

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Es evidente que el mejoramiento del suelo es un factor favorable para el desarrollo de todas las actividades de construcción, uno de los problemas ingenieriles que se presentan es la calidad de los suelos, debido a que las propiedades que estos posean afectarán de manera significativa el comportamiento de la estructura que se estén soportando. Teniendo en cuenta que las arcillas para la ingeniería civil son vistas como tipos de suelos que pueden tornarse más contradictorios al momento de ser considerados sus distintos usos, se debe reconocer que son materiales con propiedades muy valiosas al mismo tiempo, es por ello, que en los últimos 50 años se ha investigado el comportamiento que tiene los suelos reforzados con diferentes tipos de fibras (paja, raíces de planta y otros recursos naturales), siendo indispensable la innovación de los mismos con nuevas tecnologías que puedan ayudar a mitigar la contaminación que sufre el planeta.

Considerando que los residuos de los polímeros son reciclables, para el refuerzo de suelos se han diseñado geotextiles, mallas y geogrillas con materiales poliméricos. En este último tiempo, se ha investigado sobre el uso de los plásticos reciclados como refuerzo para los suelos, los cuales tienen un bajo costo, se pueden conseguir fácilmente, y al reutilizar los residuos de PET se contribuye con disminuir el impacto ambiental.

Para este proyecto de grado, se propone la reutilización de los desechos plásticos para mejorar las propiedades mecánicas y físicas del suelo, siendo los ensayos de laboratorio y la homogenización del suelo con fibras de plástico reciclado PET el mecanismo que presente las ventajas que tiene las fibras para el refuerzo de suelos arcillosos. Las variables que se tendrán en cuenta en esta investigación será cantidad de residuos plásticos y la resistencia al corte, utilizando siempre el mismo material de refuerzo y la misma herramienta de compactación.

Es importante aclarar que este estudio será realizado en suelos de características arcillosas de alta y baja plasticidad; es decir CH y CL según el Sistema de clasificación de suelos (SUCS).

1.2 JUSTIFICACIÓN

Tanto el estudio de las propiedades mecánicas y físicas del suelo, su composición mineralógica y clasificación, son aspectos que al ejecutar una obra civil deben adaptarse a las exigencias que ésta presenta. Los suelos arcillosos generalmente no cumplen con los requerimientos necesarios para garantizar la construcción de infraestructuras y en la estabilidad del terreno debido a su baja resistencia al corte, altas deformaciones e índice de plasticidad. Con el pasar de los años se ha buscado mejorar las propiedades mecánicas y las características resistentes a la compresión y a la tracción de los suelos empleando técnicas como: mallas de acero, anclajes, fibras naturales, etc. En los últimos años, para cumplir con el mismo fin se ha recurrido al uso de materiales artificiales provenientes de los polímeros, se pueden encontrar las mallas sintéticas, los geotextiles y geogrillas, fabricadas con materia prima proveniente del plástico.

La adición de fibras poliméricas a suelos arcillosos ha venido siendo estudiada y aplicada en países como Turquía, México y Estados Unidos, obteniéndose resultados favorables en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y estabilidad de este tipo de suelo, que muchas veces debido a sus bajas prestaciones hace imposible su uso en las diferentes obras civiles (Vettorelo, P. & Clariá, J., 2014).

Sin embargo, en Latinoamérica, así como en Bolivia, el reforzamiento de suelos con adición de fibras poliméricas, en investigación y aplicación, es todavía un campo en desarrollo; sin embargo, como concepto o solución, se usa hace cientos de años; el ejemplo más tradicional es la inserción de paja en el barro para formar adobe, esto no es más que la inserción de fibras (naturales en este caso) dentro de un suelo para darle la resistencia a la tracción que este no posee. Los procesos de mejoramiento de suelos para su uso son controlados bajo norma por el “Manual de Carreteras” de la Administradora Boliviana de Carreteras, sin embargo, el uso de fibras de PET u otros polímeros aún no se encuentra normado ni regulado, esto debido a la escasa investigación de dicha metodología que permita conocer las ventajas técnicas y ambientales de la reutilización de productos considerados “residuos” como agentes de refuerzo.

La realización de esta investigación es importante por varias razones. En primer lugar, el uso de residuos plásticos PET como refuerzo en suelos arcillosos puede ser una alternativa sostenible y económica para mejorar la resistencia y estabilidad del terreno, al mismo

tiempo que se promueve la gestión adecuada de los residuos plásticos en la región. En segundo lugar, la evaluación de la resistencia cortante de los suelos arcillosos reforzados con residuos plásticos PET en Tarija, Bolivia, permitirá conocer el comportamiento de estos materiales en condiciones específicas de esta región, lo que puede ser útil para el diseño de infraestructuras y edificaciones en el futuro. Además, esta investigación contribuirá al conocimiento científico en la materia y permitirá generar nuevas propuestas para el mejoramiento de la estabilidad del terreno en la construcción de infraestructuras, especialmente en zonas con suelos arcillosos y problemas de gestión de residuos plásticos como es el caso de Tarija. En resumen, la presente tesis justifica su importancia en la necesidad de encontrar soluciones sostenibles y económicas para la gestión de residuos plásticos y en la mejora de la estabilidad del terreno en la construcción de infraestructuras en Tarija, Bolivia. La evaluación de la resistencia cortante de los suelos arcillosos reforzados con residuos plásticos PET en esta región permitirá conocer su comportamiento y generar propuestas para el diseño de infraestructuras y edificaciones en el futuro.

1.3 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

1.3.1 Conceptualización puntual del objeto de estudio

Se busca evaluar la variación del incremento de la resistencia al corte en suelos arcillosos, una vez sometido éstas a un refuerzo con residuos plásticos a diferentes porcentajes.

1.3.2 Descripción del fenómeno ocurrido

La mezcla de suelos con otros materiales son métodos que ayudan a estabilizarlos y poder llegar a tener una mejor resistencia al corte. Como material que ayudará estabilizar un suelo son los residuos plásticos, que mediante ensayos de laboratorio se evaluará su funcionalidad.

El exceso de residuos plásticos va creciendo a nivel mundial, en Bolivia de igual forma se tiene un mal control de estos residuos. Como una manera de reciclar estos materiales, es necesario realizar una mezcla de suelos arcillosos con residuos plásticos para poder

reforzar su estructura y que sean más estables, ya que otro problema es la inestabilidad de los suelos arcillosos cuando se realiza movimientos de tierras.

Si no se da un uso correcto a los residuos de plásticos, estos siguen creciendo y contaminando el medio ambiente y de igual forma, no estabilizar los suelos arcillosos en nuestro medio causan diferentes desastres como los asentamientos y la inestabilidad del suelo.

Es necesario analizar las mezclas de suelos arcillosos con materiales de residuo de plástico, para ver de qué manera ayuda a estabilizar los suelos arcillosos y mejorar la resistencia al corte, donde mediante ensayos de laboratorio se verá su funcionalidad.

1.3.3 Breve explicación de la perspectiva de solución

La comparación de resistencia cortante en suelos arcillosos a diferentes porcentajes de residuos plásticos para su estabilización, busca incrementar la resistencia al corte para poder determinar el comportamiento de dicho suelo, si existe variación de resistencia entre los diferentes porcentajes y tamaños de fibras.

1.3.4 Problema

¿Cómo afecta la cantidad y tipo de residuos plásticos utilizados como refuerzo en suelos arcillosos a la resistencia cortante y deformación del terreno, y cómo se puede optimizar esta técnica para mejorar la estabilidad del terreno y la construcción de infraestructuras sostenibles?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del refuerzo con residuo plástico en la resistencia cortante de suelos arcillosos, con el fin de proponer una solución sostenible para mejorar las propiedades mecánicas del suelo y mitigar la contaminación plástica ambiental.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física y mecánicamente un suelo arcilloso mediante ensayos de laboratorio y las fibras plásticas empleadas para el refuerzo de éste.

- Determinar el porcentaje de material de residuo plástico que se debe agregar para mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso
- Realizar pruebas de laboratorio para determinar la resistencia cortante de suelos arcillosos reforzados con diferentes cantidades y tipos de residuos plásticos PET.
- Observar los resultados obtenidos determinando los cambios producidos por el agregado de residuo plástico en las propiedades mecánicas del suelo arcilloso.
- Analizar su viabilidad técnica y económica en aplicaciones prácticas de ingeniería civil.
- Establecer recomendaciones para la utilización de residuos plásticos PET como refuerzo en la construcción de infraestructuras, con el objetivo de contribuir a la gestión adecuada de residuos y la promoción de prácticas sostenibles.

1.5 HIPÓTESIS

La adición de residuos plásticos PET como refuerzo en suelos arcillosos mejora la resistencia cortante del terreno y reduce su deformación, lo que puede ser una alternativa sostenible para mejorar la estabilidad del terreno en la construcción de infraestructuras.

1.5.1 Identificación de variables

Las variables que se presentan en el presente proyecto son la cantidad de residuos plásticos a diferentes porcentajes de estabilización, se toma como variable el tipo de suelo porque son de dos diferentes zonas. A continuación, se identificarán las variables independientes y dependientes para este proyecto:

1.5.1.1 Variable independiente

X1=Cantidad de residuos plásticos.

1.5.1.2 Variable dependiente

Y1=Resistencia al corte.

1.5.2 Conceptualización de variables

1.5.2.1 Cantidad de residuos plásticos

Es la proporción de residuo plástico que se le agregará al suelo a ser mejorado, con la finalidad de reforzar el suelo a diferentes porcentajes de residuos plásticos para lograr una

mejor resistencia de suelo, para el presente proyecto se trabajará con porcentajes de 0,2%, 1% y 2%.

1.5.2.2 Resistencia al corte

La resistencia de un material describe el estado último de esfuerzo que puede soportar antes de que falle. Para suelos que pueden tener niveles altos de deformación se define la falla de acuerdo a sus deformaciones y en este estudio la resistencia al corte no drenado esta solamente en función de la cohesión.

1.5.3 Operacionalización

Tabla 1.1. Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Cantidad de residuos plásticos	Tamaño de muestra	gr	Estabilizar el suelo natural con residuos plásticos a un 0,2%, 1% y 2%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.2. Operacionalización de la variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Resistencia cortante	Cohesión	Normalmente alta para arcillas	Mientras más fino mayor cohesión

	Esfuerzo máximo	Se puede obtener los parámetros de resistencia	Máxima capacidad soporte del suelo
--	-----------------	--	------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

1.6 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación corresponde al tipo de **investigación causal o explicativa**, pues con este trabajo se pretende explicar lo que sucedería con el valor de la resistencia cortante del suelo en un suelo arcilloso antes y después de ser reforzado con fibras de residuo plástico PET a diferentes porcentajes.

La investigación abarca la eficacia de la técnica de refuerzo con residuos plásticos PET en la mejora de la resistencia cortante de los suelos arcillosos en la Región de Tarija-Bolivia. Se pretende determinar cómo la cantidad y el tipo de residuos plásticos PET son utilizados como refuerzo para la resistencia cortante de los suelos arcillosos.

Además, se busca generar modelos de análisis para predecir la resistencia cortante mejorada en función de la cantidad y tipo de residuos plásticos utilizados. Los resultados obtenidos permitirán establecer recomendaciones para la utilización de residuos plásticos PET como refuerzo en la construcción de infraestructuras en la región, con el objetivo de contribuir a la gestión adecuada de residuos y la promoción de prácticas sostenibles.

Es importante mencionar que el alcance de la investigación se limita a la evaluación de la resistencia cortante de los suelos arcillosos reforzados con residuos plásticos PET y su aplicación en la región de Tarija, Bolivia. La investigación no abordará otros aspectos relacionados con la estabilidad del terreno o la utilización de otros materiales de refuerzo.

Capítulo I.- En este capítulo se empieza a realizar el diseño metodológico del presente proyecto, que abarca desde encontrar un problema en el campo de la mecánica de suelos

y dar solución a este problema mediante diferentes ensayos de laboratorio. Identificando los objetivos del proyecto, basar todo el proyecto en una hipótesis que será verificada al final de este documento.

Capítulo II.- En este capítulo se elaborará un marco teórico sobre el tema del refuerzo de suelos, pero sobre todo se hará énfasis en el tema principal del proyecto que es la compresión inconfínada, desde el concepto de corte, en diferentes porcentajes de estabilización suelo-fibra de residuos plásticos, los factores que influyen en este valor, las ventajas y desventajas de este parámetro y los métodos que existen para medir este parámetro en base a las normas existentes.

Capítulo III.- En este punto del presente proyecto primeramente se puntualizarán los lugares de donde se extrajeron las muestras del suelo a usar, esto mediante los diferentes métodos de extracción de muestras conocidos, seguidamente realizarán todos los ensayos de caracterización del suelo en base a las especificaciones de las normas existentes, para luego centrarse en la variable principal del proyecto.

Capítulo IV.- Realizada toda la caracterización se procederá a la determinación de la variable principal de proyecto que es variación de la resistencia al corte no drenado en arcillas, como reforzados con fibras de residuos plásticos a distintos porcentajes. Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de compresión inconfínada se realizará el análisis estadístico tanto descriptivo como inferencial, este último en base a la hipótesis propuesta al principio del proyecto explicado en el capítulo I.

Capítulo V.- En base a los resultados obtenidos, al marco teórico y a la bibliografía consultada se realizarán las conclusiones a las cuales se llegó con este proyecto, seguido de esto se realizarán algunas recomendaciones para mejorar el procedimiento de las prácticas realizadas en este proyecto o alguna observación que se pudiera identificar.

CAPÍTULO II

LA RESISTENCIA AL CORTE Y EL REFUERZO CON RESIDUOS PLÁSTICOS

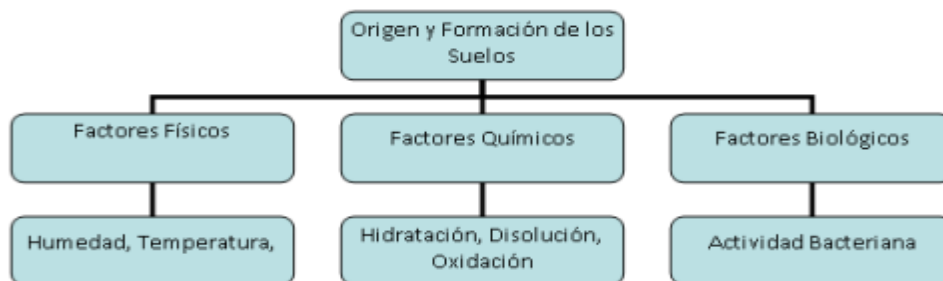
2.1 GENERALIDADES

La finalidad del presente documento, es determinar o analizar el comportamiento de la resistencia cortante de suelos arcillosos, sometido a un refuerzo con fibras de residuos plásticos a diferentes porcentajes, utilizando el equipo de compresión inconfiada. Para la realización de los ensayos se hará uso de los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, además de seguir lo indicado en la norma de ensayo ASTM.

2.2 SUELOS

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por eso, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más. ¹

Figura 2.1. Origen y formación de los suelos



Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación

¹ Fundamento de ingeniería geotécnica, Braja M. Das, página 1

2.2.1 Tipos de suelo

Los suelos son producidos por el intemperismo, es decir, por la fractura y rompimiento de varios tipos de rocas en piezas más pequeñas mediante procesos mecánicos y químicos, produciendo suelos residuales y suelos transportados.²

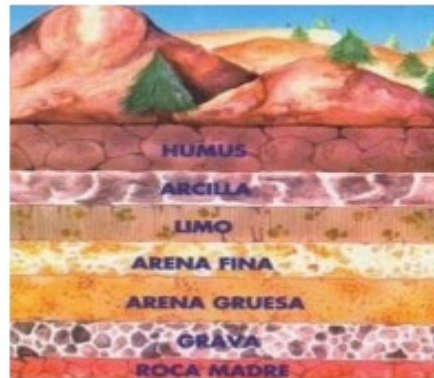
Suelos residuales

Son los suelos que permanecen donde se formaron como producto del ataque de los agentes del intemperismo, desintegración mecánica y/o descomposición química que cubren la superficie rocosa de la cual se derivan directamente.

Suelos transportados

Son aquellos suelos que fueron removidos o transportados desde su lugar de formación por la erosión fluvial o la erosión eólica y son re depositados en otras zonas. Así se generan suelos que se depositan sobre otros estratos sin relación directa con ellos, como se puede ver en la Figura 2.2. En la naturaleza existen diferentes agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales: los glaciares, el viento, los ríos, corrientes de aguas superficiales, los mares y las fuerzas de gravedad.

Figura 2.2. Estratigrafía de suelos transportados



Fuente: Mecánica de suelos Juárez Badillo

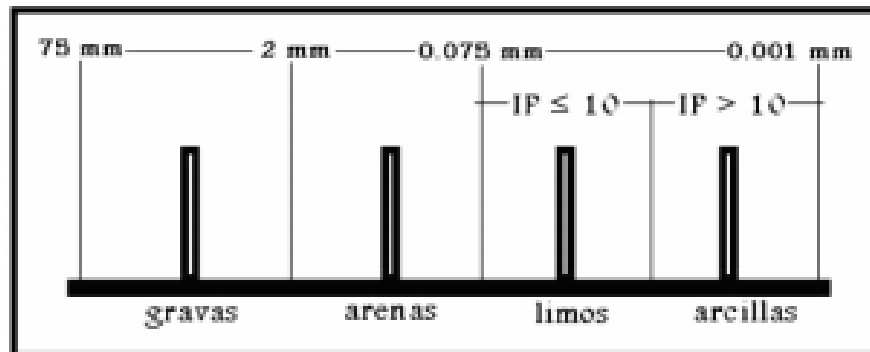
Tamaño de las partículas

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas que lo conforman, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla,

² Fundamento de ingeniería geotécnica, Braja M. Das, página 1-2.

dependiendo del tamaño predominante de las partículas y de su índice de plasticidad. Para describir los suelos por sus partículas se presentan los límites de tamaños de suelo por separado, como puede verse en la Figura 2.3, presentado por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO).

Figura 2.3. Rango de tamaños de partículas de un suelo



Fuente: Norma AASHTO

2.2.2 Arcillas

Son partículas de granos muy finos en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales, con diámetro menor a 0.075 mm. y un índice de plasticidad mayor que 10, cuya masa se vuelve plástica al ser mezclada con agua, químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan³.

A las arcillas se puede clasificar o agrupar en varios y distintos puntos de vista:

Por su plasticidad.

Por su porosidad y color.

³ Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 3.

Estructura de los filosilicatos

Como veremos, las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos (SiO_4^{4-}) se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{2-}$, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al^{3+} o Fe^{3+} .

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al^{3+} o Mg^{2+} , pueden estar sustituidos por Fe^{2+} o Fe^{3+} y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn.

El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos $(\text{OH})^-$ de la capa brucítica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un $(\text{OH})^-$ en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales.

Propiedades físico-químicas

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm).

Su morfología laminar (filosilicatos).

Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua

con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas, 1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.⁴

2.3 RESISTENCIA CORTANTE DE LOS SUELOS

Es la resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior.

Los ingenieros deben entender los principios de la resistencia al cizallamiento del suelo para analizar los problemas, como:

⁴ Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 12.

Capacidad de carga de cimentaciones superficiales.

Estabilidad de taludes naturales o de origen humano.

Estimación de la presión lateral de tierra para el diseño de estructuras de retención de tierras.

Capacidad de carga de pilotes y pozos perforados.

Ante la fricción entre dos superficies en contacto es conveniente considerar un modelo simple al comenzar la discusión de la resistencia cortante de los suelos. La Figura 2.4 presenta un bloque descansando en una superficie plana. El bloque está sujeto a una fuerza normal N , que actúa perpendicularmente a la superficie plana. Si se incrementa gradualmente la fuerza de corte F , el bloque se deslizará cuando:

$$F = N * \mu$$

Donde μ es el coeficiente de fricción entre el bloque y el plano. Dividiendo los dos términos por el área de contacto A , se obtiene:

$$\frac{F}{A} = \frac{N}{A} * \mu$$

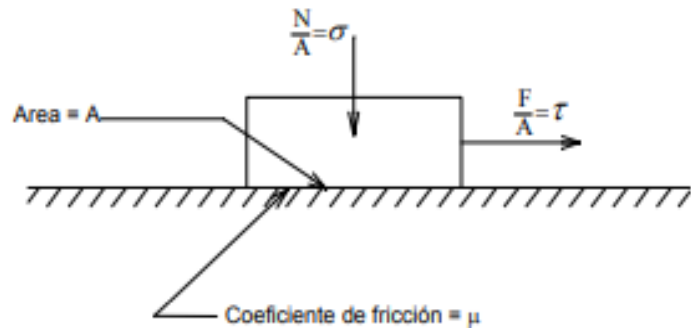
$$\tau = \sigma * \mu$$

Donde τ es el esfuerzo cortante y σ es el esfuerzo normal en el plano de deslizamiento. Si la oblicuidad del esfuerzo resultante en el plano de deslizamiento (plano de falla) se denomina Φ , como se indica en la Figura 2.5, la ecuación puede escribirse como:

$$\tau = \sigma * tg \phi$$

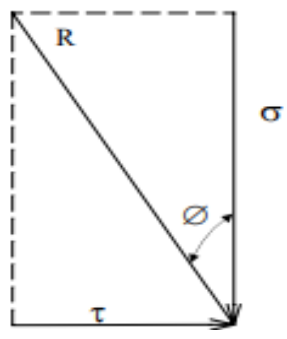
Esta ecuación indica que el esfuerzo cortante que se puede aplicar es proporcional al esfuerzo normal aplicado, y que se puede graficar la relación entre estos esfuerzos como una línea recta con una inclinación de ϕ (Figura 2.6).

