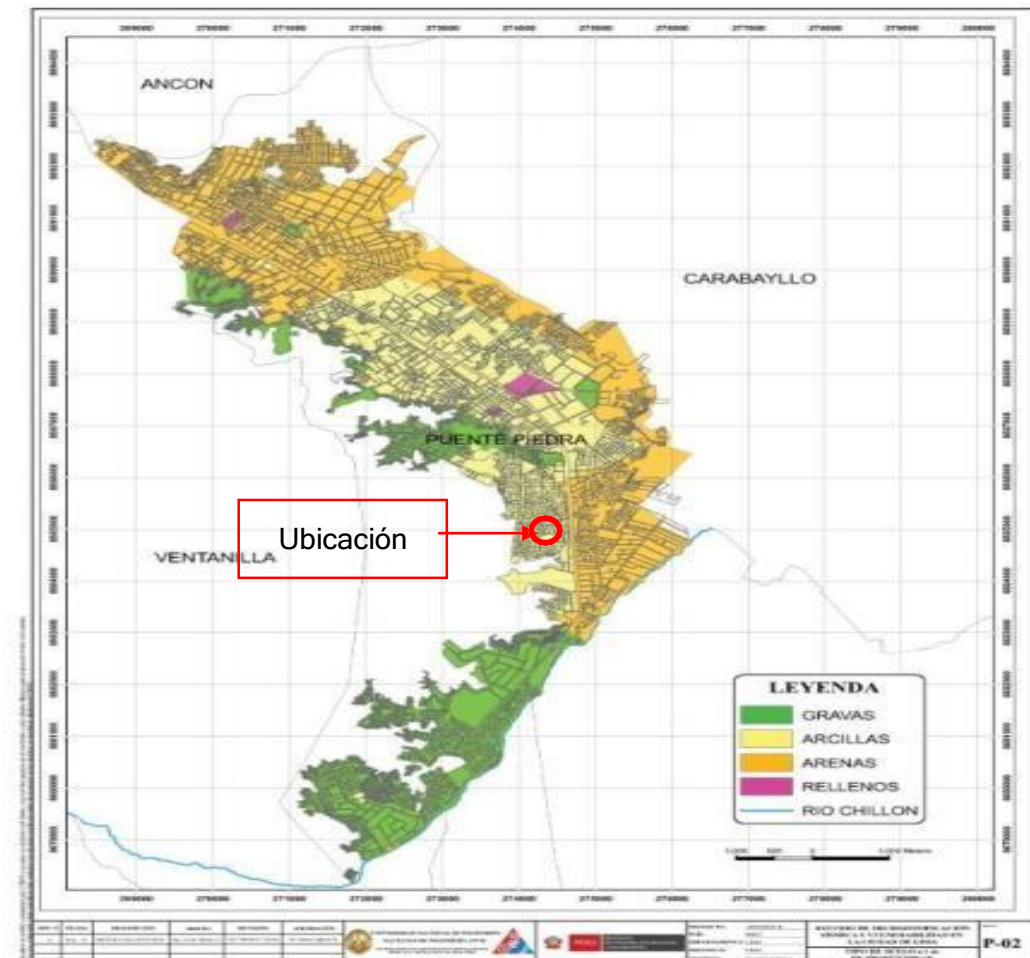


Figura 43 Ubicación de la muestra de arcilla en el distrito de Puente Piedra, Lima (Paita, 2011)



Figura 44 Calicata para extracción de muestra a una profundidad de 1 metro



Figura 45 Muestra de arcilla recolectada para ensayos de laboratorio





Figura 46 Fibras sintéticas recicladas (PET) de 6cm de longitud



Figura 47 Fibras sintéticas recicladas (PET) de 3cm de longitud



Figura 48 Tamices empleados en el ensayo granulométrico



Figura 49 Equipo empleado en el ensayo límite líquido



Figura 50 Barras de muestras 3.2 mm preparadas para el cálculo del límite plástico



Figura 51 Preparación de muestra para el ensayo de peso volumétrico



Figura 52 Muestra envuelta con la parafina para ensayo volumétrico

Para el ensayo del Proctor modificado se preparó la muestra patrón de 3kg y se adicióno agua y se mezcló uniformemente. Luego se colocó la primera capa en el molde y se aplicó 25 golpes con un pistón, para las demás capas se repite lo mismo. Luego se engraso el molde con una regla metálica. Luego se realizó el registro del peso del suelo más el molde. Se llevó la muestra al horno para determinar la humedad. Finalmente se determinó el contenido de humedad y la densidad seca en cada punto.