Figura 2.4. Bloque deslizante en un plano



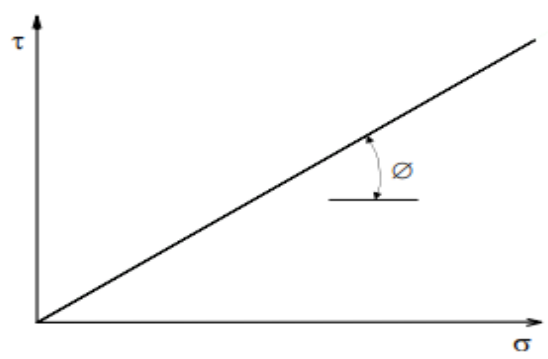
Fuente: J. Alba (2013)

Figura 2.5. Oblicuidad del esfuerzo resultante



Fuente: J. Alba (2013).

Figura 2.6. Diagrama de esfuerzo para un bloque deslizante en un plano



Fuente: J. Alba (2013)

2.3.1 Esfuerzo efectivo

El esfuerzo efectivo en cualquier dirección está definido como la diferencia entre el esfuerzo total en dicha dirección y la presión del agua que existe en los vacíos del suelo.

El esfuerzo efectivo es por lo tanto una diferencia de esfuerzos entre el esfuerzo normal y la presión de poros.

2.3.2 Naturaleza del esfuerzo efectivo

El suelo es una estructura semejante a un esqueleto de partículas sólidas en contacto, formando un sistema intersticial de vacíos intercomunicados. Los vacíos del suelo están total o parcialmente llenos de agua. La interacción entre la estructura del suelo y el fluido de los vacíos determina el comportamiento, desde el punto de vista de la ingeniería, único y dependiente del tiempo, de la masa del suelo.

La compresibilidad de un suelo sujeto a carga o descarga, es principalmente su capacidad de deformación de vacíos, usualmente por desplazamiento de agua. La resistencia de un suelo es su capacidad última de resistencia a tal carga.

Los esfuerzos cortantes sólo pueden ser resistidos por la estructura de las partículas sólidas, pues el agua no tiene resistencia cortante. Por otro lado, el esfuerzo normal en cualquier plano es la suma de dos componentes: una debida a la carga transmitida por las partículas sólidas de la estructura del suelo, y la otra, una presión del fluido en los espacios vacíos.

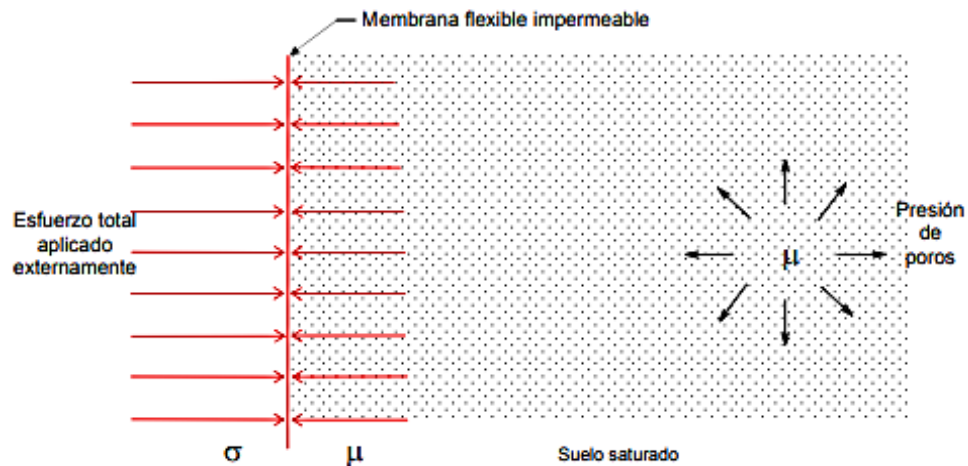
La compresibilidad y la resistencia de un suelo dependen de la diferencia entre el esfuerzo total debido a la carga externa, σ , y la presión de poros, μ . Esta diferencia se denomina esfuerzo efectivo, y se expresa por:

$$\sigma' = (\sigma - \mu) \quad 2.1 \text{ ec.}$$

La naturaleza física de este parámetro puede entenderse intuitivamente considerando a un suelo saturado limitado por una membrana flexible impermeable, tal como se muestra en la Fig. 2.7. El esfuerzo total debido a la carga aplicada es σ , que es perpendicular a la membrana. La presión de poros es μ ($\mu < \sigma$), la cual, por ser una presión hidrostática, tiene igual intensidad en todas las direcciones. La presión de poros es perpendicular a la membrana y tiene el valor de μ . Examinando los esfuerzos normales a la membrana, se puede apreciar que la diferencia de esfuerzos ($\sigma - \mu$) se transmite a la estructura del suelo

a través de la membrana, para una situación de equilibrio. Entonces, el esfuerzo efectivo ($\sigma - \mu$) es una medida de la carga transmitida por la estructura del suelo.⁵

Figura 2.7. Modelo suelo demostrado la naturaleza del esfuerzo efectivo



Fuente: J. Alba (2013)

2.3.3 Parámetros de resistencia cortante

Los parámetros de resistencia cortante de un suelo se determinan en el laboratorio principalmente con los tipos de pruebas que existen.

Ángulo de fricción

Es una propiedad de los materiales granulares el cual tiene una interpretación física sencilla, al estar relacionado con el ángulo en reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de dicho material granular. En un material granuloso cualquiera, el ángulo de reposo está determinado por la fricción, la cohesión y donde las partículas son muy pequeñas en relación al tamaño del conjunto el ángulo en reposo coincide con el ángulo de rozamiento interno.

El ángulo de fricción determina la inclinación de un plano imaginario, éste expresa la resistencia al desplazamiento entre una partícula y otra del suelo, antes de que ocurra un deslizamiento entre las dos.

⁵ Alba Hurtado 2010

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 entre estos.

Existen muchos factores de los cuales el ángulo de fricción depende, según (Das, 1985), los más importantes son los siguientes:

- Tamaño de grano.
- Densidad.
- Permeabilidad.
- Tipo de mineral que constituye las partículas.
- Forma de los granos.
- Micro estructura.
- Distribución de los tamaños de grano o partículas.
- Presión normal o de confinamiento.

En suelos donde las partículas son angulares, la trabazón es mayor, y causa un efecto en el ángulo de fricción, haciendo que este sea mayor.

En limos y arcillas es posible realizar un corte vertical, haciendo que éste se conserve estable sin soporte alguno, por un período de tiempo. En las arenas no es posible realizar este corte, ya que genera un deslizamiento, y el talud formado genera un ángulo llamado ángulo de reposo coincidiendo con el ángulo de fricción del suelo angular.

El ángulo de fricción puede ser entendido como el ángulo máximo posible que puede alcanzar la pendiente de una muestra de suelo en su estado natural.

La Ecuación 2.2 que describe el ángulo de fricción depende de dos factores, el efecto de la trabazón entre las partículas del mineral y el ángulo de fricción entre las caras de éste.

$$\varphi = \varphi_u + \beta \quad 2.2 \text{ ec.}$$

Donde:

Φ_u : es el ángulo de fricción entre las caras del mineral

β : es el efecto de la trabazón entre las partículas.

Todos los suelos tienen fricción, pero los suelos arcillosos que poseen fricciones muy bajas o despreciables, se pueden denominar cohesivos con ángulos de fricción iguales a 0.

El factor Φ_u varía de acuerdo a la naturaleza de la densidad de los suelos, por consiguiente mientras más denso el suelo, mayor es el ángulo de fricción y esto se debe a que si Φ_u permanece constante, el valor de β debe aumentar debido al aumento en la densidad del suelo, esto se da ya que un suelo más denso necesita más trabajo para superar las fuerzas de la trabazón entre las partículas. (Powrie, 2004)

Cohesión

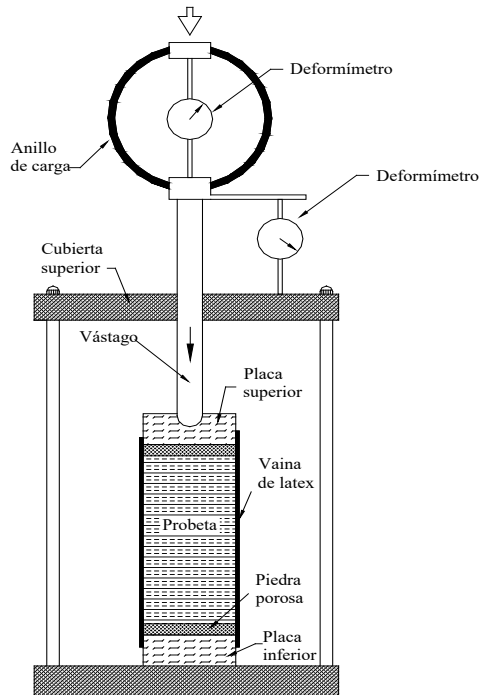
La cohesión es la fuerza que existe entre las partículas de suelo para atraerse entre sí, esta es originada por la fuerza entre las películas de agua que se forman en el suelo y la atracción entre las moléculas que lo componen. Al cambiar el contenido de humedad la cohesión del suelo podría variar. La cohesión es medida en unidades de fuerza sobre área. Los suelos con contenidos arcillosos tienen cohesión alta de 0,25 kg/cm² a 1,5kg/cm², o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula. Para entender mejor el término cohesión, hay que tener presente que se entiende por fuerzas moleculares o atracción molecular. La superficie específica se define como el área por unidad de volumen, dependiendo de la superficie específica que pueda tener una partícula de suelo, su comportamiento estará regido por fuerzas superficiales o por fuerzas asociadas a su masa y forma. Todas las partículas del suelo poseen una carga eléctrica, la parte más fina está cargada negativamente, de acuerdo al tipo de material y de su superficie específica se asocia directamente la magnitud de dicha carga. La magnitud del área por unidad de masa, superficie específica, resulta por tanto una buena indicación de la influencia relativa de las cargas eléctricas sobre el comportamiento de la partícula, cuando el comportamiento de una partícula de suelo se asocia a las fuerzas superficiales se emplea el término Coloide, una partícula de arcilla es un coloide debido a su pequeño tamaño y forma irregular. Cuanto más pequeña una partícula, mayor es su superficie específica. Se ha definido un límite inferior en el valor de superficie específica para identificar la parte coloidal de una masa de suelo (25 m²/g), es precisamente en esta parte del suelo donde la cohesión actúa y toma importancia. (Lambe & Whitman, 1979) .También existen fuerzas de atracción que están presentes debido a la naturaleza misma de la partícula y su

composición mineral, se denominan fuerzas de Van der Waals las cuales difieren de las fuerzas electrostáticas y de los enlaces covalentes.

2.3.4 Ensayo de compresión inconfiada.

El ensayo de compresión inconfiada es un método rápido y de amplio uso para determinar el parámetro de resistencia no drenado c_u del suelo saturado arcilloso.

Figura 2.8. Ensayo de compresión inconfiada



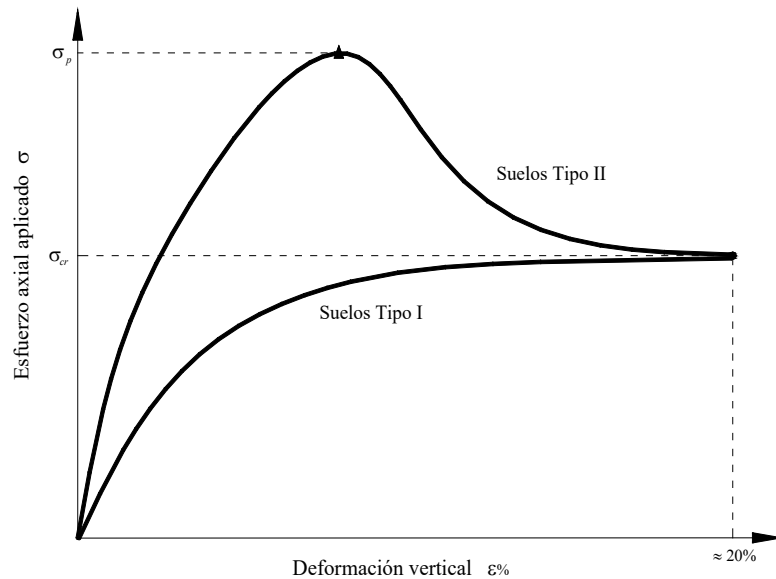
Fuente: Braja M. Das (2015)

En este ensayo no drenado se aplica un esfuerzo axial mediante una prensa a una probeta cubierta de una vaina de látex que impide el drenaje. La probeta no está sometida a una presión isotrópica de confinamiento alrededor de ella, en la Figura 2.8 se muestra el sistema para realizar este ensayo.

La preparación de la probeta (saturación), el montaje del vástago y el anillo de carga es similar al caso de los ensayos triaxiales. Para determinar el parámetro no drenado c_u , se recolectan periódicamente valores de los deformímetros que controlan el anillo de carga y la deformación vertical ((ΔL)) de la probeta. Con el área corregida A (ecuación de la probeta puede determinarse el esfuerzo desviador que actúa en la probeta, entonces se

grafica la variación de la deformación vertical respecto al esfuerzo desviador, como se muestra en la Figura 2.9.

Figura 2.9. Deformación vertical respecto al esfuerzo axial en la compresión inconfiada



Fuente: Braja M. Das (2015)

La deformación unitaria ε , se calculará con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Dónde:

ε = Deformación unitaria axial para la carga dada.

ΔL = Deformación del espécimen registrado por el deformímetro de los cambios de longitud en sentido axial.

L_0 = Longitud inicial del espécimen de suelo.

Cálculo de la sección transversal promedio de la muestra

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

Dónde:

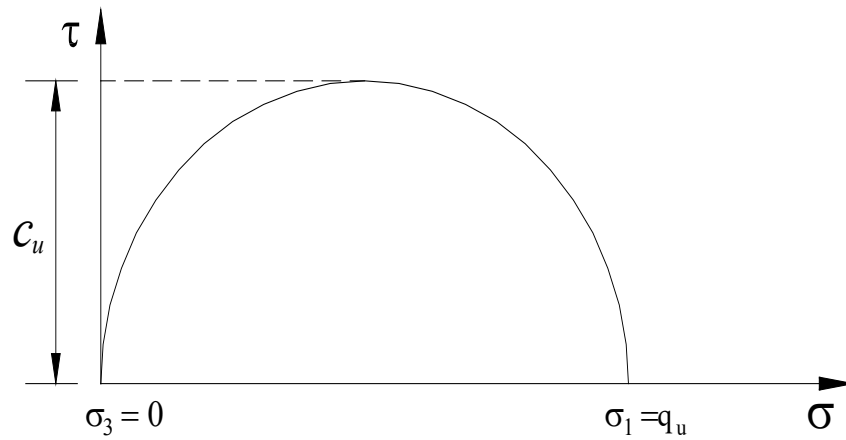
A = Área transversal corregida de la muestra.

ε = Deformación unitaria axial del espécimen de suelo.

A_0 = Área transversal inicial del espécimen de suelo.

En esta prueba, la presión de confinamiento es cero.

Figura 2. 10. Combinación de esfuerzos en la falla círculo de Mohr ensayo compresión inconfiada



Fuente: Braja M. Das (2015)

Cálculo del esfuerzo.

El valor del esfuerzo a la carga que produce la falla de la probeta debido a la carga crítica se le llama resistencia a la compresión inconfiada.

$$q_u = \frac{P_{cr}}{A_c} \quad ; \quad q_u = \frac{P_{max}}{A_c}$$

Dónde:

qu = Resistencia a la compresión inconfiada.

Pmax = Carga máxima.

Ac = Área corregida.

Tabla 2.1. Consistencia de la arcilla

Consistencia del suelo	Resistencia a la compresión inconfiada	
	kg/cm ²	(kPa)
Muy blanda	<0.25	(<25)
Blanda	0.25-0.50	(25 - 50)
Mediana	0.50-1.00	(50 - 100)
Firme	1.00-2.00	(100 - 200)
Muy firme	2.00-4.00	(200 - 400)
Dura	>4.00	(> 400)

Fuente: Braja M. Das (2015)

2.3.5 Marco normativo

Para la elaboración del presente proyecto hay diferentes ensayos de laboratorio para realizar, por lo tanto, para la correcta elaboración de estos ensayos hay que seguir las normas con las que se cuenta. A continuación, se presenta la Tabla 2.2 donde se indica el tipo de ensayo y la norma con la cual se trabaja.

Tabla 2.2. Marco normativo

Parámetro	Norma
Conservación y transporte de muestras de suelos	ASTM D4220
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422; AASHTO T88
Análisis granulométrico por medio de hidrómetro	ASTM D422
Determinación del límite líquido de los suelos	ASTM D4318; AASHTO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318; AASHTO T90
Determinación del peso específico de los suelos	ASTM D854; AASHTO T100

Relaciones de peso unitario-humedad en suelos método estándar	ASTM D422; AASHTO T99
Resistencia a la compresión con fibras de plástico reciclado.	ASTM D695
Método de ensayo para determinar la resistencia de suelos a la compresión inconfiada	ASTM D2166; AASHTO T208

Fuente: Elaboración propia

2.4 PLÁSTICOS

No se puede asociar la palabra “plástico” únicamente a un material, como sucede con el metal que designa otros materiales además del hierro y del aluminio. Ésta palabra se podría entender como un término genérico que refiere una gran variedad de sustancias, las cuales se diferencian entre sí por su estructura, propiedades y composición. Los plásticos podrían sustituir materiales como la madera y los metales, o también complementarlos, ya que poseen muchas propiedades y son muy variadas.

Los polímeros son un grupo de compuestos orgánicos del cual los plásticos hacen parte.

Los polímeros están constituidos por macromoléculas de peso molecular alto, las cuales son series repetitivas de unidades estructurales más pequeñas, llamadas meros o unidades de repetición. Los polímeros pueden ser de origen natural y derivarse de las plantas, animales o sustancias minerales, como la celulosa, la lana y el asbesto, o también se pueden crear artificialmente a partir de productos petroquímicos.

Generalmente se producen a partir de recursos no renovables como el gas y el petróleo.

Sólo el 5% del petróleo extraído se utiliza para la fabricación de plásticos, lo que representa una mínima cantidad de recursos no renovables, comparado con las ventajas y beneficios que se derivan de su transformación en incontables productos útiles. Adicionalmente, comparados con los materiales inorgánicos, los plásticos requieren un menor consumo energético durante su transformación porque se procesan a temperaturas de operación más bajas.

Las propiedades físicas y estructura molecular pueden cambiar dependiendo de la estructura que forma el carbono al asociarse con hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Los plásticos se pueden dividir y clasificar de acuerdo a la estructura molecular, el estado físico, la composición química, el uso final o la reacción en el ambiente.

La composición química del polímero, es decir, los grupos químicos presentes (etileno, éter, éster, hidroxil, etc.) o la manera de la síntesis (propagación de la cadena, apertura de los anillos, etc.) se pueden usar como medio para clasificar polímeros.

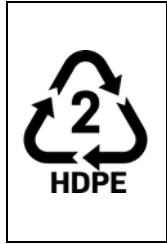


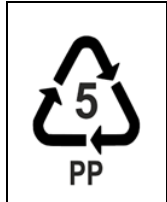
El uso final hace que a veces los polímeros (resinas) se denominen como fibras, adhesivos, cauchos, plásticos o recubrimientos, aunque el material pueda ser adaptable a todas esas aplicaciones.


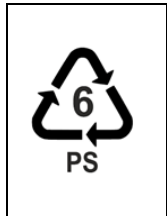

En cuanto a la reacción de los plásticos con el ambiente, una buena clasificación es teniendo en cuenta su comportamiento a temperaturas elevadas, dividiéndolos en termoplásticos y termoestables.

Los polímeros son codificados internacionalmente, para ser identificados y determinar las diferentes resinas plásticas presentes en los envases y facilitar su proceso de reciclaje, para poder transformarlos en artículos para otras aplicaciones, en la tabla 2.3 se enumeran los diferentes tipos de plástico, su uso y su código.

Tabla 2.3. Códigos, propiedades y usos de la resina plástica

Símbolo	Tipo de Plástico	Propiedades	Usos Comunes
<p>The image shows the standard recycling symbol for PET, which consists of three chasing arrows forming a triangle with the number '1' in the center and the letters 'PET' below it.</p>	PET Polietileno Tereftalato (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.)

	<p>HDPE Polietileno de alta densidad (High Density Polyethylene)</p>	<p>Poco flexible resistente a químicos m opaco, fácil de pigmentar fabricar y manejar. Se suaviza a los 75°C</p>	<p>Algunas bolsas para supermercado, bolsas para congelar, envases para leche, helado, jugos, shampoo, químicos y detergentes, cubetas, tapas, etc.</p>
	<p>PVC Policloriuro de vinilo (Pasticised Polyvinyl Chloride PVC-P)</p>	<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</p>	<p>Envases para plomería, tubería, blister packs, envases en general , mangueras , suelas para zapatos, cables, correas para reloj</p>
	<p>LDPE Polietileno de baja densidad (Low Density Polyethylene)</p>	<p>Suave, flexible traslucido, se suaviza a los 70°C , se raya fácilmente</p>	<p>Película para empaque. Bolsas para basura, envases para laboratorio</p>
	<p>PP Polipropileno (Polupropylene)</p>	<p>Difícil pero aun flexible se suaviza a los 140°C , traslucido, soporta solventes , versátil</p>	<p>Bolsas para frituras, popotes, equipo para jardinería, cajas para alimentos, cintas para empacar, envases para uso veterinario y farmacéutico</p>

	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, juguetes, envases cosméticos.
	PSE 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 Otros (BAN,ABS,PV, Nylon)	Incluye de muchas otras resinas y materiales. Sus propiedades dependen de la combinación de los plásticos	Autopartes, hieleras, electrónicos, piezas para empaques

Fuente: Tecnología de los Plásticos 2011

2.4.1 Polietileno Tereftalato (PET)

Dentro de la gran variedad de resinas termoplásticas, apenas seis representan el 90% del consumo: PEBD (polietileno de baja densidad), PEAD (polietileno de alta densidad), PP (polipropileno), PS (poliestireno), PVC (polivinilcloruro), y PET (polietileno Tereftalato).

El PET es un material termoplástico (a presiones y temperaturas adecuadas puede ser fundido y moldeado nuevamente) utilizado para la fabricación de envases, láminas, películas, zunchos, fibras, películas y plásticos de ingeniería.

El PET está constituido de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET es 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo se

extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene principalmente a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar el etilenglicol. La combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol produce como resultado el PET.

En la Tabla 2.4 se muestran algunos datos técnicos del PET.

Tabla 2.4. Datos técnicos del PET

DATOS TÉCNICOS PET				
PROPIEDADES MECÁNICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Peso Especifico	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
Resistencia a la Tracción (Fluencia/Rotura)	kg/cm ²	D-638	53455	900/-
Resistencia a la Compresión (1 y 2%def)	kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la Flexión	kg/cm ²	D-790	53452	1450
Resistencia al Choque sin Estallar	kg.cm/cm ²	D-256	53453	>50
Alargamiento a la Rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de Elasticidad (Tracción)	kg/cm ²	D-2240	53457	37000
Dureza	Shore D	D-1894	53505	85-87
Coef. De Roce Estático S/Acero		D-1894		-
Coef. De Roce Dinámico S/Acero				0.2
Resistencia al Desgaste Por Roce				Muy Buena
PROPIEDADES TÉRMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Calor Especifico	kcal/kg.°C	C-351		0.25
Temp. De Flexión B/Carga (18,5kg/cm ²)	°C	D-648	53462	75
Temp. De uso Continuo en Aire	°C			-20 a 110
Temp. De Fusión	°C			255
Coef. De Dilatación Lineal de 23 a 100° C	por °C	D-696	52752	0.00008
Coef. De Conducción Térmica	kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

Fuente: Tecnología de los Plásticos 2011

El material PET presenta las siguientes propiedades y características:

- Procesable por soplado, inyección y extrusión.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia (aunque admite cargas de colorantes) y brillo con efecto lupa.
- Alta resistencia al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.

- Muy buena barrera a CO₂, aceptable barrera a O₂ y humedad.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Biorientable.
- Cristalizable.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo / performance.
- En el ranking mundial de plástico se cataloga como No.1 en reciclado.
- Liviano.

Biorientación. - Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

Cristalización. - Permite lograr el incremento del peso molecular y la densidad.

Esterilización. - El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma.

Resistencia química. - Presenta buena resistencia en general a: grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. Posee poca resistencia a: solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.

2.4.2 Reciclaje de plásticos

En la ciudad de Tarija, Bolivia, se están realizando esfuerzos significativos para manejar y reciclar los residuos plásticos. Una empresa llamada Efficient Energy ha instalado una planta piloto en la ciudad para obtener diésel y gasolina a partir de residuos plásticos utilizando un proceso conocido como pirólisis. Este innovador enfoque ha demostrado ser prometedor, logrando resultados alentadores en la gestión eficiente de los residuos de polímeros.

Además, una microempresa local, Peregrino Soluciones Ambientales, está haciendo su parte para combatir el problema de los residuos plásticos. Esta empresa recicla botellas de PET para fabricar escobas y cepillos ecológicos. Pero su trabajo no se detiene ahí. También se dedican a la educación sobre la conciencia ambiental y organizan campañas de recolección en la ciudad para fomentar la participación de la comunidad en el reciclaje. El proceso de reciclaje de PET, de esta microempresa es el siguiente: Separación, acopio, prensado, lavado, molido, granulado y transformación del material.

La Entidad Municipal de Aseo de Tarija (EMAT) también juega un papel crucial en la gestión de residuos en la ciudad. En 2020, EMAT recolectó 67,800 toneladas de residuos sólidos, marcando un año récord desde 2005.

Estos esfuerzos combinados demuestran el compromiso de Tarija con la gestión sostenible de los residuos plásticos y sirven como un modelo inspirador para otras ciudades y países.

2.5 SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON PLÁSTICO

Los residuos plásticos son un problema ambiental creciente en todo el mundo. La producción de plásticos alcanzó los 379 millones de toneladas en 2020, y se espera que esta cifra aumente a 844 millones de toneladas en 2050. Una de las principales formas de abordar este problema es encontrar formas de reciclar o reutilizar los residuos plásticos.

Se han realizado varios estudios para investigar el efecto de los residuos plásticos en las propiedades de los suelos arcillosos. Estos estudios se han llevado a cabo en diferentes partes del mundo, utilizando diferentes tipos de residuos plásticos y suelos arcillosos.

En América Latina, se han realizado varios estudios sobre el uso de residuos plásticos para reforzar suelos arcillosos.

En Colombia, por ejemplo, se realizó un estudio en la Universidad de Ibagué para evaluar el efecto de las fibras de PET en la resistencia al corte de un suelo arcilloso. Los resultados del estudio mostraron que las fibras de PET mejoraron la resistencia al corte del suelo en un 137,24%.

En Perú, se realizó un estudio en la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo para evaluar el efecto de las fibras de polipropileno en la resistencia al corte de un suelo arcilloso. Los resultados del estudio mostraron que las fibras de polipropileno mejoraron la resistencia al corte del suelo en un 4,21%.

Universidad Nacional de Trujillo, Perú: Este estudio investigó la influencia de la adición de fibras de PET reciclado en la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de suelos arcillosos. El estudio concluyó que el mejor valor del índice de CBR se obtuvo cuando el suelo se mezcló con un 2.5% de PET, logrando así un incremento del 59.1% del CBR con respecto al valor obtenido del suelo patrón.

Universidad César Vallejo, Perú: En este estudio, se realizó con el objetivo de determinar el efecto que causa la adición de polímeros reciclados (PET) fundido en la estabilización de suelos a nivel subrasante con adición de 2%, 4% y 6% con respecto al peso seco del suelo para aumentar la resistencia del suelo de fundación conocido como subrasante.

En otras partes del mundo, también se han realizado varios estudios sobre el uso de plásticos para mejorar las propiedades de los suelos.

En China, por ejemplo, se realizó un estudio en la Universidad de Zhejiang para evaluar el efecto de las fibras de PET en la resistencia al corte de un suelo arcilloso. Los resultados del estudio mostraron que las fibras de PET mejoraron la resistencia al corte del suelo en un 20%.

En India, se realizó un estudio en la Universidad de Roorkee para evaluar el efecto de las fibras de polipropileno en la resistencia al corte de un suelo arcilloso. Los resultados del estudio mostraron que las fibras de polipropileno mejoraron la resistencia al corte del suelo en un 15%.

Arabian Journal of Geosciences: Este estudio se centró en el potencial de fortalecimiento de la fibra de polipropileno (PP) en las propiedades de ingeniería de las arcillas grasas. Se utilizaron diferentes porcentajes de fibra (0.2, 0.4, 0.6, y 0.8% por peso de suelo secado al horno) en muestras de arcilla y luego se investigaron las propiedades de compactación, resistencia a la compresión no confinada (UCS), módulo elástico (E 50), relación de soporte de California (CBR), y propiedades de hinchamiento-consolidación de las muestras reforzadas. Los resultados de las pruebas muestran una mejora notable en la

resistencia, ya que el valor de UCS del suelo reforzado con 0.4% aumentó en un 356%, E 50 en un 109%, y CBR empapado en un 225%, lo que resulta en una sub base de mejor calidad para la construcción de pavimentos.

Transportation Infrastructure Geotechnology: Este estudio evaluó los efectos de la adición de tiras de PET de botellas recicladas de diferentes longitudes y contenidos en la resistencia del suelo arenoso y arcilloso. Los resultados de las pruebas de compresión no confinada mostraron que las mayores resistencias se obtuvieron para el suelo arenoso (L = 20 mm; 1.5%) y el suelo arcilloso (L = 30 mm; 1.5%). La inclusión de tiras de PET fue más efectiva en el suelo arenoso, que presentó un aumento del 66.4% (CD = 100%) y del 55.5% (CD = 95%) en la intercepción cohesiva.

Vettorelo, Paula V. (2014): En su estudio “Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones”, Vettorelo presenta una revisión bibliográfica sobre el refuerzo de suelos mediante la adición de fibras. Analiza los tipos y contenidos usuales de fibras empleados tanto en suelos granulares como cohesivos y describe algunos modelos predictivos desarrollados en la literatura. Concluye que la incorporación de fibras aumenta la resistencia al corte principalmente a grandes deformaciones y le brinda mayor ductilidad tanto a suelos granulares como cohesivos.

Estos estudios demuestran que la adición de fibras poliméricas puede ser una solución efectiva para mejorar las propiedades de los suelos arcillosos.

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección se presenta paso a paso todos los procedimientos que se llevan a cabo, para realizar el relevamiento de información, muestreo de suelo y posterior análisis del mismo en laboratorio (este último se detalla en el capítulo IV).

Para el relevamiento de información se acudirá a todo tipo de libros, manuales de laboratorio, artículos publicados por autores entendidos en el tema, pero por sobre todo a las Normas tanto AASHTO como la ASTM, donde se indican los procedimientos de cómo llevar a cabo la muestra de suelos y sobre todo los ensayos de laboratorio que se deben realizar para obtener buenos resultados.

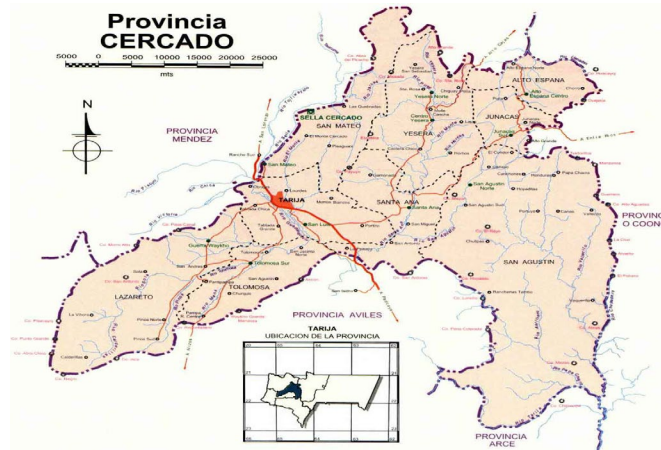
Una vez obtenida las guías de cómo realizar los ensayos y demás procedimientos, se procede a la recolección de muestras de suelos de diferentes zonas de la ciudad de Tarija, con el fin de tener la mayor cantidad de muestras y si así tener una mayor probabilidad de encontrar los suelos buscados con talud, llevar estas muestras al laboratorio y realizar la caracterización de las mismas que serán de cuatro zonas de estudio para este proyecto.

A dos suelos de diferentes zonas que presenten taludes, se someterán a un refuerzo con fibras de residuos plásticos a diferentes porcentajes y tamaños de fibras para ver si existe un aumento en la resistencia cortante.

3.1.1 Ubicación de zonas de extracción

El presente proyecto se lo realizará con muestras extraídas del Departamento de Tarija, más propiamente de la provincia Cercado, de sus diferentes zonas y barrios.

Figura 3.1. Mapa de la provincia Cercado Tarija



Fuente: <http://cultj.blogspot.com/2014/09/Bolivia.html>

Gran parte de la provincia Cercado está compuesta de arcillas, suelo que es predominante en todos sus barrios, debido a esto se hace necesario la recolección de muestra de diferentes barrios para así asegurarse de poder encontrar el suelo deseado.

Para aumentar la probabilidad de encontrar el tipo de suelo deseado se hizo uso de otros proyectos de grado de años pasados donde también se trabajó con arcillas y mencionan algunas zonas o barrios de donde se presume exista el tipo de suelo buscado (CH y CL clasificación SUCS).

3.1.2 Coordenadas Geográficas y UTM de las zonas de extracción de muestras para la caracterización del suelo.

A continuación, se presentan una Tabla que indica los lugares de extracción de muestra para ser ensayados en el laboratorio y determinar su caracterización y verificar cuál de ellos cumple con los requisitos indicados a en el perfil de proyecto.

Tabla 3.1. Coordenadas Geográficas y UTM

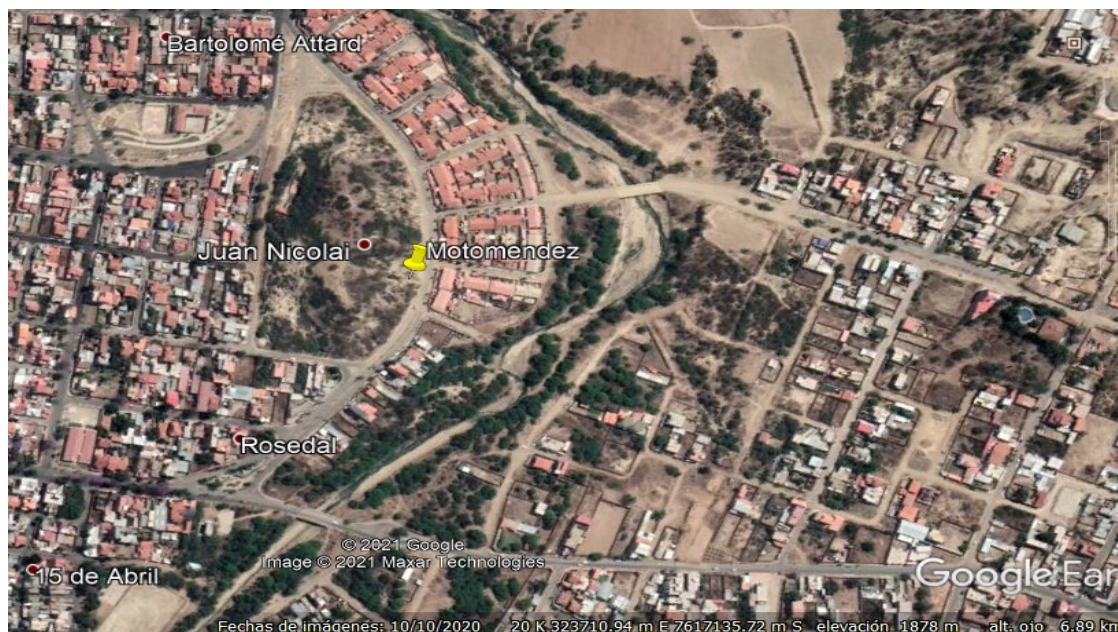
N°	Zona	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
		O	S	E	N
1	Juan Nicolai	64°42'22,58''	21°32'15,54''	323451,00	7617488,21
2	Incertar	64°45'12,13''	21°30'10,55''	318371,17	7621171,82
3	Monte Cristo	64°41'54,46''	21°31'16,58''	324082,20	7619203,12
4	San Blas	64°43'33,86''	21°34'10,44''	321281,00	7613825,00

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.1 Mapa satelital de la zona de extracción de muestras de suelo

A continuación, se muestran imágenes satelitales de las zonas de extracción de muestras.
Zona de Juan Nicolai. - Esta zona se encuentra a 3,5 km del centro de la ciudad de Tarija, en el barrio Moto Méndez sus coordenadas son 64°42'22,58'' O y 21°32'15,54''S.

Figura 3.2. Mapa satelital zona de Juan Nicolai



Fuente: Google maps

Zona de carretera a Tomatitas (INCERTAR). - Esta zona se encuentra a 5.5 km del centro de la ciudad de Tarija, detrás de la empresa INCERTAR, sus coordenadas son $64^{\circ}45'12,56''$ O y $21^{\circ}30'14,78''$ S

Figura 3.3. Mapa satelital zona de INCERTAR



Fuente: Google maps

Zona de Monte Cristo. - Esta zona se encuentra a 6,5 km del centro de la ciudad de Tarija, en el barrio Moto Méndez sus coordenadas son $64^{\circ}41'54,46''$ O y $21^{\circ}31'16,58''$ S.

Figura 3.4. Mapa satelital zona de Monte Cristo



Fuente: Google maps

Zona de San Blas. - Esta zona se encuentra a 6 km del centro de la ciudad de Tarija, en sus coordenadas son $64^{\circ}43'33,86''$ O y $21^{\circ}34'10,44''$ S.

Figura 3.5. Mapa satelital zona de San Blas



Fuente: Google maps

3.2 CRITERIOS DE MUESTREO

3.2.1 Selección de la técnica de Muestreo

Para el presente proyecto, el método, para determinar el tamaño de muestra, será un método probabilístico: El muestreo estratificado.

El muestreo estratificado consiste en dividir el proyecto en partes o sub estratos, en nuestro caso son los diferentes tipos de ensayos que se realizarán para llegar al objetivo.

3.2.2 Tamaño de la Muestra

3.2.3 Datos para el Cálculo del tamaño de Muestra

Tabla 3.2. Datos para el cálculo

Datos para el cálculo	
Confiabilidad	95 %
Margen de error	5 %
Distribución normal “z”	1,96
Desviación estándar	0,10

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Número de ensayos (suelo natural) Juan Nicolai

Tabla 3.3. Número de ensayos en suelo natural

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Granulometría	2
2		Limites	4
3		Contenido de humedad	2
4		Gravedad específica	2
5		Hidrómetro	2
6		Compactación	3
7	Pruebas y resultado	Compresión inconfiada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.1 Número de ensayos (suelo-fibra plástica de 0,5cm) Juan Nicolai

Tabla 3.4. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 0.2%

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfiada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 1%

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfiada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.4.2 Número de ensayos (suelo-fibra plástica de 1,5cm) Juan Nicolai

Tabla 3.7. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 0.2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 1%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Número de ensayos (suelo natural) Incertar

Tabla 3.10. Número de ensayos en suelo natural

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Granulometría	2
2		Limites	4
3		Contenido de humedad	2
4		Gravedad específica	2
5		Hidrómetro	2
6		Compactación	3
7	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.5.1 Número de ensayos (suelo-fibra plástica de 0,5cm) Incertar

Tabla 3.11. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 0.2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 1%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.5.2 Número de ensayos (suelo-fibra plástica de 1,5cm) Incertar

Tabla 3.14. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 0.2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 1%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16. Número de ensayos en muestra suelo-fibra plástica de 2%

Nº	Etapa	Ensayo	Ni
1	Pruebas y resultado	Compactación	3
2	Pruebas y resultado	Compresión inconfínada	3

Fuente: Elaboración propia

3.2.5.3 Tipos de suelo a ser sujetos a estudio

Por motivos de tiempo solo se hará el estudio en dos tipos de arcillas para reforzar cada uno de ellos con fibras de residuos plásticos a diferentes porcentajes.

Tabla 3.17. Tipo de suelo a usar

Nº	Tipo de arcilla
1	Juan Nicolai CH (Clasificación SUCS)
2	Incertar CL (Clasificación SUCS)

Fuente: Elaboración propia

3.2.5.4 Porcentajes y tamaño de fibras

Para el presente proyecto se usarán dos tamaños de fibras plásticas de 0,5cm y 1,5cm a diferentes porcentajes para así encontrar la variación de resistencia al corte de dichos porcentajes que se encuentran en la Tabla 3.18.

Tabla 3.18. Porcentajes de fibras

Nº	% de fibra
1	0,2
2	1
3	2

Fuente: Elaboración propia

3.2.5.5 Total de ensayos

Tabla 3.19. Total de ensayos a realizar

Nº	Etapas	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Granulometría	4
2		Límites	8
3		Contenido de humedad	4
4		Gravedad específica	4
5		Hidrómetro	4
6		Compactación estándar	6
7		Relación de soporte de california	4
8	Pruebas	Compactación estándar	36
9		Compresión inconfiada	42
Total de ensayos			112

Fuente: Elaboración propia

Aplicando el principio de la fijación estadística para reducir el número de ensayos, de manera que sea factible concluir con el proyecto en 1 semestre:

Tabla 3.20. Tabla de fijación estadística

Etapa	Ensayo	Cantidad	σ^2	$Ni*\sigma^2$	fi	N	ni
Caracterización	Granulometría	4	0,10	0,4	0,037	63	2
	Límites	8		0,8	0,074		5
	Contenido de humedad	4		0,4	0,037		2
	Gravedad específica	4		0,4	0,037		2
	Hidrómetro	4		0,4	0,037		2
	Compactación estándar	6		0,6	0,056		4
Pruebas	Compactación estándar	36		3,6	0,333		21
	Compresión inconfiada	42		4,2	0,389		25
		108		10,8	1		63

Fuente: Elaboración propia

$$ni = \frac{\sum(Ni * \sigma^2)}{N * \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{1}{N} * \sum(Ni * \sigma^2)} = 63.42 = 63 \text{ ensayos}$$

Dónde:

ni= Número de ensayos finales

N= Número inicial de ensayos

σ = Desviación estándar

e= Margen de error

z= Distribución normal

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

3.3.1 Desarrollo o diseño

Los suelos requeridos para el desarrollo de este trabajo de graduación y para el cual se busca la proporción suelos-fibras de residuos plásticos serán arcillas CH (clasificación SUCS) o A-7-6 (clasificación AASTHO) y CL (clasificación SUCS) o A-6.

Para tal motivo se identificó varios lugares donde se presume existe este tipo de suelo, en la Tabla 3.1 se muestra el lugar de donde se extrajo las muestras para ser estudiadas.

En base a las normas y especificaciones de los ensayos antes mencionados, a continuación, se presenta una guía paso a paso del proceso seguido para analizar los materiales que conformaran la mezcla suelo-fibra de residuo plástico, y el procedimiento realizado, para encontrar la variación de resistencia a diferentes porcentajes de refuerzo.

3.3.2 Procedimiento a seguir para el análisis del suelo, previo y posterior a su refuerzo con fibra de residuo plástico

En esta sección se presenta paso a paso los procedimientos que se llevan a cabo para realizar los diferentes ensayos que permitan analizar las propiedades del suelo natural.