Figura 53 Peso de muestra patrón para ensayo de proctor modificado



Figura 54 Preparación de la muestra para el ensayo de proctor modificado



Figura 55 aplicación de 25 golpes con un pistón la primera capa de la muestra



Figura 56 Enrasado del molde con regla metálica

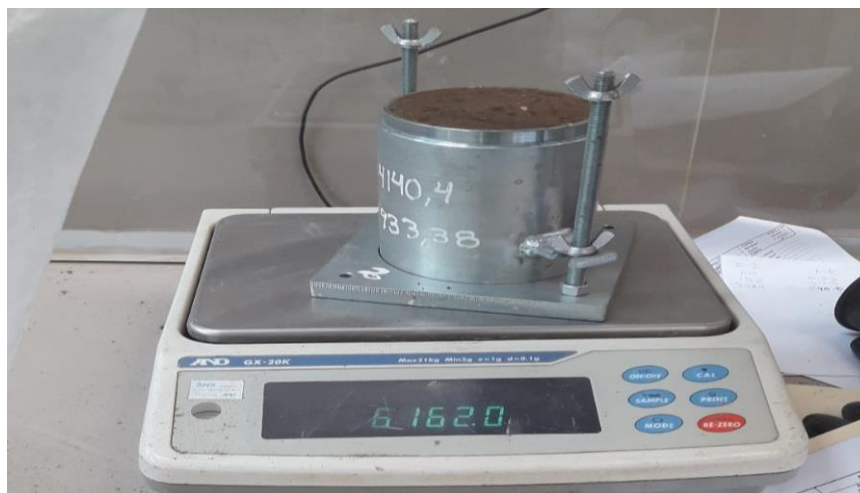


Figura 57 Peso de la muestra compacta más el molde



Figura 58 Extracción de muestra para el registro del peso



Figura 59 Peso de la muestra húmeda más la tara



Figura 60 Colocación de muestra en el horno para luego determinar la humedad

Se preparó 6 distintas mezclas de muestra natural de 12kg cada una, con fibras recicladas PET en diferentes proporciones de 0.5%, 1% y 1.5% del peso seco de la muestra y diferentes longitudes de 3 cm y 6 cm para realizar el ensayo de proctor modificado. A continuación, se detalla la cantidad de muestra y fibras que se utilizó para el ensayo (ver tabla 29).

Tabla 29 Distribución de peso de fibras sintéticas para diferentes dosificaciones y longitudes

Ensayo	Fibra sintética	Humedad	Peso de fibras
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 3 cm	8%	15 gramos
	para 0.5% de 3kg para	10%	15 gramos
	diferentes	12%	15 gramos
	humedad	14%	15 gramos
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 3 cm	8%	30 gramos
	para 1% de 3kg para	10%	30 gramos
	diferentes	12%	30 gramos
	humedad	14%	30 gramos
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 3 cm	8%	45 gramos
	para 1.5% de 3kg para	10%	45 gramos
	diferentes	12%	45 gramos
	humedad	14%	45 gramos
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 6 cm	8%	15 gramos
	para 0.5% de 3kg para	10%	15 gramos
	diferentes	12%	15 gramos
	humedad	14%	15 gramos
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 6 cm	8%	30 gramos
	para 1% de 3kg para	10%	30 gramos
	diferentes	12%	30 gramos
	humedad	14%	30 gramos
1 proctor modificado una muestra total de 12 kg	Longitud 6 cm	8%	45 gramos
	para 1.5% de 3kg para	10%	45 gramos
	diferentes	12%	45 gramos
	humedad	14%	45 gramos