3.3.3 Exploración de suelo y técnicas de muestreo (Normas ASTM D4220 y AASHTO T248)

Lo primero que se debe realizar es el muestreo de suelo objeto de estudio, conforme a la norma ASTM D4220 y AASHTO T 248 (para mayor información consultar norma).

El muestreo es igualmente importante como cualquier otro ensayo, y por lo cual el encargado de realizarlo tendrá mucho cuidado para obtener muestras que exhiban la naturaleza y condición de los suelos que representan.

Fotografía 3.1. Extracción de muestra zona Juan Nicolai



Fuente: Elaboración propia

Metodología de muestra a cielo abierto

Se hizo la extracción de la muestra de suelo de pozo a cielo abierto es el más satisfactorio, para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en excavar un pozo de dimensiones suficientes para que un técnico pueda directamente bajar y examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural, así como darse cuenta de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el suelo.

Las porciones del suelo fueron protegidas contra pérdidas de humedad introduciéndolas en bolsas emparafinadas. Las muestras inalteradas deberán tomarse con precauciones, generalmente labrando la muestra en una pared que se practique al efecto en la pared del pozo. La muestra se debe proteger contra pérdidas de humedad envolviéndola en una o más capas de manta debidamente impermeabilizada con parafina.

Muestras de suelo en bolsas

Se procede a colocar las muestras en bolsas con pala de mano tratando de mantener el suelo en condición inalterada.

En las bolsas se introduce el material suficiente para realizar todos los ensayos de laboratorio, la cantidad de suelo a extraer para realizar su caracterización en laboratorio será de 50kg.

Fotografía 3.2. Extracción de muestra zona Monte Cristo e Incertar



Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Determinación de los límites de Atterberg

Material y equipo

Aparato de límite líquido (copa de casa grande)

Ranurador

Balanza con precisión de 0,01g

Recipiente para mezclado y almacenamiento (taras)

Espátula

Tamiz N° 40

Horno de secado

Placa de vidrio

Vidrio reloj

Preparación de la muestra

Obtenga una cantidad representativa de la muestra total del suelo, la cual debe estar completamente seca para que los terrones puedan pulverizarse con facilidad y poder obtener un espécimen de suelo de 250 g después de tamizado, para luego obtener el límite

líquido de la muestra, que es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, en base a la norma ASTM D 4318-00, (Para mayor información consultar norma), valor que servirá para clasificar el suelo.

Fotografía 3.3. Preparación de muestra para el ensayo de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento que se lleva a cabo para realizar el ensayo será el que se describe a continuación

Se pulverizó la muestra de suelo seco con un mortero y un pistilo, teniendo cuidado de no quebrar las partículas para hacerlas pasar por la malla N° 40.

Tamizar el material por la malla N° 40 ($425\mu\text{m}$, agitando el tamiz con la mano para asegurar la separación completa de la fracción más fina.

El material que no pasa la malla N° 40 es regresado al mortero y se repiten los procesos de pulverizado y cribado hasta que la mayoría del material fino haya sido disgregado y el material retenido consista en granos individuales para poder obtener una muestra de 250g de peso.

Una vez obtenida la cantidad requerida de material para realizar el ensayo coloque la muestra en un plato y agregue agua con un recipiente para poder hidratar por completo la muestra de suelo, mezcle bien la muestra con una espátula.

Fotografía 3.4. Equipo Casa Grande y muestra de suelo para ensayo



Fuente: Elaboración propia

Este proceso se repite hasta que la muestra está hidratada y haya formado una pasta dura, posteriormente, se realiza el ensayo con el equipo Casa Grande.

3.3.4.1 Límite líquido

Se mezcla bien el material hidratado, inmediatamente antes de iniciar el ensayo.

Tomar con la espátula una porción de suelo y colóquela en la copa de latón del dispositivo de casa grande, distribuyéndola con el menor número de golpes de espátula posibles, hasta que se obtenga un espesor de aproximadamente 10 mm como máximo y se deje nivelada la superficie en un plano horizontal.

El suelo remanente se devuelve al plato, luego se divide la masa del suelo de la copa de Casagrande utilizando un rasurador, trazando una línea del punto más alto al punto más bajo en el borde de la copa, cuando haga la ranura, sostenga el acanalador contra la superficie de la copa de latón haciendo un movimiento circular de adelante hacia atrás. Manteniéndolo perpendicular a la superficie de la copa de Casagrande durante todo el movimiento.

Fotografía 3.5. Realización de ensayo de Casa Grande



Fuente: Elaboración propia

Se levanta y deja caer la copa por medio de una manivela a una frecuencia de 1,9 a 2,1 caídas por segundo, hasta que las dos mitades del suelo al dar los golpes se unan en el fondo de la ranura, una distancia de 13mm (1/2 pulg.)

Para obtener el valor del límite líquido plotee la relación entre el contenido de agua (%w) y el número correspondiente de golpes de la copa en un gráfico. El contenido de agua en las ordenadas (Y), y el número de golpes en las abscisas (X). Luego dibuje la mejor línea recta para unir lo mejor posible los tres o más puntos ploteados.

Tome el contenido de agua de la intersección de la línea de las abscisas correspondiente a 25 golpes con la línea que une la dispersión de los valores registrados que se proyecta hasta cortar con una línea horizontal a las ordenadas como el límite líquido.

3.3.4.2 Límite plástico

Seleccione 20g o más del espécimen de suelo preparado para el ensayo de límite líquido o del suelo restante de dicho ensayo. Luego reduzca el contenido de humedad del suelo hasta que posea una consistencia en la cual pueda rolarse sin adherirse a las manos cuando sea extendido o se mezcle continuamente en una superficie plana y horizontal.

Seleccione una porción de suelo de la muestra de 20g que se tomó anteriormente para formar una pasta elipsoidal. Luego rolé esta masa de suelo colocándola entre la palma de

la mano o los dedos y una superficie horizontal lisa con suficiente presión, hasta hacer un hilo de diámetro uniforme de aproximadamente 3 mm a lo largo de su longitud en un lapso de tiempo máximo de 2 minutos.

Fotografía 3.6. Ensayo de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Cuando haya alcanzado el diámetro requerido del hilo de suelo, desmenuce ésta en varias porciones. Seguidamente junte las porciones y amáselas de nuevo hasta darles una forma aproximadamente elipsoidal. Rolé el suelo nuevamente hasta que el hilo sea de un diámetro de 3mm y repita todo el proceso anterior hasta que aparezcan grietas en él o se quiebre bajo presión del amasado y ya no sea posible formarlo de nuevo.

Determine la masa del suelo con el recipiente y regístrelas en la hoja de datos correspondiente. El proceso se repite hasta que en el recipiente haya por lo menos 6g de suelo. Luego se registra la masa del recipiente con el suelo húmedo y se determina posteriormente el contenido de humedad del suelo en el recipiente, de acuerdo con el método ASTM D 2216.

3.3.4.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad de un suelo es el rango en el contenido de agua, expresado como porcentaje de la masa de suelo secada en horno, dentro del cual el material se encuentra en un estado plástico; siendo la diferencia numérica entre el límite líquido y límite plástico del suelo.

Para los suelos que fueron objeto de estudio se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 3.21. Tabla resumen de límites de Atterberg

Límites de Atterberg ASTM D4318			
Muestra	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Juan Nicolai	59,79	29,,22	30,57
Incertar	37,78	22,12	15,66
Monte Cristo	56,54	33,57	22,96
San Blas	58,44	33,51	23,93

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado ASTM D4222 y AASHTO T88

Equipo necesario

Serie de tamices (N°10, N°40, N°200)

Balanza de 0,1 y 0,01 gramos de precisión

Bandejas

Procedimiento

Este procedimiento cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75µm (N° 200) en suelo por lavado en base a la norma AASHTO T 11-99 (Para mayor información consultar norma). Partículas de arcilla y otras partículas de agregado que se dispersan por el agua de lavado, así como materiales solubles en agua, pueden ser removidas del suelo durante este ensayo.

Secar la muestra de ensayo hasta alcanzar una masa constante, a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F). Determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa de la muestra de ensayo.

Después de secar y determinar la masa, colocar la muestra de ensayo en la bandeja y agregar suficiente agua para cubrirla. Ningún detergente, agente dispersante, u otra sustancia se añadirá al agua. Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una

separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75- μm (N° 200) de las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión. El uso de una cuchara grande u otra herramienta similar para revolver y agitar el suelo en el agua de lavado tiene resultados satisfactorios. Inmediatamente vierta el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disuelva sobre el tamiz N° 200.

Fotografía 3.7. Muestra para ensayo de granulometría método de lavado



Fuente: Elaboración propia

Añada una segunda cantidad de agua a la muestra en el recipiente, agitar, y decantar como antes. Repetir esta operación hasta que el agua de lavado salga clara.

Fotografía 3.8. Lavado de muestra



Fuente: Elaboración propia

Regresar todo el suelo retenido en el tamiz N° 200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada. Secar el suelo lavado hasta obtener masa constante a una temperatura de $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($230 \pm 9 \text{ }^\circ\text{F}$) y determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa original de la muestra.

Fotografía 3.9. Secado, pesado de muestra



Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la realización de este ensayo utilizando agua de chorro para el suelo en estudio son los que a continuación se presentan:

Tabla 3.22. Resumen de granulometría método de lavado (suelo natural)

Método de lavado ASTM D422									
Muestra	Granulometría								
	% que pasa el Tamiz								
	3"	2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	40	200
Juan Nicolai	100	100	100	100	100	100	100	98,91	97,71
Incertar	100	100	100	100	100	100	100	99,41	98,60
Monte Cristo	100	100	100	100	100	100	100	99,60	99,02
San Blas	100	100	100	100	100	100	100	99,38	99,58

Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 Y ASTM D 2487

Una vez que se tiene una muestra representativa del material selecto, se procede a clasificar el suelo, en base a la norma AASHTO M 145-91(2000) (Para mayor información consultar norma), y también por la clasificación SUCS en base a la norma ASTM D 2487

3.3.6.1 Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91(2000)

Se describe un procedimiento para clasificar los suelos en siete grupos, basada en datos de laboratorio y determinación de la distribución del tamaño de partículas, límite líquido, e índice de plasticidad. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un "índice de grupo," que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica. El grupo de clasificación, incluido el índice de grupo debe ser útil para determinar la calidad relativa de los suelos ocupados en la construcción de estructuras con movimientos de tierra, especialmente terraplenes, bases, sub-bases.

Clasificación de suelos AASHTO M-145

Datos de Granulometría:

% Pasa tamiz N°10= 100

% Pasa tamiz N°40= 98,91

% Pasa tamiz N° 200= 97,71

Datos de límites de Atterberg:

LL= 59,79 IP= 30,57

LP= 29,22

Índice de Grupo:

a= 62,71 b= 55 $IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d$

$e = 0$ $d = 20,57$ $IG = 24$

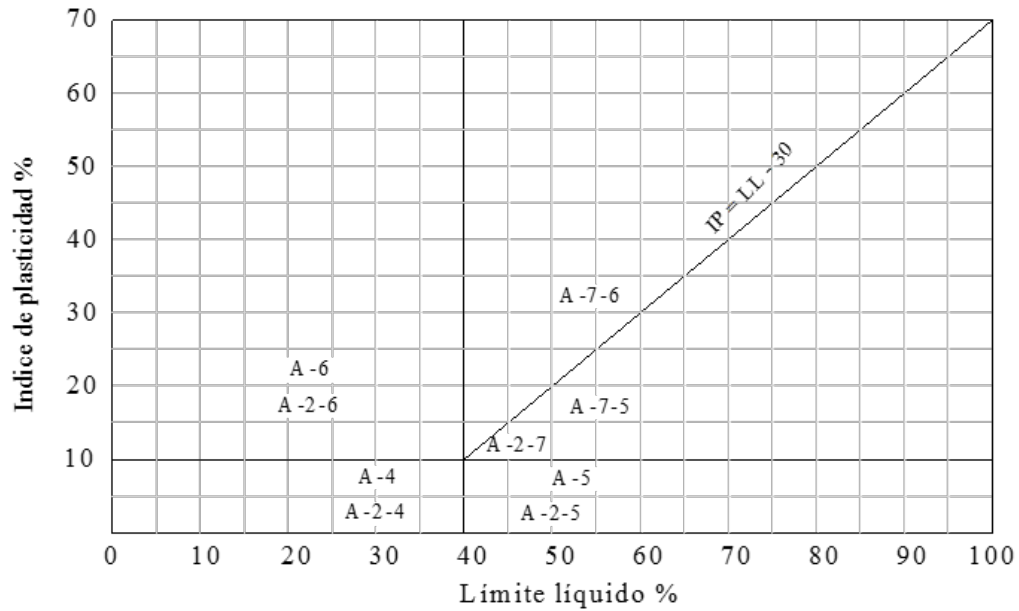


Tabla 3.23. Ejemplo de clasificación de suelos método AASHTO

Clasificación del suelo	Descripción
AASHTO	A-7-6 (24)

Fuente: Elaboración propia

3.3.6.2 Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487

La clasificación del suelo de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos ASTM D 2487-00 (Para mayor información consultar norma), basa la clasificación de los suelos para propósitos ingenieriles; mediante el análisis de diferentes parámetros como lo son el límite líquido e índice de plasticidad.

A continuación, se presentan un ejemplo de la clasificación de suelos por el método SUCS para muestras de suelo extraídas:

Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487

Datos de Granulometría:

% Pasa tamiz N° 200= 97,51

Datos de límites de Atterberg:

LL= 59,72

IP= 30,57

LP= 29,22

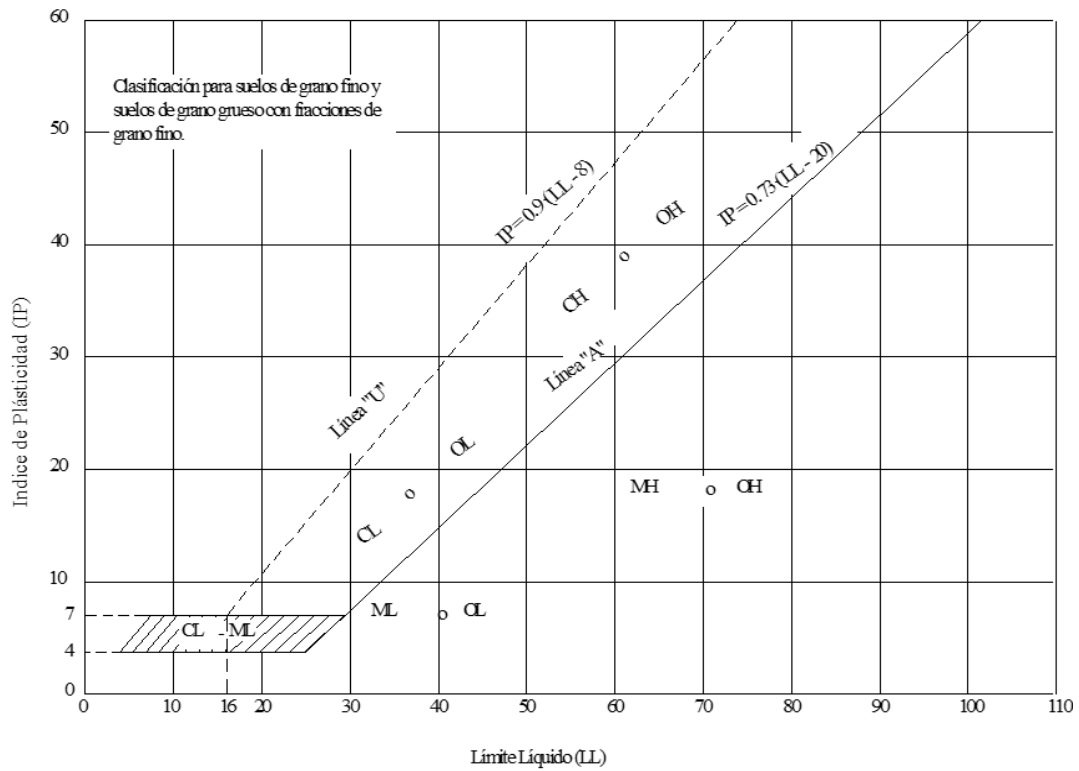


Tabla 3.24. Ejemplo de clasificación de suelos método SUCS ASTM D 2487

Clasificación del suelo		Descripción
SUCS	CH	Arcilla densa

Fuente: Elaboración propia

3.4 SELECCIÓN DE LA MUESTRA PARA REALIZAR LA ESTABILIZACIÓN

Después de realizar los ensayos de límites de Atterberg y granulometría se procedió a clasificar el suelo resultados que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 3.25. Tabla resumen de clasificación de suelos

Clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487				
Muestra	AASHTO			SUCS
	Clasificación	Índice de grupo	Descripción	Clasificación
Juan Nicolai	A-7-6	24	Suelo arcilloso	CH arcilla densa
Incertar	A-6	13	Suelo arcilloso	CL arcilla limosa
Monte Cristo	A-7-5	20	Suelo arcilloso	MH limo elástico
San Blas	A-7-5	21	Suelo arcilloso	MH limo elástico

Fuente: Elaboración propia

Según los datos obtenidos se observa que los suelos que cumple con los requisitos que se enunciaron al principio de este trabajo, donde se indica que dicho trabajo se lo realizará en suelos que sean CH y CL según la clasificación SUCS o un A-7-6, A-6 según clasificación AASHTO, es la extraída de la zona de Juan Nicolai como la de Incertar, por tal motivo después de la caracterización de todos los suelos ,los ensayos para compresión inconfiada se los realizó en estos suelos, dejando de lado las demás muestras.

3.4.1 Determinación de la gravedad específica de los sólidos ASTM D 854-02

Material y equipo

Frasco volumétrico, con marca de enrase

Balanza con precisión de 0,01 g

Horno de secado

Termómetro

Tamiz N° 200

Pipeta

Hielo

Accesorios baño María frío y caliente

Procedimiento

Calibración de frasco volumétrico

Se observa que los vasos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen es decir si se aumenta la temperatura, el vidrio tiende a la dilatación incrementando ligeramente su volumen y cuando se disminuye la temperatura su volumen también disminuye. El agua sufre un incremento en su peso cuando se aumenta su temperatura o viceversa.

Estos cambios si bien no son considerables, pueden corregirse a través de la realización de una curva de calibración para cada frasco volumétrico.

Fotografía 3.10. Calibración de frasco volumétrico

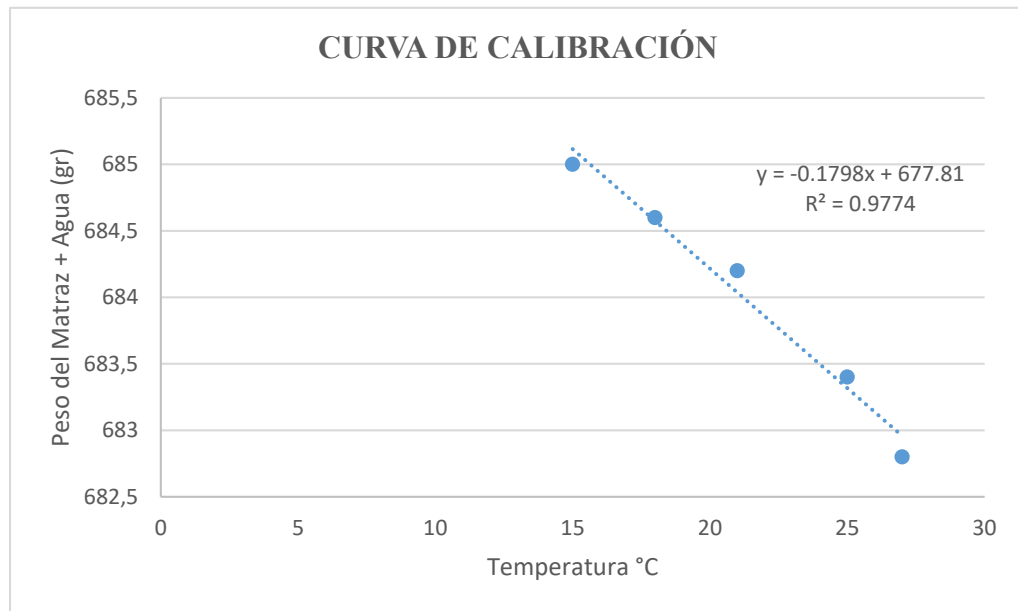


Fuente: Elaboracion propia

A continuación, se presenta la calibración del frasco que se trabajará para obtener el peso específico relativo del suelo en estudio.

Tabla 3.25. Calibración de frasco volumétrico
Gravedad específica de los sólidos ASTM D854-02

Nº De Ensayos	Peso Del Frasco + Agua (gr)	Temperatura (°C)
1	671,70	40
2	672,80	27
3	673,40	25
4	674,20	21
5	674,60	18
6	675,00	15



Fuente: Elaboración propia

Determinación del peso específico relativo

Para esta investigación, se escoge el Método B el cual consiste en obtener la gravedad específica mediante un suelo seco, el cual se describe de la siguiente manera:

Fotografía 3.11. Gravedad específica de los sólidos



Fuente: Elaboración propia

Para la muestra de suelo tamice el material a utilizar en la prueba por el tamiz N° 200, obteniendo una cantidad, según el tipo de suelo. Si el tipo de suelo a utilizar es arcilla entonces tomar 50 ± 10 g del material tamizado. Seque la muestra del suelo en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta obtener una masa constante.

Tabla 3.26. Tabla de peso específico para diferentes suelos

Tipo de suelo	Masa del espécimen seco (g), para matraz de 500 ml)
SP,SP-SM	100 ± 10
SP-SC, SM,SC	75 ± 10
Limo o Arcilla	50 ± 10

Fuente: Norma ASTM

Determine y registre la masa del frasco volumétrico (Matraz) limpio y seco, utilizando una balanza de 0,1 g de legibilidad. Realice este procedimiento al menos 3 veces, para obtener un promedio de los pesos. Luego llene el frasco volumétrico (Matraz) a una

cantidad de ½ del bulbo, obtenga y registre su peso en la balanza, coloque un embudo en el matraz, (verificando de esta manera que el cuello de este sobrepase más allá de la marca de calibración). Seguidamente deposite el espécimen del suelo directamente en el embudo y con la varilla con papel toalla limpie con mucho cuidado el cuello del matraz sin tocar el agua del fondo.

Obteniendo la lechada (agua y suelo), agite el frasco volumétrico con cuidado y tome su peso y regístrelo como peso del matraz + agua + suelo. Luego llene de agua destilada el frasco volumétrico hasta una altura que llegue donde empieza el cuello.

En la etapa de ebullición o extracción de aire, vierta agua en una olla a un nivel de ¾ de su capacidad y colócala en una cocina a una temperatura media, colocando en ella el matraz con la lechada. Para extraer el aire atrapado en el frasco volumétrico agite las veces que sean necesarias y séquelo con una franela, la duración de la etapa de extracción de aire debe tener como mínimo unas 2 horas, hasta que la lechada deje de expulsar burbujas de aire y por último, se retira de la olla y se seca con franela para poder dejarlo reposar y que su temperatura baje.

Utilice la balanza de 0,1g de legibilidad y obtenga la masa de suelo + agua + matraz (aforado) y posterior a ello tome la temperatura del matraz + agua +suelo con el termómetro de 0,1 °C de legibilidad y de esta manera registre ambas lecturas en la hoja de datos correspondientes a este ensayo.

Cuando se tiene los datos del peso del matraz + agua + suelo y la temperatura de ensayo, se va a la carta de calibración del matraz y se obtiene el dato del peso del matraz + agua (aforado) encontrando la gravedad específica mediante la siguiente formula:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{m+a} + W_s + W_{m+a+s}}$$

Dónde:

G_s= Gravedad específica

W_s= Peso de suelo

W_{m+a}= Peso matraz más agua

Wm+a+s= Peso matraz más agua más suelo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la gravedad específica de los sólidos de las muestras.

Tabla 3.27. Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos ASTM D854-02

N° Ensayo	Gravedad Específica de los sólidos	
1	Juan Nicolai	2,69
2	Incertar	2,70
3	Monte Cristo	2,55
4	San Blas	2,58

Fuente: Elaboración propia

3.4.2 Determinación del tamaño de las partículas por ensayo de hidrometría

ASTM 422-63

Material y Equipo

Para determinar el tamaño de las partículas se realiza en ensayo de granulometría por sedimentación en el cual se utilizan los siguientes instrumentos:

Muestra de suelo “secada al aire”

Agente dispersor y/o de floculante

Balanza sensible a 0,01 g

Hidrómetro graduado para leer ya sea la gravedad específica o gramos/litro de la suspensión

Cilindros de sedimentación (probetas): con una capacidad de 1000 ml

Termómetro con una precisión de 0.5°C (1°F)

Tamiz N° 200

Cronómetro

Pipeta

Recipientes para muestras

Procedimiento

Exponga al aire la muestra de suelo recibida de campo a la temperatura ambiente, hasta que seque completamente y luego pasar por el tamiz No 200.

Tome 60 g de muestra, para realizar el ensayo y determinar su humedad higroscópica según la norma ASTM D 422-63.

Fotografía 3.12. Preparación de muestra para ensayo de hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Preparación de la solución dispersante (defloculante)

Utilizando una balanza de 0,01g de legibilidad, obtenga una masa de 20 g de hexametáfosfato de sodio. Deposite agua destilada o desmineralizada en una probeta de 500 ml (hasta la mitad de la altura) y agregue el agente dispersor (hexametáfosfato de sodio) en ella. Luego agite la solución hasta que el hexametáfosfato de sodio se disuelva completamente y se agrega agua hasta completar los 500 ml.

Fotografía 3.13. Probeta más muestra de suelo



Fuente: Elaboración propia

Determinación de la corrección por menisco (Cm)

Limpiar con alcohol la superficie del vástago del hidrómetro y se sumerge en una probeta de 1000 ml llena con agua destilada o desmineralizada. Y tome dos lecturas en la escala graduada del hidrómetro, una de ellas en la parte superior del menisco y la otra en la parte inferior (siguiendo la superficie horizontal del agua). Registre la corrección del menisco (Cm) como la diferencia de las lecturas tomadas anteriormente:

Determinación de la corrección por defloculante

Limpiar con alcohol la superficie del vástago del hidrómetro, y se sumerge en una probeta de 1000 ml parcialmente llena con agua destilada, posteriormente tome una lectura en la parte inferior del menisco en la escala graduada del hidrómetro, y luego se retira de la probeta.

Agregar 125 ml de la solución dispersante y complete el llenado de la probeta con agua.

Agitar la solución, y luego sumerja nuevamente el hidrómetro tomando una nueva lectura en la parte inferior del menisco. Registre la corrección por defloculante (Cd) como la diferencia de las lecturas tomadas.

Determinación de la corrección por temperatura (Ct)

Se registró cada una de las temperaturas en cada una de las lecturas del hidrómetro en la probeta de ensayo. Posteriormente, determine la corrección para cada una de las temperaturas registradas, utilizando Tabla de factores de corrección por temperatura para el análisis granulométrico de un suelo por sedimentación dada por la norma ASTM D 422-63.

Dispersión e Hidrometría de la muestra de suelo

Se colocó la cantidad de 60g en un Erlenmeyer de 250 ml, y se agregan 125 ml de la solución dispersante. Posteriormente agite utilizando una varilla de vidrio hasta formar una lechada, luego se deja reposar por lo menos 16 horas.

Transfiera la lechada de suelo-agua antes preparada, al agitador mecánico y enjuague cualquier remanente en el Erlenmeyer con agua destilada o desmineralizada, luego agregue agua si es necesario, llenando hasta un nivel de 2/3 del vaso agitador. Posteriormente agite por un periodo de 1 minuto.

Luego, colocar la lechada a una probeta graduada y agregue agua destilada hasta que su volumen total sea de 1000 ml, enjuagando el vaso para prevenir la pérdida de material remanente.

Se tapa con un tapón el extremo de la probeta, posteriormente se agita por un periodo de 1 min, haciéndola girar en un plano vertical de 180°. El número de giros durante el minuto deberán ser 60, contando hacia arriba y abajo como dos giros.

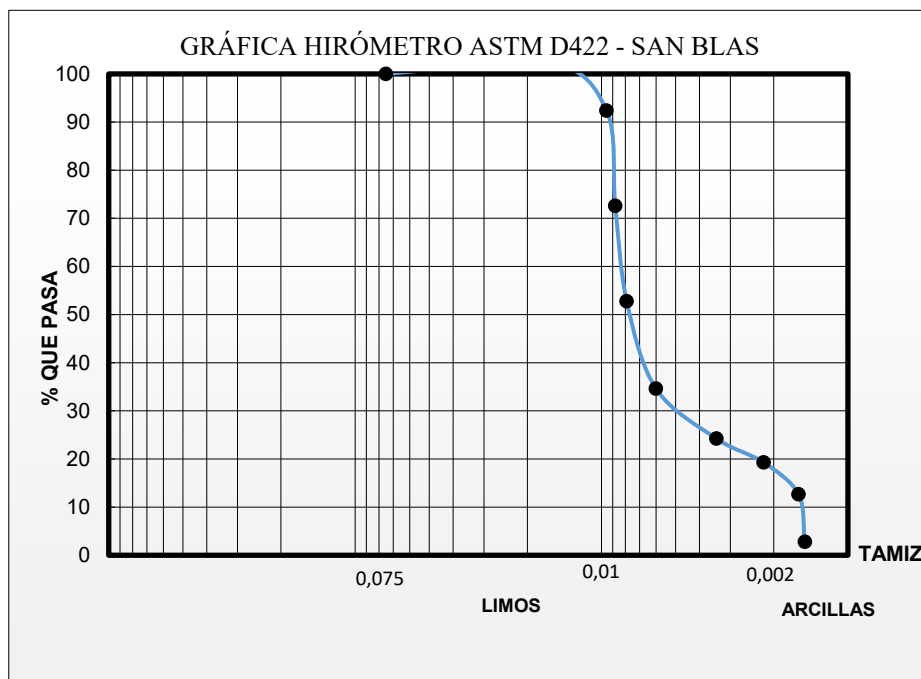
Colocar la probeta con la lechada sobre una mesa fija, y active simultáneamente el cronómetro y tome las lecturas del hidrómetro y temperatura en los intervalos de tiempo: 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 y 2880 minutos, insertando cuidadosamente el hidrómetro en aproximadamente 20 a 25 segundos antes de cada lectura.

A continuación, se presentan resumidamente los resultados del análisis granulométrico e hidrométrico de las muestras de suelo natural.

Tabla 3.28. Resumen de ensayo de hidrómetro San Blas-Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. Partícula mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,016	99,00
0,009	92,40
0,008	72,60
0,007	52,80
0,006	34,65
0,003	24,26
0,002	19,31
0,001	12,71
0,001	2,81

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	82,83
% Arcilla parcial =	17,17
% Pasa 200 del total =	96,44
% Limo del total =	79,88
% Arcilla del total =	16,56

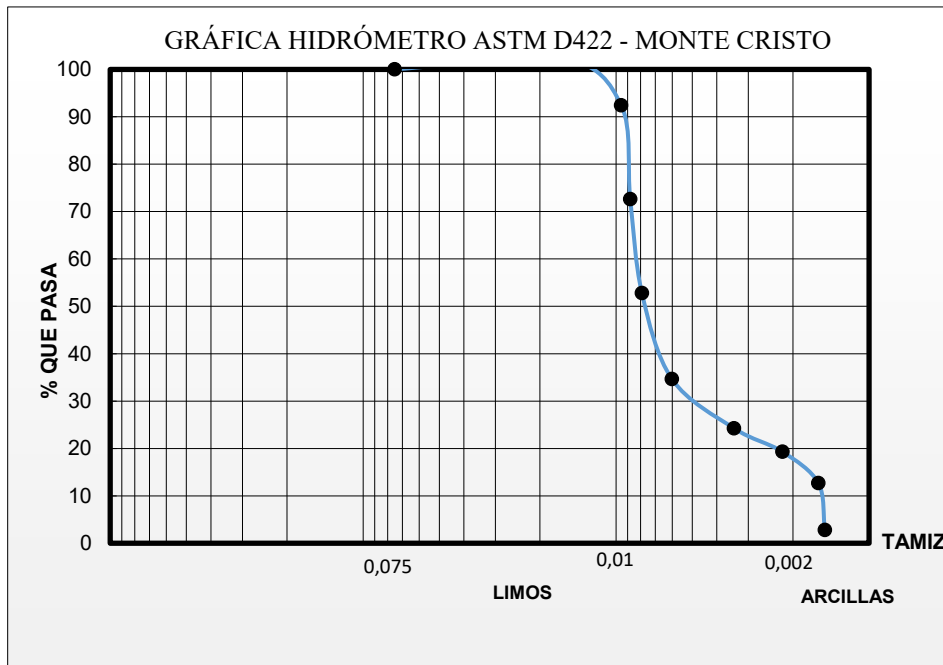


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29. Resumen de ensayo de hidrómetro Monte Cristo- Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. Partícula mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,016	99,00
0,009	92,40
0,008	72,60
0,007	52,80
0,006	34,65
0,003	24,25
0,002	19,31
0,001	12,71
0,001	2,81

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	82,83
% Arcilla parcial =	17,17
% Pasa 200 del total =	96,98
% Limo del total =	80,33
% Arcilla del total =	16,65

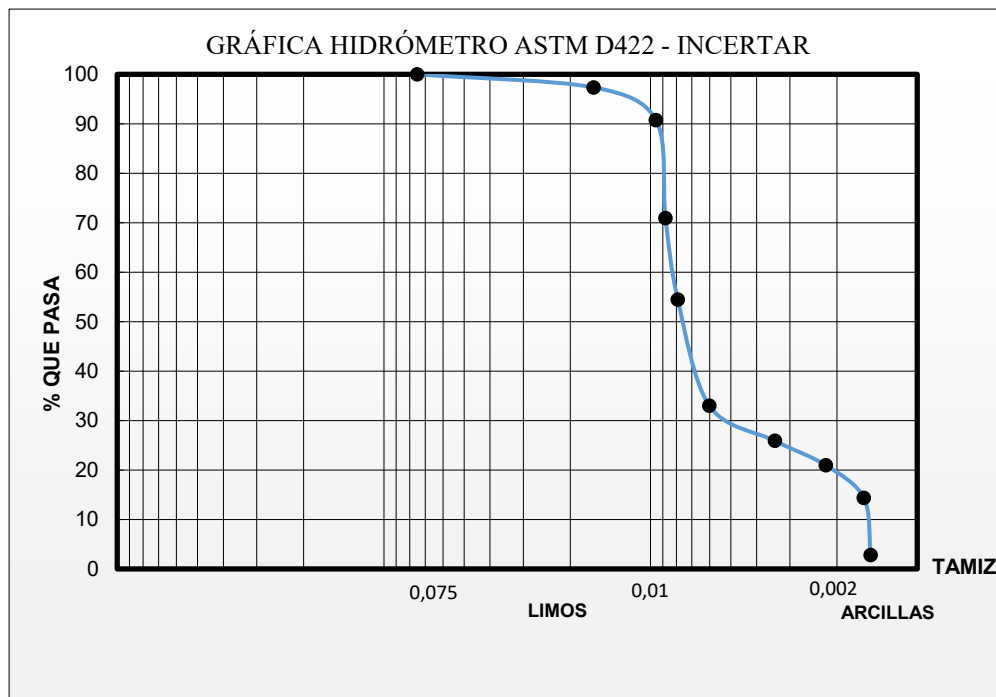


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30. Resumen de ensayo de hidrómetro Incertar- Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. Partícula mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,016	97,35
0,009	90,95
0,008	70,95
0,007	54,45
0,006	33,00
0,003	25,91
0,002	20,96
0,001	14,36
0,001	2,81

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	81,18
% Arcilla parcial =	18,82
% Pasa 200 del total =	97,62
% Limo del total =	79,25
% Arcilla del total =	18,37

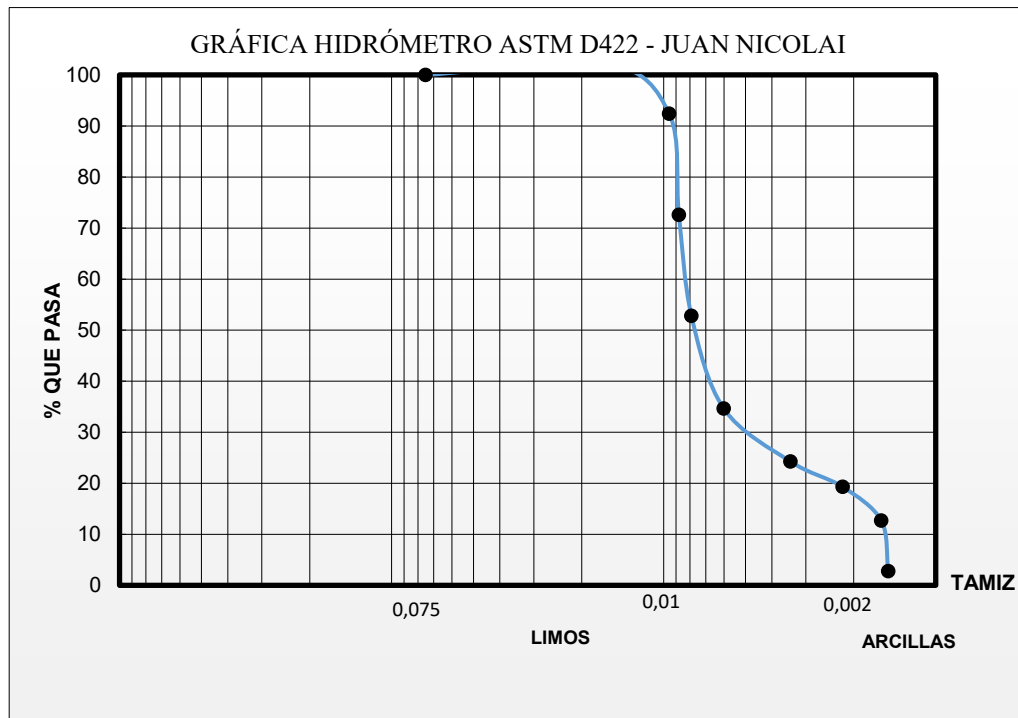


Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31. Resumen de ensayo de hidrómetro Juan Nicolai -Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. Partícula mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,016	99,00
0,009	92,40
0,008	72,60
0,007	52,80
0,006	34,65
0,003	24,26
0,002	19,31
0,001	12,71
0,001	2,81

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	82,83
% Arcilla parcial =	17,17
% Pasa 200 del total =	97,71
% Limo del total =	80,93
% Arcilla del total =	16,78



Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y rocas a través de su masa ASTM D 2216-03

Lo primero para seguir con el análisis del suelo en estado natural es poder calcular el contenido de humedad de muestras de suelo en base a la norma ASTM D 2216-03 (Para mayor información consultar norma), ya que esta labor se repetirá en todos los ensayos que precede al estudio de los mismos.

La determinación del contenido de humedad es un ensayo rutinario para determinar la cantidad de agua presente en un suelo en términos de su peso seco.

Podría definirse el contenido de humedad como la relación de la masa de agua contenida en los espacios porosos de un suelo o roca a la masa sólida de partículas en ese material, expresado como un porcentaje.

Procedimiento

Seleccione el tamaño de la muestra, para determinar el contenido de humedad en base a las especificaciones del ensayo que se desee realizar.

Debido a que el suelo analizado, para fines de investigación consta de una muestra alterada, utilizar el método que a continuación se describe:

Es posible la manipulación sin pérdida de humedad y sin segregación.

Tome material con una cuchara grande y mézclelo completamente.

Reduzca al tamaño requerido por medio del cuarteo o separación.

Si no es posible la manipulación ni el mezclado y/o separado, usar una cuchara.

Fotografía 3.14. Preparación de muestra para ensayo de contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

Ejecución

Determine y registre el peso del recipiente (o tara) del espécimen limpio y seco (y su tapadera si se utilizará).

Coloque el espécimen de ensayo húmedo en el recipiente. Determine el peso del recipiente y el material húmedo utilizando una balanza de 0,01g. de precisión, para especímenes con masa hasta 200g. o una balanza de precisión de 0,1g. para especímenes mayores de 200g.

Coloque el recipiente con material húmedo en el horno de secado, seque el material hasta que alcance una masa constante. Manteniendo el horno de secado a una temperatura de $110 \pm 50C$.

Retire el recipiente del horno, después de secar el material, déjelo enfriar junto con el material a temperatura ambiente o hasta que el recipiente pueda ser manejado cómodamente sin necesidad de utilizar guantes y así esto no afecte el funcionamiento de la balanza.

Tabla 3.32. Tabla resumen de contenido de humedad en suelos ASTM D2216-03

Método del horno		
Muestra N°	%W	
1	Juan Nicolai	7,83
2	Incertar	4,93
3	Monte Cristo	6,38
4	San Blas	7,52

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Compactación AASHTO T 99-03

Se sabe que el suelo está formado por partículas de tamaño y forma variada, y que entre estos existen espacios intergranulares llamados vacíos, que se hallan llenos a la vez por aire, agua o ambos.

Así mismo, se sabe que cuando una masa de suelo se encuentra en estado suelto ocupa mayor volumen, porque tiene mayor número de vacíos. En cambio, cuando se comprime esta masa de suelo se hace más compacta y se observa un decrecimiento del volumen total, a causa de la disminución del volumen de vacíos. Esta operación de “comprimir” una masa de suelo, se llama “compactación”.

Al compactar un suelo, se obtienen las siguientes ventajas:

Se establece un contacto más firme entre las partículas.

Las partículas de menor tamaño son forzadas a ocupar los espacios formados por los de mayor dimensión.

Cuando un suelo es compacto, aumenta su valor de soporte y se hace más estable.

Como las partículas se encuentran firmemente adheridas después de la compactación, la masa de suelo será más densa y su volumen de vacíos quedará reducido a un mínimo, por lo tanto, la capacidad absorbente de agua de un suelo, quedará grandemente reducida por efecto de la compactación.

Para obtener una adecuada lubricación y disminuir así la resistencia a la fricción existente entre partículas, deberá de controlarse debidamente la cantidad de agua al compactar un

suelo. Si es insuficiente, no habrá buena lubricación, y si es excesiva, las fuerzas hidrostáticas empujarán y tenderán a separarse las partículas.

Por lo tanto, se hace necesario calcular debidamente la cantidad de agua para generar la “humedad óptima” que ha de tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir la “densidad máxima”.

Muchas veces, al desconocer de los requerimientos de compactación que tiene un proyecto, se plantea realizar todas las compactaciones con la energía AASHTO T-180 ya que de esta manera se garantiza una mejor compactación, pero por otro lado se incrementan los gastos, siendo necesarios un mayor grado de compactación implicando más recursos; al presupuestar algunas empresas formulan sus costos en base a la energía AASHTO T-99, para regular gastos ya que el grado de densidad se alcanza con menos proceso de compactación y en un menor tiempo.

Material y equipo

Muestra de suelo

Martillo de compactación de 10 lb

Molde con su respectivo (collarín y base) de 4" de diámetro

Regla enrrazadora.