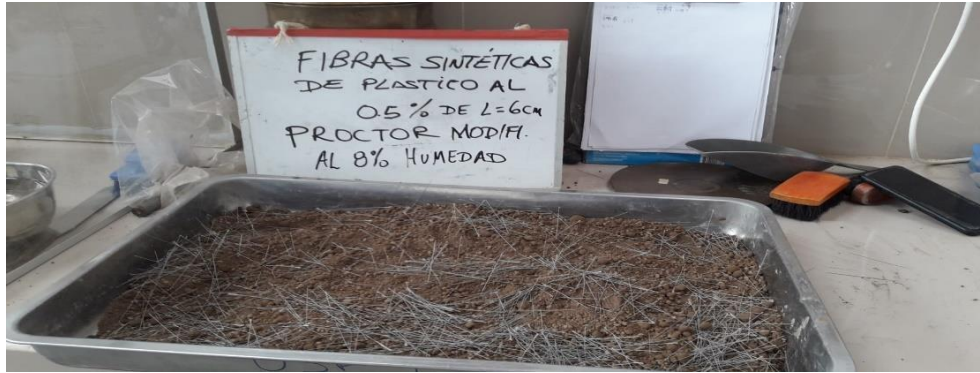


Figura 61 Mezcla de muestra natural con 0.5% fibras sintéticas de longitud 6cm para ensayo de proctor modificado



Figura 62 Colocación de la primera capa de la muestra con 0.5% fibras de Longitud 6 cm en el molde



Figura 63 Compactación de la primera capa de la muestra con 0.5% fibras de longitud 6cm