Balanza con 0,1 g y 1 g de precisión

Horno de secado

Tamiz N° 4 (4.75 mm)

Bandeja metálica

Cucharón

Tenaza

Espátula

Brocha

Procedimiento

Para realizar este ensayo existen cuatro métodos los cuales son: Método A, Método B, Método C y Método D. La diferencia entre los métodos A y C es que para el A el suelo es tamizado en la malla N° 4 y se pesan 3 kg para cada muestra y para el C se tamiza en la malla ¾ y se pesan 5 kg para cada muestra, en ambos se utiliza el molde de 4" de diámetro.

Por lo tanto, la diferencia entre los métodos B y D, es que para el B se utiliza la malla N° 4 y se pesan 7 kg para cada muestra y finalmente para el D se tamiza en la malla 3/4 y se pesan 11 kg para cada muestra, para ambos métodos se trabaja con el molde 6" de diámetro.

Selección del método

Para fines de esta investigación, se analizan datos obtenidos por el método A, en el cual se utiliza el molde de 4" de diámetro, el tamiz N° 4 y un martillo de compactación de 10 lb.

Determinación del volumen y peso del molde de compactación: Mida 6 veces el diámetro del molde de compactación tanto en la parte superior e inferior del mismo utilizando un vernier (pie de rey) con una precisión de 0,01 pulgadas (obteniendo un promedio), determine y registre la masa del molde sin la base y sin el collarín con una balanza de 1 g de precisión, por último, mida la altura del molde en la parte interior al menos cuatro veces alrededor de su circunferencia utilizando un vernier. Y luego calcule el promedio de las alturas.

Preparación de la muestra de ensayo

Seque la muestra al aire o en un horno de secado a una temperatura de 60°C, luego desmenuce todos los grumos existentes utilizando un mortero y pistilo, de manera que se reduzca el tamaño de las partículas.

Fotografía 3.15. Preparación de muestra para compactación T-99



Fuente: Elaboración propia

Tamice en la malla N° 4 una cantidad representativa de material pulverizado, lo suficiente para realizar 5 puntos y descarte el material retenido en ella.

Calcule la humedad natural del suelo, para poder determinar la cantidad de agua a agregar a cada una de las muestras para que puedan llegar a la humedad de prueba, tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$V_w = \frac{\%W_{ensayado} - \%W_{actual}}{100} * W_{ss}$$

Dónde:

V_w= Volumen de agua

%W= Porcentaje de humedad

W_{ss}= Peso de suelo seco

Deposite cada muestra en una bandeja metálica y mezcle manualmente, con la cantidad de agua necesaria, utilice una probeta 1000 ml (según sea el porcentaje de humedad), para asegurar una distribución uniforme y déjelas reposar en bolsas plásticas durante 16 horas como mínimo.

Fotografía 3.16. Muestra con 5 % de humedad para compactación



Fuente: Elaboración propia

Compactación de la muestra

Ensamble la placa en el molde y con el collarín asegurándolo correctamente, luego coloque el molde en una superficie plana y rígida, para que se realice el ensayo sin ningún tipo de error, inmediatamente ubique en el molde el suelo anteriormente preparado hasta crear una capa de espesor uniforme y que pueda ocupar la quinta parte del molde. Posteriormente el suelo colocado en el molde, compacte utilizando un martillo apisonador dejándolo caer desde la altura de la manga, proporcionando 25 golpes distribuidos uniformemente dentro del molde por cada capa.

Fotografía 3.17. Compactación de suelo T-99



Fuente: Elaboración propia

Remueva el collarín del molde y desbaste cuidadosamente el suelo compactado hasta aplanar la parte superior del molde y utilice una regla enlazadora (llene los agujeros y presione con los dedos para luego emparejar con la regla enlazadora), desmonte la placa base del molde, después limpie la parte externa del molde con una brocha. Posteriormente determine la masa del molde compactado (sin placa base) y registre en una balanza de 1g de precisión.

Fotografía 3.18. Pesado de muestra más molde T-99



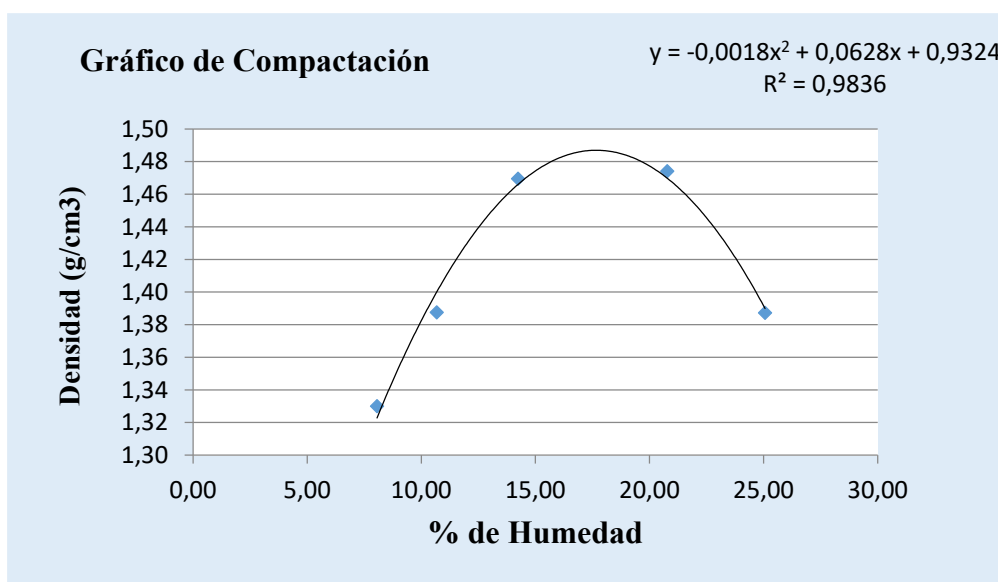
Fuente: Elaboración propia

Extraiga el espécimen compactado utilizando el gato hidráulico, luego corte en 4 porciones el espécimen y calcule una masa de 30 g por cada porción y luego coloque en taras debidamente pesadas. Luego obtenga la masa de cada porción húmeda utilizando la balanza de 0,1 g de legibilidad. Seguidamente coloque al horno a una temperatura que no sobrepase los 60° C en un tiempo mínimo de 24 horas y por último una vez sacados del horno deje enfriar, para tomar la masa seca de cada porción de suelo.

Ejecute el paso anterior en 6 ocasiones con los contenidos de humedad dependiendo los valores de compactación que se requieran.

Tabla 3.33. Tabla de compactación AASHTO T-99 Incertar-Compactación de suelos (Proctor)

Muestra: Única	Volumen:	943,3	cm3			
Nº de capas		3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa		25	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde		5535,33	5628,24	5763,21	5859,15	5816,20
Peso del molde		4179,60	4179,60	4179,60	4179,60	4179,60
Peso suelo húmedo		1355,73	1448,64	1583,61	1679,55	1636,60
Volumen de la muestra		943,30	943,30	943,30	943,30	943,30
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)		1,44	1,54	1,68	1,78	1,73
Cápsula Nº		1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula		1456,10	1534,00	1545,30	1705,10	1791,00
Peso suelo seco + cápsula		1356,40	1398,70	1365,50	1429,00	1458,50
Peso del agua		99,70	135,30	179,80	276,10	332,50
Peso de la cápsula		118,95	131,43	103,01	100,31	131,73
Peso suelo seco		1237,45	1267,27	1262,49	1328,69	1326,77
Contenido de humedad (%h)		8,06	10,68	14,24	20,78	25,06
Densidad suelo seco (gr/cm ³)		1,33	1,39	1,47	1,47	1,39

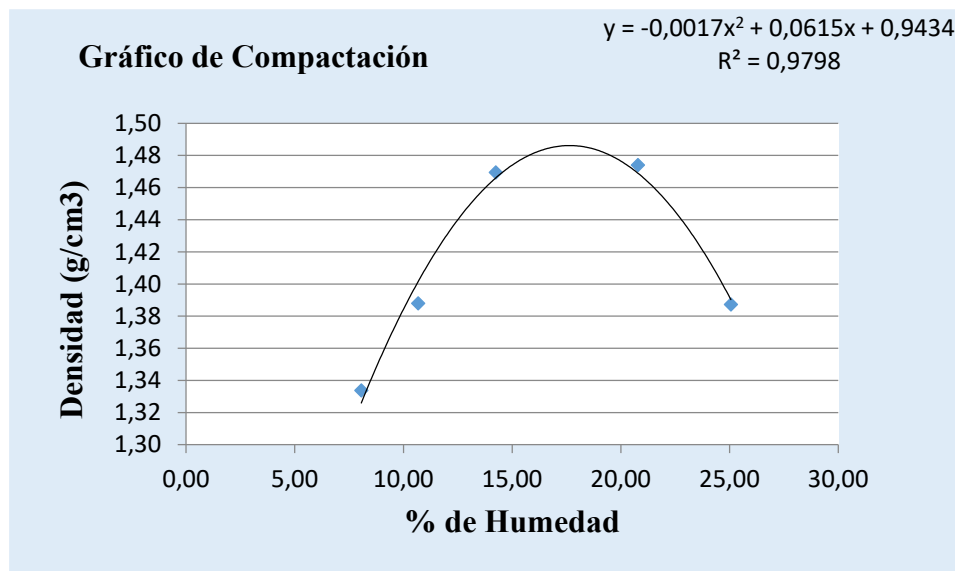


Densidad Máxima = 1,45 gr/cm³
Humedad Óptima = 17,44 %

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.34. Tabla de compactación T-99 Juan Nicolai

Muestra: Única	Volumen:	943,3	cm3			
Nº de capas		3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa		25	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde		5538,20	5627,70	5762,20	5858,00	5815,20
Peso del molde		4178,60	4178,60	4178,60	4178,60	4178,60
Peso suelo húmedo		1359,60	1449,10	1583,60	1679,40	1636,60
Volumen de la muestra		943,30	943,30	943,30	943,30	943,30
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)		1,44	1,54	1,68	1,78	1,73
Cápsula Nº		1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula		1456,10	1534,00	1545,30	1705,10	1791,00
Peso suelo seco + cápsula		1356,40	1398,70	1365,50	1429,00	1458,50
Peso del agua		99,70	135,30	179,80	276,10	332,50
Peso de la cápsula		118,95	131,43	103,01	100,31	131,73
Peso suelo seco		1237,45	1267,27	1262,49	1328,69	1326,77
Contenido de humedad (%h)		8,06	10,68	14,24	20,78	25,06
Densidad suelo seco (gr/cm ³)		1,33	1,39	1,47	1,47	1,39



Densidad Máxima = 1,50 gr/cm³
Humedad Óptima = 18,09 %

Fuente: Elaboración propia

Como parte de la investigación centrada en el análisis de la resistencia cortante de suelos arcillosos reforzados con residuos plásticos, se llevó a cabo una fase inicial de ensayos de compactación. El propósito fue explorar cómo la incorporación de fibras provenientes de residuos plásticos, en diferentes proporciones y tamaños (0.5 cm y 1.5 cm, con porcentajes de 0.2%, 1% y 2% respecto al peso del suelo), impacta la densidad relativa y la humedad óptima de estos suelos. Este estudio de compactación proporcionará la información para comprender cómo los suelos arcillosos modificados con residuos plásticos se comportan en términos de densidad y humedad. Este análisis permitirá comprender mejor cómo la presencia de residuos plásticos en diferentes cantidades y tamaños influye en las propiedades mecánicas y, en particular, en la resistencia a la deformación y al corte de los suelos arcillosos, dichos resultados se plasmaron en las siguientes tablas:

**Tabla 3.35. Tabla Resumen de compactación AASHTO T-99 Incertar-
Compactación de suelos (Proctor)**

	Densidad maxima (gr/cm³)	Humedad de compactacion (%)
Suelo natural	1,42	16,50
Suelo natural	1,45	17,44
Suelo natural	1,44	18,54
0,5cm - 0,2%	1,65	17,97
0,5cm - 0,2%	1,67	17,68
0,5cm - 0,2%	1,64	17,35
0,5cm - 1%	1,72	17,39
0,5cm - 1%	1,78	17,50
0,5cm - 1%	1,75	16,80
0,5cm - 2%	1,70	18,09
0,5cm - 2%	1,68	16,90
0,5cm - 2%	1,69	16,63
1,5cm - 0,2%	1,73	16,78
1,5cm - 0,2%	1,68	17,97
1,5cm - 0,2%	1,68	16,18
1,5cm - 1%	1,83	17,74
1,5cm - 1%	1,79	17,11
1,5cm - 1%	1,77	17,41
1,5cm - 2%	1,86	15,50
1,5cm - 2%	1,83	14,56
1,5cm - 2%	1,84	16,23

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.36. Tabla Resumen de compactación AASHTO T-99 Juan Nicolai
Compactación de suelos (Proctor)**

	Densidad maxima (gr/cm³)	Humedad de compactacion (%)
Suelo natural	1,42	19,50
Suelo natural	1,50	18,09
Suelo natural	1,48	17,36
0,5cm - 0,2%	1,55	15,73
0,5cm - 0,2%	1,53	15,19
0,5cm - 0,2%	1,58	16,27
0,5cm - 1%	1,56	17,97
0,5cm - 1%	1,61	16,70
0,5cm - 1%	1,59	16,28
0,5cm - 2%	1,65	16,44
0,5cm - 2%	1,63	17,56
0,5cm - 2%	1,67	17,79
1,5cm - 0,2%	1,48	22,29
1,5cm - 0,2%	1,49	19,50
1,5cm - 0,2%	1,52	17,12
1,5cm - 1%	1,55	16,88
1,5cm - 1%	1,54	17,93
1,5cm - 1%	1,57	16,39
1,5cm - 2%	1,83	15,22
1,5cm - 2%	1,75	17,79
1,5cm - 2%	1,86	16,04

Fuente: Elaboración propia

3.5 Ficha técnica del material PET reciclado

El Peregrino Soluciones Ambientales es un emprendimiento de triple impacto (social, económico y ambiental) especializado en el tratamiento y reciclaje de residuos PET. Operan bajo principios de economía circular para maximizar la reincorporación de estos residuos en la cadena del reciclaje.

Materiales:

Material Base: Residuos PET reciclados.

Productos Fabricados:

Escobas ecológicas de alto tráfico.

Cepillos.

Filamentos o cerdas rígidas.

Proceso de Fabricación:

Reciclaje: Peregrino Soluciones Ambientales recicla residuos PET para obtener fibras utilizadas en la fabricación de sus productos.

Transformación: Los residuos PET son tratados y procesados para obtener fibras de alta calidad.

Fabricación de Productos: Las fibras recicladas se utilizan en la producción de escobas ecológicas, cepillos y filamentos rígidos.

Características de las Fibras:

Sostenibilidad: Las fibras de PET reciclado ofrecen una alternativa sostenible al plástico virgen.

Durabilidad: Son adecuadas para aplicaciones de alto tráfico debido a su resistencia y durabilidad.

Compatibilidad Ambiental: Contribuyen a la reducción de residuos plásticos y promueven la economía circular.

Aplicaciones y Usos:

Las fibras de PET reciclado de Peregrino Soluciones Ambientales son ideales para la fabricación de:

Escobas y cepillos ecológicos.

Filamentos o cerdas rígidas para diversos usos industriales y comerciales.

Beneficios:

Ambientales: Reducción de la huella de carbono y la cantidad de residuos plásticos.

Sociales: Contribución al empleo sostenible y al desarrollo local.

Económicos: Generación de valor económico a partir de residuos, fortaleciendo la economía circular.

Certificaciones y Compromisos:

Peregrino Soluciones Ambientales cumple con estándares de calidad y sostenibilidad, asegurando prácticas responsables en la fabricación y comercialización de sus productos.



Fuente: <https://cierva.org/peregrino-soluciones-ambientales>

Descripción: Para el proyecto las fibras de material PET reciclado fueron cortadas en dos tamaños diferentes: 0.5 cm y 1.5 cm.

Composición química:

Polímero base: Polietileno tereftalato (PET) reciclado.

Propiedades físicas:

Color: Blanco o transparente.

Densidad aparente: La densidad aparente de la fibra de PET reciclado generalmente varía entre 0.1 g/cm³ y 0.4 g/cm³, dependiendo del tamaño de las fibras y la compactación del material. La densidad aparente se refiere a la relación entre la masa y el volumen ocupado por la fibra, teniendo en cuenta los espacios vacíos entre las partículas. Es importante tener en cuenta que estos valores son aproximados y pueden variar según el proceso de fabricación y las características específicas de la fibra de PET reciclado. Se recomienda consultar las especificaciones proporcionadas por el fabricante o realizar pruebas de laboratorio para obtener datos precisos sobre la densidad aparente de un lote particular de fibra de PET reciclado.

Peso específico: El peso específico de la fibra de PET reciclado generalmente varía entre 1.35 g/cm^3 y 1.40 g/cm^3 . Sin embargo, es importante tener en cuenta que el peso específico puede verse influenciado por varios factores, como el proceso de reciclaje y los aditivos utilizados.

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tracción: La resistencia a la tracción de la fibra de PET reciclado puede variar dependiendo de varios factores, como el proceso de reciclaje, el tamaño de las fibras y la calidad del material. En general, la resistencia a la tracción de la fibra de PET reciclado se encuentra en el rango de 300 MPa a 700 MPa. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos valores son aproximados y pueden variar en función de las condiciones específicas de fabricación y las propiedades del material reciclado.

Módulo de elasticidad: El módulo de elasticidad de la fibra de PET reciclado puede variar en función de diversos factores, como el proceso de reciclaje, el tamaño de las fibras y la calidad del material. En general, el módulo de elasticidad de la fibra de PET reciclado se encuentra en el rango de 3 GPa a 7 GPa.

Elongación en el punto de rotura: La elongación en el punto de rotura de la fibra de PET reciclado puede variar en función de varios factores, como el proceso de reciclaje, el tamaño de las fibras y la calidad del material. En general, la elongación en el punto de rotura de la fibra de PET reciclado se encuentra en el rango de 10% a 30%. Esto significa que la fibra puede estirarse hasta un cierto porcentaje antes de romperse.

Temperatura de reblandecimiento: La temperatura de reblandecimiento del PET reciclado, también conocido como polietileno tereftalato, suele situarse en un rango aproximado de 70°C a 80°C . Esta temperatura indica el punto en el cual el material comienza a ablandarse y perder su rigidez, pero aún no ha alcanzado el punto de fusión completo.

Estabilidad térmica: Capacidad para resistir temperaturas elevadas sin degradación significativa. La estabilidad térmica del PET reciclado se refiere a su capacidad para resistir cambios y descomposición a altas temperaturas. Esta propiedad es importante ya

que determina la resistencia del material a la degradación térmica durante el procesamiento y uso en aplicaciones que implican altas temperaturas.

En general, el PET reciclado tiene una buena estabilidad térmica y puede soportar temperaturas de hasta aproximadamente 250°C sin descomponerse. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la estabilidad térmica puede variar según la calidad del material reciclado, el grado de cristalinidad y la presencia de aditivos.

En el caso de material PET los ensayos que deben ejecutarse para su estudio se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 3.37. Norma para la caracterización física y química de material PET

DATOS TECNICOS PET				
PROPIEDADES MECÁNICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Peso Específico	gr/cm ³	D-792	53479	1.30
Resistencia a la Tracción (Fluencia/Rotura)	kg/cm ²	D-638	53455	900/-
Resistencia a la Compresión (1 y 2%def)	kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
Resistencia a la Flexión	kg/cm ²	D-790	53452	1450
Resistencia al Choque sin Estallar	kg.cm/cm ²	D-256	53453	>50
Alargamiento a la Rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de Elasticidad (Tracción)	kg/cm ²	D-2240	53457	37000
Dureza	Shore D	D-1894	53505	85-87
Coef. De Roce Estático S/Acero		D-1894		-
Coef. De Roce Dinámico S/Acero				0.2
Resistencia al Desgaste Por Roce				Muy Buena
PROPIEDADES TÉRMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
Calor Específico	kcal/kg.°C	C-351		0.25
Temp. De Flexión B/Carga (18,5kg/cm ²)	°C	D-648	53462	75
Temp. De uso Continuo en Aire	°C			-20 a 110
Temp. De Fusión	°C			255
Coef. De Dilatación Lineal de 23 a 100° C	por °C	D-696	52752	0.00008
Coef. De Conducción Térmica	kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

Fuente: Peregrino Soluciones Ambientales

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN, CÁLCULO Y DISEÑO

4.1 DESARROLLO

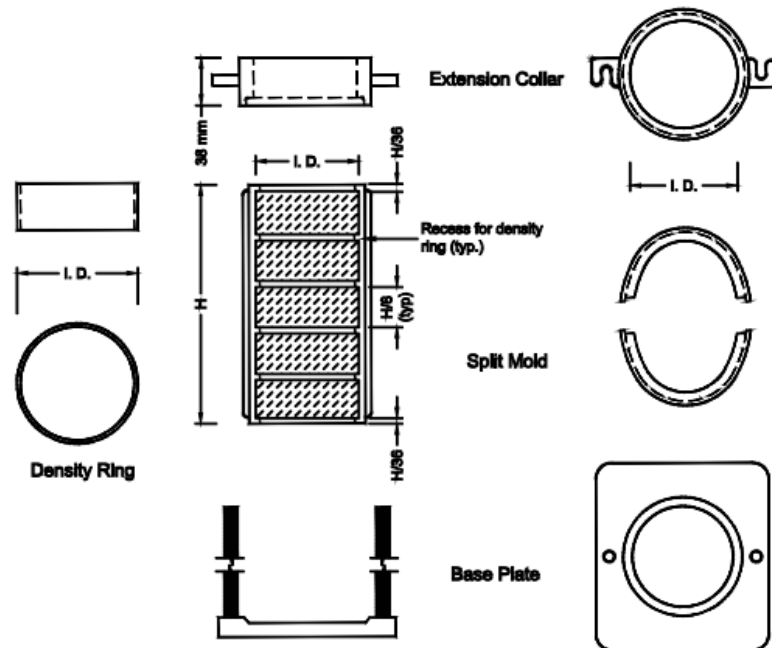
Para poder cumplir con los objetivos mencionados en la presente tesis, se plantea la siguiente metodología la cual se llevará a cabo durante el trabajo de investigación.

- 1) Para la revisión bibliográfica se recopiló información de suelos necesarios para realizar los ensayos de laboratorio, confirmación con el laboratorio donde se realizarán las pruebas al material.
- 2) Los ensayos de resistencia al corte no drenado en laboratorio: definidos para la investigación se efectuarán en las instalaciones del laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho la cual cuenta con los equipos necesarios para los ensayos planteados con trazabilidad y calibraciones que garanticen procedimientos y por ende resultados confiables.
- 3) La cantidad de ensayos efectuados dentro del marco del proyecto a la muestra tomada, fueron definidos en conjunto con la coordinación del tutor de tesis basadas en las normas técnicas vigentes.
- 4) Análisis de resultados: finalizados los ensayos de laboratorio se procedió a hacer un análisis estadístico, cálculos matemáticos y análisis técnico para la comparación entre los ensayos de compresión inconfinaada a distintos porcentajes de fibras de polietileno reciclado, para estabilizar o reforzar el suelo elegido y luego se elaboraron los gráficos comparativos, tablas o esquemas presentados en el presente documento.
- 5) Redacción del informe, consolidación del documento general, con el seguimiento, ejecución y resultados del proyecto para que sirvan de guía para los estudiantes y público en general con interés en el tema.

4.2 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

Para preparar las muestras se compactaron tanto en suelo natural como el de refuerzo en cinco elevaciones (capas) en el molde del equipo Harvard. Con un martillo apisonador que proporcionó un esfuerzo de compactación. El número de apisonadores por levantamiento y la presión de compactación fueron de 25 golpes por capa para todos los levantamientos.

Figura 4.1. Molde de gradiente de densidad



Fuente: Norma AASHTO T 307-99 (2012)

En la elaboración de las muestras, para el posterior ensayo de compresión inconfiada se tomó en cuenta que tanto la densidad relativa como la humedad óptima no varíen en cuanto a los resultados obtenidos de los ensayos de compactación estándar realizándolos en prueba y error.

Se tomó muy en cuenta que la altura H de la muestra debe ser mayor al doble del diámetro como también de que no supere más del 3% de la misma.

Fotografía 4.1. Preparación de muestras



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.2. Reposo hermético para que se homogenice la muestra



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.3. Peso de las 5 capas que serán sometidas a compactación



Fuente: Elaboración propia

Se usó este dispositivo que es el modelo del compactador en miniatura de Harvard. Se procedió con un compactado mecánico cargado por fuerza axial debido al esfuerzo de compactación y la variabilidad reducida.

Fotografía 4.4. Compactador manual



Fuente: Elaboración propia

La densidad se determinó de una manera adecuada a través de la prueba de densidad de humedad en laboratorio de acuerdo con el procedimiento de T 99.

Fotografía 4.5. Verificación de alturas por cada capa



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.6. Elaboración de probetas



Fuente: Elaboración propia

Se hermetiza las muestras apenas terminado el compactado para evitar pérdidas de contenido de humedad y no llegar a cumplir de una manera óptima el ensayo

Fotografía 4.7. Preparación de muestras



Fuente: Elaboración propia

4.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA

El ensayo de compresión confinada al ser componente fundamental en la evaluación de suelos, permitiendo analizar su comportamiento frente a cargas uniaxiales. En este estudio, se llevó a cabo este ensayo para investigar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos, específicamente el efecto de la incorporación de fibras de PET reciclado en su resistencia y comportamiento bajo carga uniaxial.

Para el suelo natural en estudio como para el refuerzo del mismo, la compresión confinada, se basó en el método de compactación AASHTO T-99 para obtener el contenido de humedad óptima y densidad máxima.

Para la resistencia a la compresión confinada se contó con una unidad de registro que tiene un programa integrado, que permite al usuario ejecutar pruebas automáticamente, incluye el control automático de los esfuerzos axiales y de la presión de confinamiento, así como la generación automática de reportes y resultados.

Fotografía 4.8. Equipo de compresión inconfiada



Fuente: Elaboración propia

4.4 PROCEDIMIENTO

Se colocó el espécimen en el aparato de carga de tal manera que quede centrado en la platina inferior.

Se ajustó el instrumento de carga cuidadosamente de tal manera que la platina superior apenas haga contacto con el espécimen.

Llevar a ceros el indicador de deformación.

Aplicamos la carga de tal manera que se produzca una deformación axial a una velocidad de 0.5 a 2% por minuto.

Se registró los valores de carga, deformación y tiempo a intervalos suficientes para definir la curva esfuerzo-deformación (normalmente son suficientes 10 a 15 puntos).

La velocidad de deformación que debe escogerse de tal manera que el tiempo necesario para la falla no exceda los 15 minutos.

Se continuó aplicando carga hasta que los valores de carga decrezcan al aumentar la deformación o hasta que se alcance una deformación igual a 15%.

Se registraron las velocidades de deformación en el informe de los datos de ensayo.

Se determinó el contenido de agua de la muestra de ensayo utilizando todo el espécimen a menos que se hayan obtenido cortes representativos para este fin, como en el caso de las muestras inalteradas.

Para el ensayo se tomó el contenido de humedad que fue obtenida antes o después del ensayo de compresión.

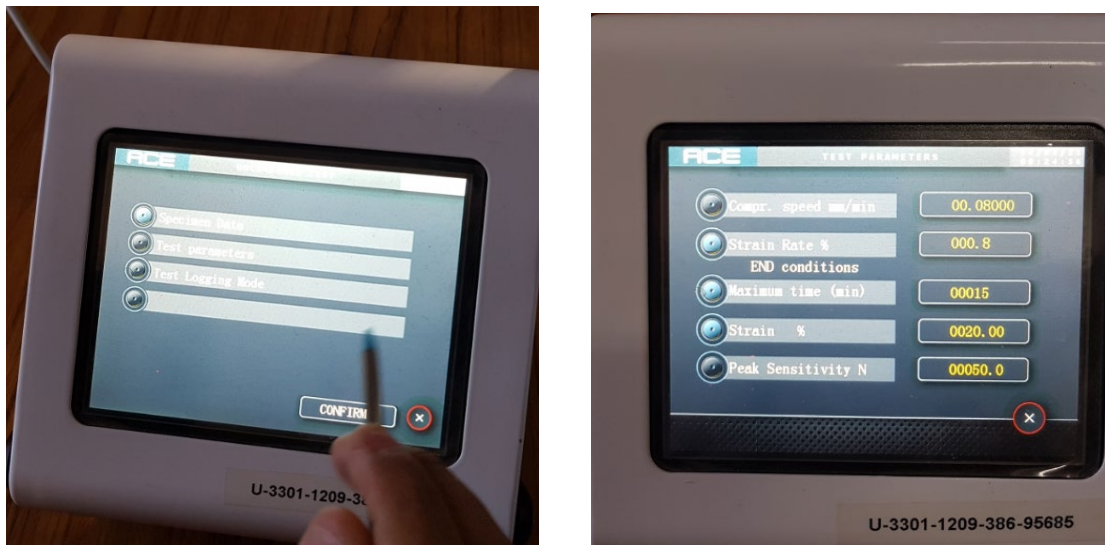
Al final se realizará un diagrama que muestra las condiciones de falla, mostrando el ángulo de inclinación de la superficie de rotura, si dicho ángulo es mensurable.

Las probetas se trabajaron dentro de energía de compactación Norma AASTHO T 307-99 (2012).

La cantidad adecuada de suelo que se preparó para todas las muestras, el cual se homogeneizó para los diferentes contenidos de humedades correspondientes.

Las muestras se dejaron curar 24 horas dentro de un recipiente hermético a fin de generar una homogeneidad de humedad en las mismas, y posteriormente se compactaron.

Fotografía 4.9. Configuración de equipo para romper probetas



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4.10. Muestra siendo sometida a una carga axial



Fuente: Elaboración propia

4.5 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN INCONFINADA

Luego de aplicado el procedimiento antes descrito y de los cuidados pertinentes para el suelo objeto de estudio en mezclas compactadas con fibras de plástico reciclado, se realizó el tabulado de las mismas con el que se obtuvo los resultados de los parámetros de resistencia al corte que estas proporcionan. A continuación, se muestran un ejemplo de dicha tabulación del ensayo a compresión inconfiada como de los parámetros de resistencia obtenidos mediante el ciruculo de Mohr.

Tabla 4.1. Ensayo de compresión confinada suelo natural de Incertar

Dimensiones del testigo					
Diámetro [mm]	33,29				
Altura [mm]	67,20				
Datos del testigo					
Diámetro [cm]	3,33				
Altura [cm]	6,72				
Área [cm ²]	8,70				
volumen [cm ³]	58,49				
Wsh [gf]	84,22				
Wsd [gf]	71,68				
W [%]	17,49				
Yh [gf/cm ³]	1,44				
Yd [gf/cm ³]	1,23				
Vel. deformación [mm/min]	0,98				
Curva esfuerzo - deformación					
Dato	Desplazamiento [mm]	Carga [N]	ϵ [mm/mm]	A_c [m ²]	Esfuerzo [N/m ²]
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,16	65,39	0,00	0,00	75120,88
3	0,31	108,85	0,00	0,00	124491,82
4	0,46	215,06	0,01	0,00	245379,98
5	0,62	322,69	0,01	0,00	367309,36
6	0,79	409,50	0,01	0,00	464967,27
7	0,96	477,41	0,01	0,00	540657,66
8	1,14	462,37	0,02	0,00	522239,41
9	1,31	415,52	0,02	0,00	468105,15
10	1,47	397,47	0,02	0,00	446663,18
11	1,65	396,18	0,02	0,00	444028,18
12	1,82	386,29	0,03	0,00	431773,72
13	2,02	152,96	0,03	0,00	170455,17
14	2,21	118,28	0,03	0,00	131413,32
15	2,27	116,13	0,03	0,00	128914,25





q_u [Pa]	540657,66
q_u [kPa]	540,66
s_u [cu] [kPa]	270,33
E [Pa]	39364011,75
E [kPa]	39364,01

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.2. Parámetros de resistencia – Circulo de Mohr

σ_3	0
RADIO	270,33
CENTRO	270,33

PRUEBA 1 SUELO NATURAL- INCERTAR			
GRADOS	RADIANES	ESFUERZO NORMAL (kPa)	ESFUERZO CORTANTE (kPa)
0	0,00	0,00	0,00
10	0,17	4,11	46,94
20	0,35	16,30	92,46
30	0,52	36,22	135,16
40	0,70	63,24	173,76
50	0,87	96,56	207,08
60	1,05	135,16	234,11
70	1,22	177,87	254,03
80	1,40	223,39	266,22
90	1,57	270,33	270,33
100	1,75	317,27	266,22
110	1,92	362,79	254,03
120	2,09	405,49	234,11
130	2,27	444,09	207,08
140	2,44	477,41	173,76
150	2,62	504,44	135,16
160	2,79	524,35	92,46
170	2,97	536,55	46,94
180	3,14	540,66	0,00

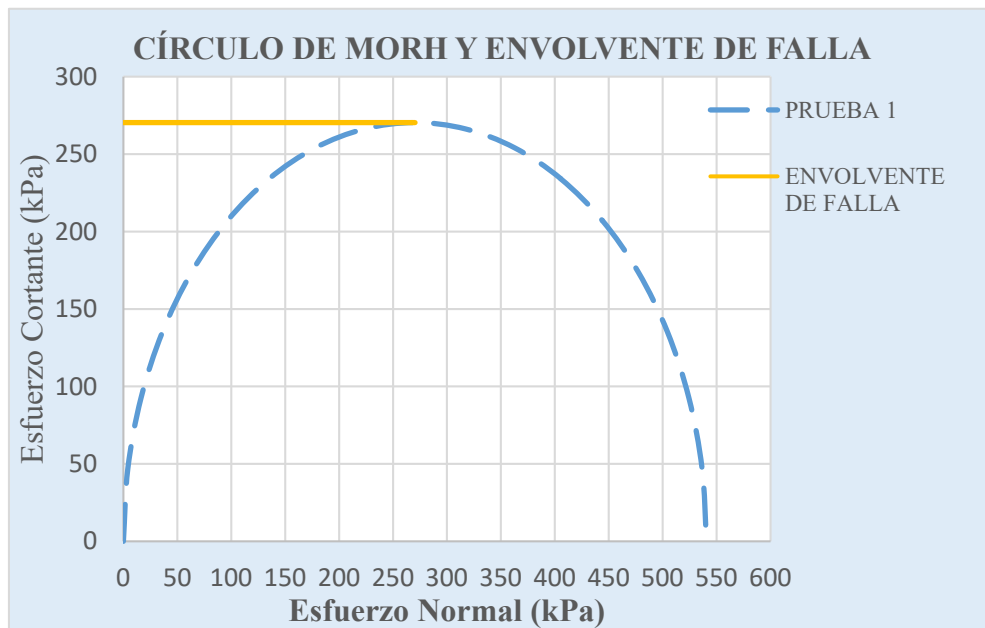
PRUEBA	1
σ_1	540,66

ϕ	0
C	270,33

ENVOLVENTE DE FALLA

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

σ	τ
0	270,33
270,33	270,33



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4.3, Tabla 4.4 y Figura 4.2 se muestran los resultados de esfuerzo último y cohesión obtenidos en el ensayo con las muestras que tenían agregado de fibras de 1.5 cm, y en la Tabla 4.5, Tabla 4.6 y Figura 4.3 las muestras que tenían fibras de 0.5cm de longitud.

Tabla 4.3. Esfuerzo último de las muestras con fibra de 1.5cm- Suelo INCERTAR (CL)

Esfuerzo Último $\sigma_1 = q_u$ (kPa), fibra 1,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	540,66	527,32	536,20	534,73
0,20%	563,87	568,64	578,72	570,41
1,00%	578,00	600,95	609,92	596,29
2,00%	664,35	634,34	651,90	650,20

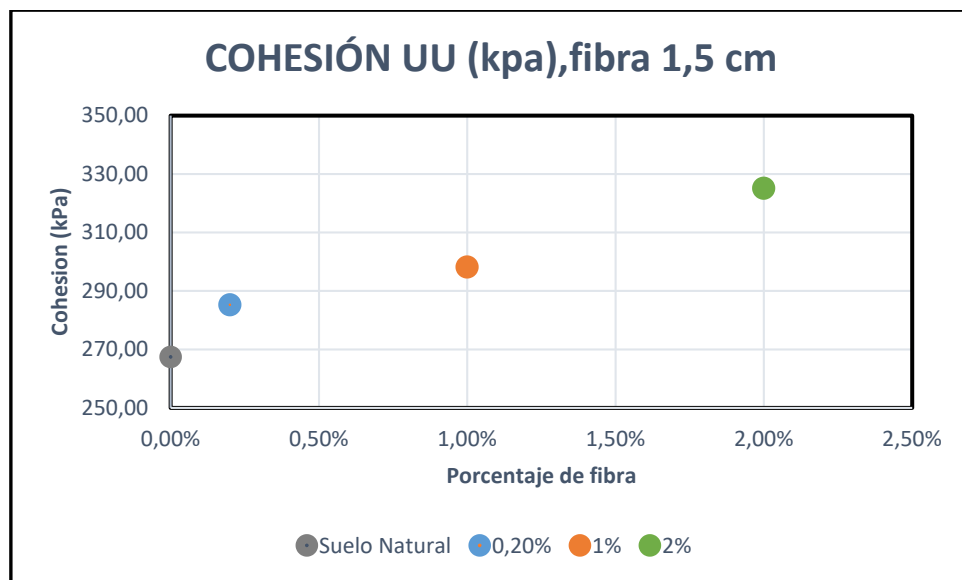
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.4. Cohesión no drenada de las muestras con fibra de 1.5cm - Suelo INCERTAR (CL)

RESISTENCIA AL CORTE $SU = COHESIÓN UU$ (kPa), fibra 1,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	270,33	263,66	268,10	267,36
0,20%	281,94	284,32	289,36	285,20
1,00%	289,00	300,48	304,96	298,15
2,00%	332,18	317,17	325,95	325,10

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2. Cohesión no drenada fibra 1.5cm - Suelo INCERTAR (CL)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5. Esfuerzo último de las muestras con fibra de 0.5cm - Suelo INCERTAR (CL)

Esfuerzo Ultimo $\sigma_1=q_u$ (kPa), fibra 0,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	540,66	527,32	536,20	534,73
0,20%	557,55	552,87	537,59	549,33
1,00%	573,15	578,43	588,74	580,11
2,00%	638,48	630,13	636,86	635,16

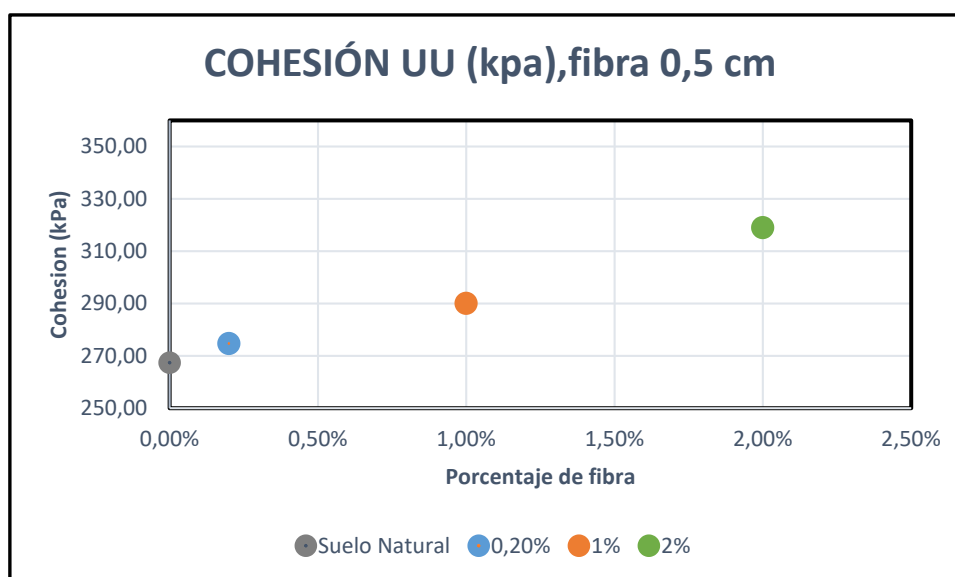
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.6. Cohesión no drenada de las muestras con fibra de 0.5cm - Suelo INCERTAR (CL)

RESISTENCIA AL CORTE $SU = COHESIÓN UU$ (kPa), fibra 0,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	270,33	263,66	268,10	267,36
0,20%	278,77	276,43	268,79	274,67
1,00%	286,58	289,22	294,37	290,05
2,00%	319,24	319,24	318,43	318,97

Fuente: Elaboración propia

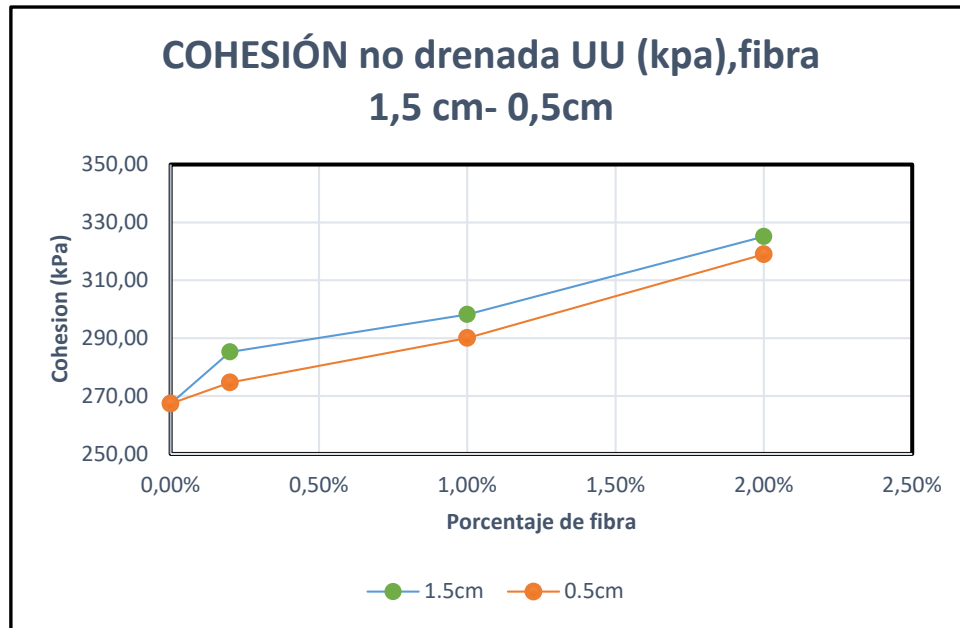
Figura 4.3. Cohesión no drenada fibra 0.5cm Suelo INCERTAR (CL)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.4 se observa en celeste la cohesión obtenida con la fibra de 1.5 cm y de color naranja la cohesión obtenida con la fibra de 0.5 cm, para poder comparar el cambio que existe entre las dos longitudes.