Figura 66 Rotura probeta A de muestra patrón

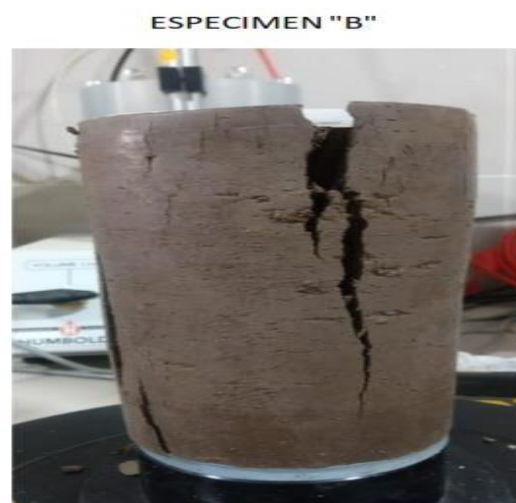


Figura 67 Rotura de probeta B de muestra patrón

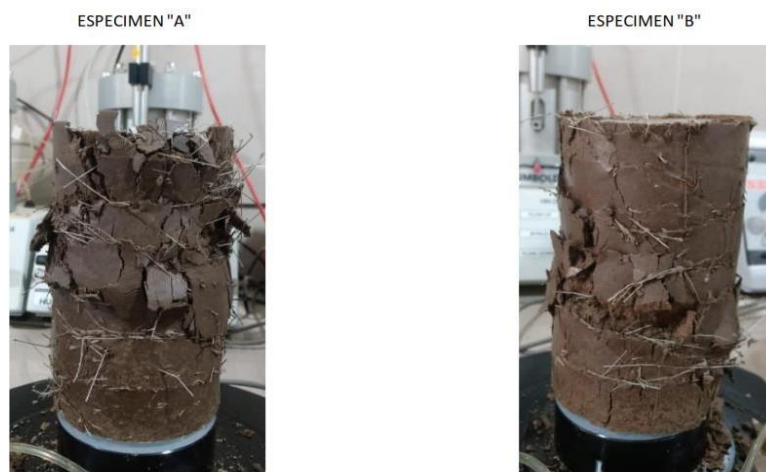


Figura 68 Rotura de probeta A y B muestra con 1.5% fibras sintéticas de 6cm



Figura 69 Rotura de probeta A y B muestra con 1.5% fibras sintéticas de 3 cm



Figura 70 rotura de probeta A y B muestra con 0.5% fibras sintéticas de 6cm



Figura 71 Rotura de probeta A y B muestra con 1% fibras sintéticas de 3cm



Figura 72 Rotura de probeta A y B muestra con 1% fibras sintéticas de 6cm



Figura 73 Rotura de probeta A y B muestra con 0.5% fibras sintéticas de 3cm

El ensayo California Bearing Ratio (CBR) se realizó preparando la muestra sin fibras y con fibras a 0.5%, 1%, 1.5% del peso seco de la muestra con longitudes de 3 cm y 6 cm en condiciones de densidad seca y contenido óptimo de humedad obtenidos del ensayo de proctor modificado. En la figura 43 se observan las herramientas usadas para el ensayo CBR.



Figura 74 Herramienta para el ensayo del CBR



Figura 75 Pesado de muestra patrón para el ensayo CBR



Figura 76 Suelo patrón con 1% fibras sintéticas 3cm de longitud para ensayo CBR



Figura 77 Muestra patrón con 1% fibras sintéticas 3cm de longitud con humedad al 12.8%



Figura 78 Suelo patrón con 1% fibras sintéticas 3cm longitud periodo de inmersión 96 horas

Por otro lado, a partir de los resultados del ensayo físico realizado a la muestra patrón se determinó la clasificación del suelo patrón mediante los sistemas de clasificación más utilizados como el SUCS y el AASHTO. Dichos sistemas de clasificación de suelos se observan en la Figura 79 y 80.

		MÉTODOS DE IDENTIFICACION PARA LA FRACCION QUE PASA POR EL TAMIZ # 40					
SUELOS DE GRANO FINO - MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA POR EL TAMIZ # 200	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MENOR DE 50	RESISTENCIA EN ESTADO SECO (A LA DISGREGACION)	DILATANCIA (REACCION A LA AGITACION)	TENACIDAD (CONSISTENCIA CERCA DEL LIMITE PLASTICO)			
		NULA A LIGERA	RAPIDA A LENTA	NULA	<b>ML</b>	LIMOS INORGANICOS Y ARENAS MUY FINAS, POLVO DE ROCA, ARENAS FINAS LIMOSAS O ARCILLAS CON LIGERA PLASTICIDAD	
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	MEDIA	<b>CL</b>	ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD BAJA A MEDIA, ARCILLAS CON GRAVA, ARCILLAS ARENOSAS, ARCILLAS LIMOSAS, ARCILLAS MAGRAS	
	LIGERA A MEDIA	LENTA	LIGERA	<b>OL</b>	LIMOS ORGANICOS Y ARCILLAS LIMOSAS ORGANICAS DE BAJA PLASTICIDAD		
	LIMOS Y ARCILLAS CON LIMITE LIQUIDO MAYOR DE 50	LIGERA A MEDIA	LENTA A NULA	LIGERA A MEDIA	<b>MH</b>	LIMOS INORGANICOS, SUELOS LIMOSOS O ARENOSOS FINOS MICACEOS O CON DIATOMEAS, LIMOS ELASTICOS	
		ALTA A MUY ALTA	NULA	ALTA	<b>CH</b>	ARCILLAS INORGANICAS DE PLASTICIDAD ELEVADA, ARCILLAS GRASAS	
		MEDIA A ALTA	NULA A MUY LENTA	LIGERA A MEDIA	<b>OH</b>	ARCILLAS ORGANICAS DE PLASTICIDAD MEDIA A ALTA	
	SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS		FACILMENTE IDENTIFICABLES POR SU COLOR, OLORES, SENSACION ESPONJOSA Y FRECUENTEMENTE POR SU TEXTURA FIBROSA.			<b>Pt</b>	TURBA Y OTROS SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS

Figura 79 Sistema de Clasificación SUCS (López, 2015)

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)						Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)				
	A-1		A-3*	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6	
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...	...	...			B		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.			B		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. <sup>3</sup>
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno						Regular a malo				

Figura 80 Sistema de Clasificación AASHTO (Castro, 2017)