Figura 4.4. Cohesión no drenada fibra 0.5cm y 1.5cm

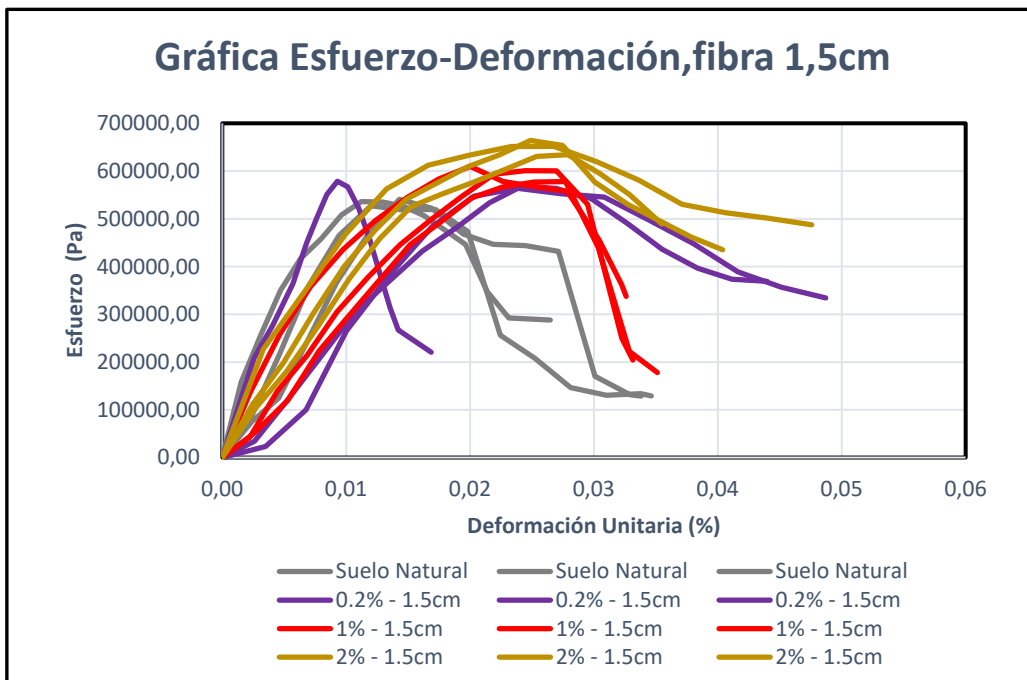


Fuente: Elaboración propia

Se destaca una mejora sustancial en la cohesión a medida que aumenta el contenido de fibra. Esta relación establece que mayores concentraciones de fibras inciden positivamente en la cohesión del suelo, indicando un fortalecimiento significativo en la resistencia al corte con el incremento del contenido de fibra, siendo en este caso la fibra con 2% del porcentaje del suelo en estudio y con mayor longitud quien en este estudio tiene mayor cohesión con 325.10 Kpa., de los 267.36 kPa que se calcularon en su estado natural aumentando su tasa de crecimiento en un 21.57% .

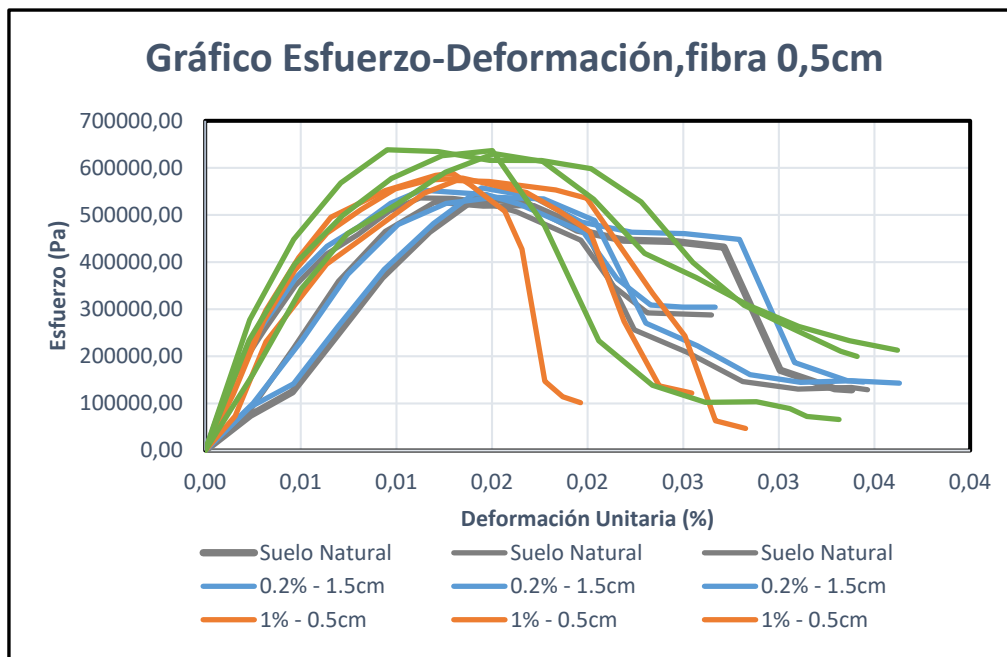
Las Figuras 4.5 y 4.6 exhiben las gráficas de esfuerzo-deformación correspondientes a las fibras de 1.5 cm y 0.5 cm, respectivamente. Además, se realizó un promedio de los esfuerzos para cada porcentaje, destacando las diferencias entre los tamaños de fibra, tal como se presenta en la Figura 4.7.

Figura 4.5. Gráfica Esfuerzo – Deformación, fibra 1.5cm



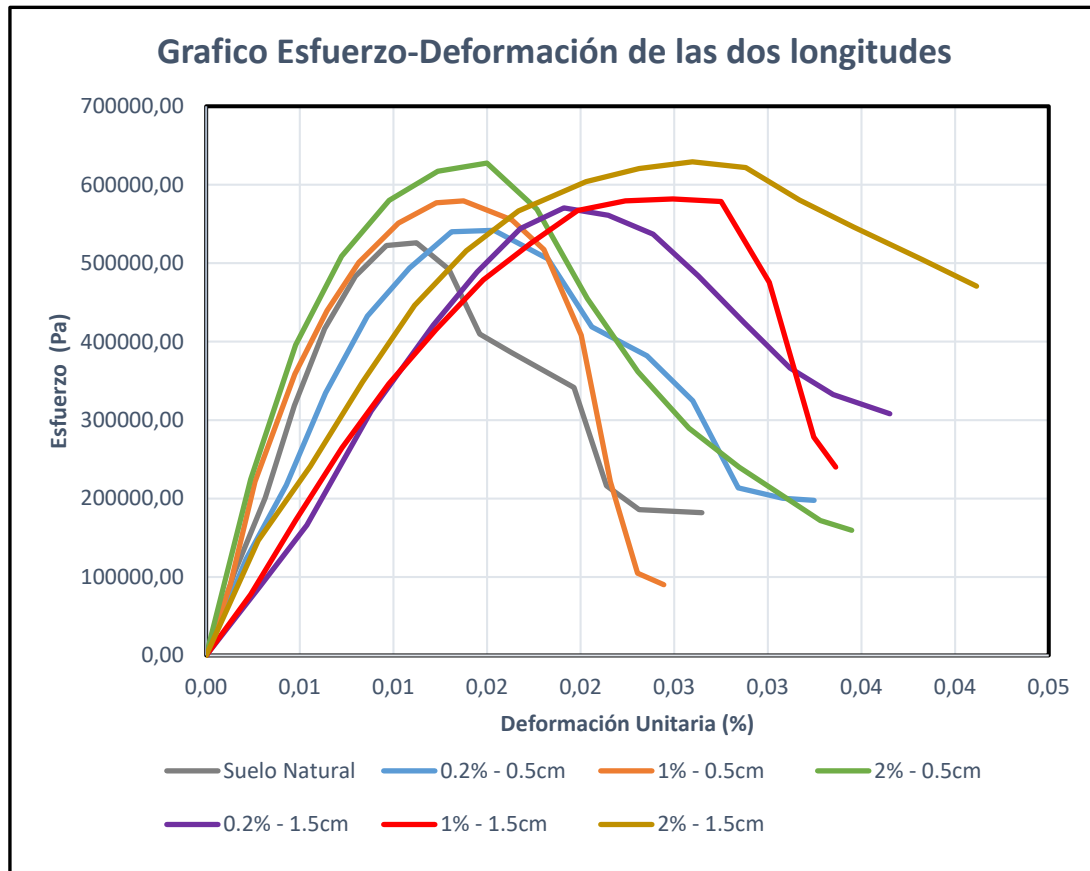
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6. Gráfica Esfuerzo – Deformación, fibra 0.5cm



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7. Gráfica Esfuerzo – Deformación de las dos longitudes



Fuente: Elaboración propia

Es evidente que para ambas longitudes el suelo tuvo mayor deformación al reforzarse con el material pet reciclado lo que hace referencia a que se logró mayor respuesta del esfuerzo para poder llegar a su fallo también se puede observar que mayores longitudes van a hacer que el suelo al ser reforzado presente características dúctiles, por otro lado, se nota que los esfuerzos de los mismos porcentajes alcanzan un esfuerzo similar, sin embargo, mayor ductilidad tendrá un suelo reforzado con mayor tamaño de fibra.

Este estudio también se lo realizó al suelo CH, revelando resultados destacados. En particular, se obtuvieron los siguientes resultados significativos que en Tabla 4.7, Tabla 4.8 y Figura 4.8 muestran los resultados de cohesión y esfuerzo último obtenidos en el ensayo con las muestras que tenían agregado de fibras de 1.5 cm, y en la Tabla 4.9, Tabla 4.10 y Figura 4.9 las muestras que tenían fibras de 0.5cm de longitud

Tabla 4.7. Esfuerzo último de las muestras con fibra de 1.5cm- Suelo Juan Nicolai (CH)

Esfuerzo Último $\sigma_1=qu$ (kPa), fibra 1,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	552,37	560,01	554,44	555,61
0,20%	593,58	585,29	575,30	584,72
1,00%	644,43	631,81	630,10	635,45
2,00%	710,21	723,90	703,98	712,70

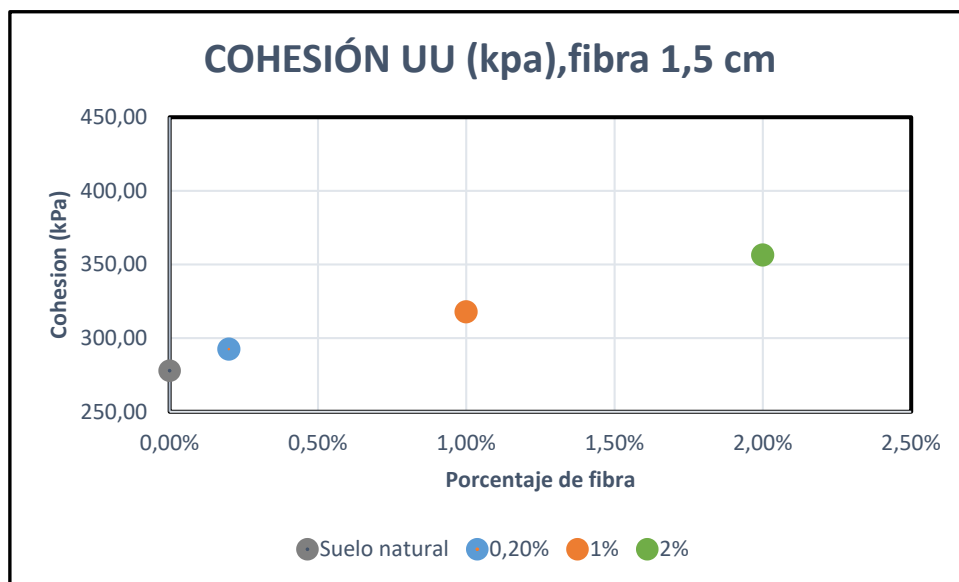
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.8. Cohesión no drenada de las muestras con fibra de 1.5cm - Suelo Juan Nicolai (CH)

RESISTENCIA AL CORTE SU = COHESIÓN UU (kPa), fibra 1,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	276,18	280,00	277,22	277,80
0,20%	296,79	292,64	287,65	292,36
1,00%	322,21	315,91	315,05	317,72
2,00%	355,11	361,95	351,99	356,35

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8. Cohesión no drenada fibra 1.5cm - Suelo Juan Nicolai (CH)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.9. Esfuerzo último de las muestras con fibra de 0.5cm- Suelo Juan Nicolai (CH)

Esfuerzo último $\sigma_1=q_u$ (kPa), fibra 0,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	552,37	560,01	554,44	555,61
0,20%	572,49	571,46	562,15	568,70
1,00%	593,76	589,89	574,87	586,17
2,00%	703,96	682,66	699,91	695,51

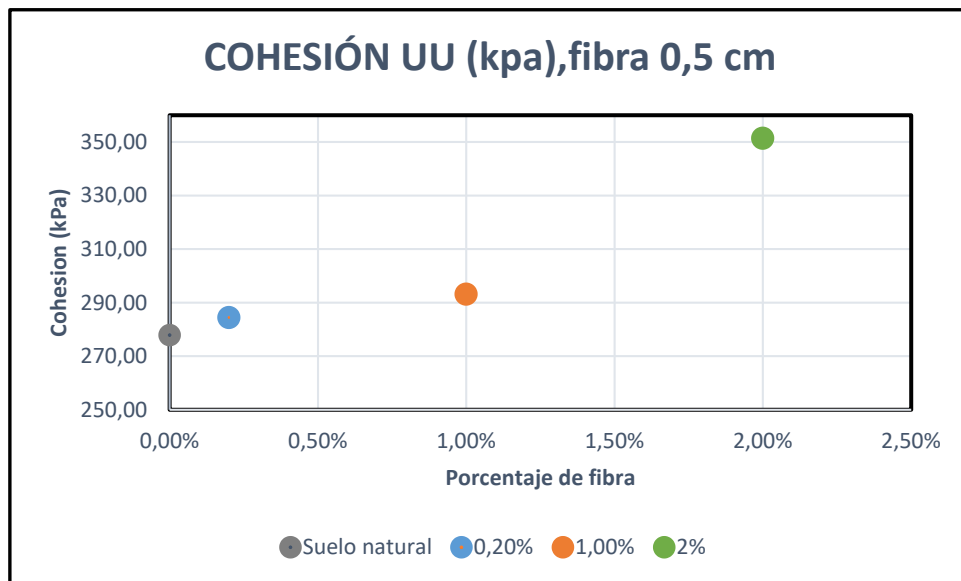
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.10. Cohesión no drenada de las muestras con fibra de 0.5cm - Suelo Juan Nicolai (CH)

RESISTENCIA AL CORTE $SU = COHESIÓN UU$ (kPa), fibra 0,5cm				
Muestra	1	2	3	Promedio
0,00%	276,18	280,00	277,22	277,80
0,20%	286,25	285,73	281,07	284,35
1,00%	296,88	294,94	287,44	293,09
2,00%	351,98	351,98	349,95	351,30

Fuente: Elaboración propia

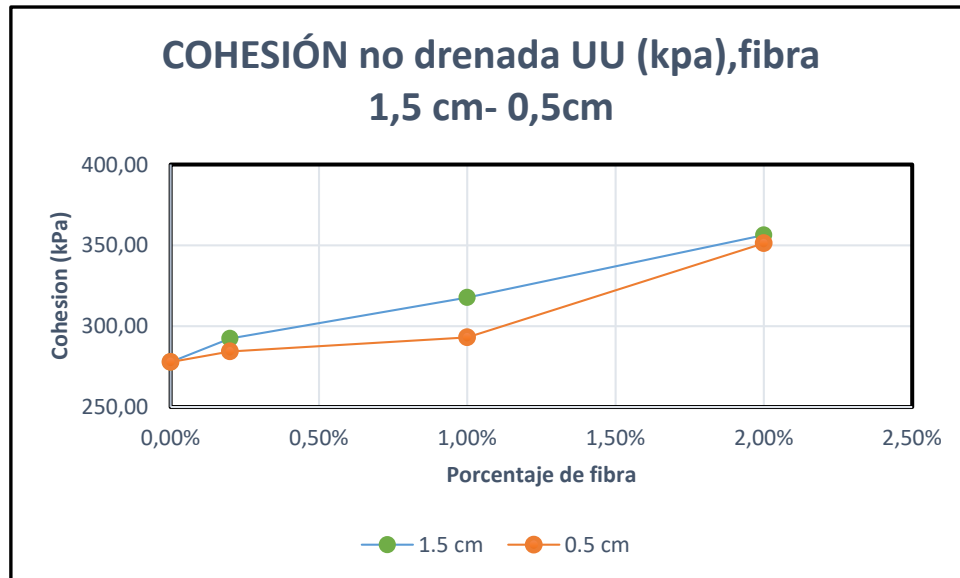
Figura 4.9. Cohesión no drenada fibra 0.5cm - Suelo Juan Nicolai (CH)



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.10 se observa en celeste la cohesión obtenida con la fibra de 1.5 cm y de color naranja la cohesión obtenida con la fibra de 0.5 cm, para poder comparar el cambio que existe entre las dos longitudes

Figura 4.10. Cohesión no drenada fibra 0.5cm y 1.5cm

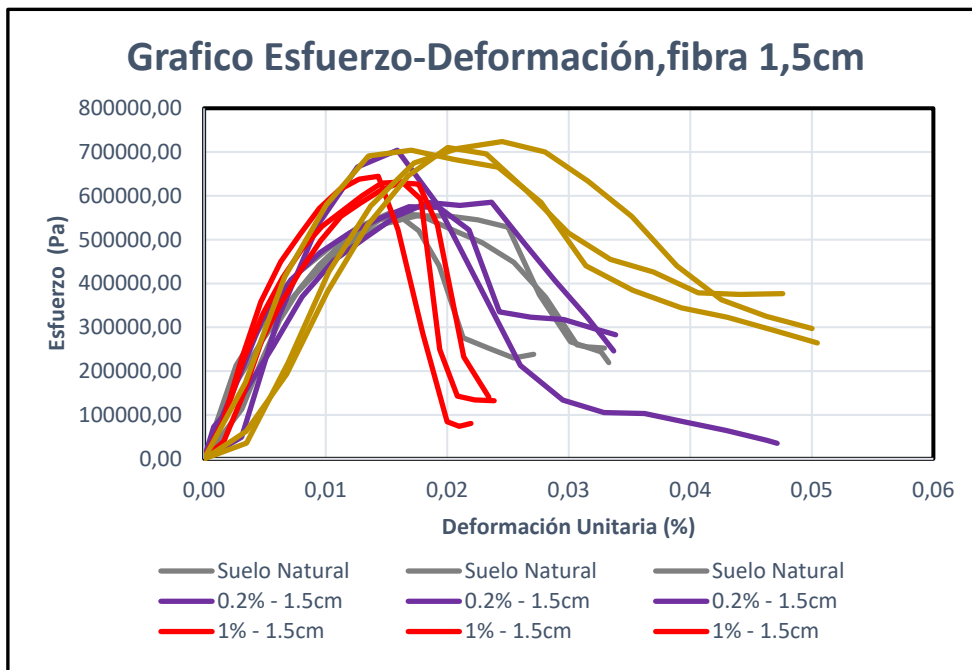


Fuente: Elaboración propia

Se evidencia que el comportamiento es similar en suelos arcillosos con refuerzo de residuo plástico pero que a diferencia de un suelo CL, la cohesión es mayor para suelos de alta compresibilidad, para el tipo de suelo CH el valor de la cohesión pasó de 277.80 kPa en su estado natural a un valor de 356.35 Kpa siendo su tasa de crecimiento un 28.26% para el máximo valor con el que se trabajó, también se puede notar que a medida de que se aumenta el porcentaje de fibra los valores de cohesión no se alejan en gran proporción, pudiendo ser indistintos a su tamaño pero sí al porcentaje del refuerzo que se utilice.

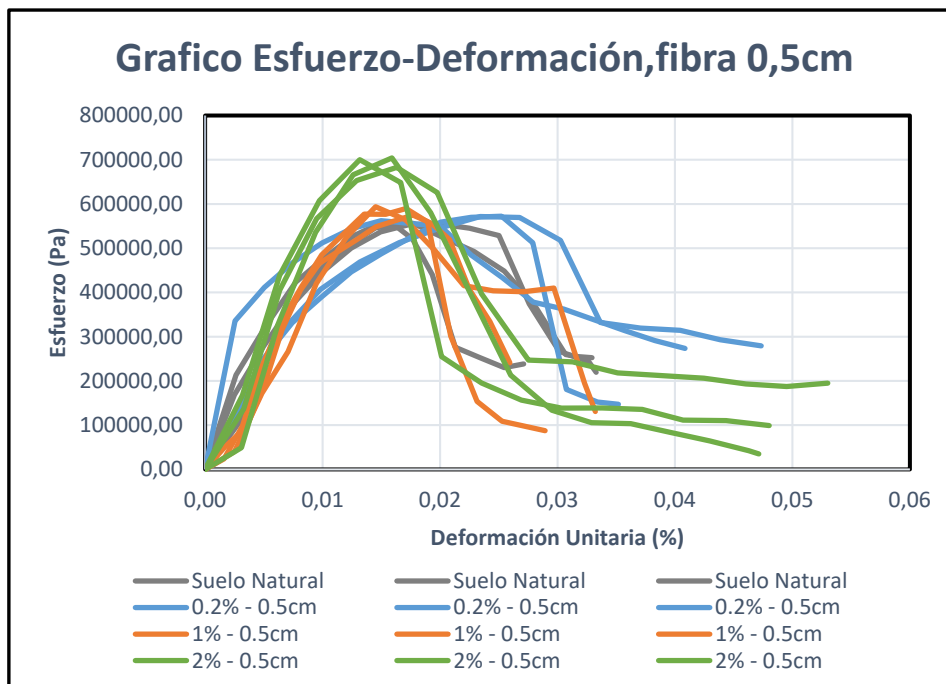
Las Figuras 4.11 y 4.12 exhiben las gráficas de esfuerzo-deformación correspondientes a las fibras de 1.5 cm y 0.5 cm, respectivamente. Además, se realizó un promedio de los esfuerzos para cada porcentaje, destacando las diferencias entre los tamaños de fibra, tal como se presenta en la Figura 4.13.

Figura 4.11. Gráfica Esfuerzo – Deformación, fibra 1.5cm



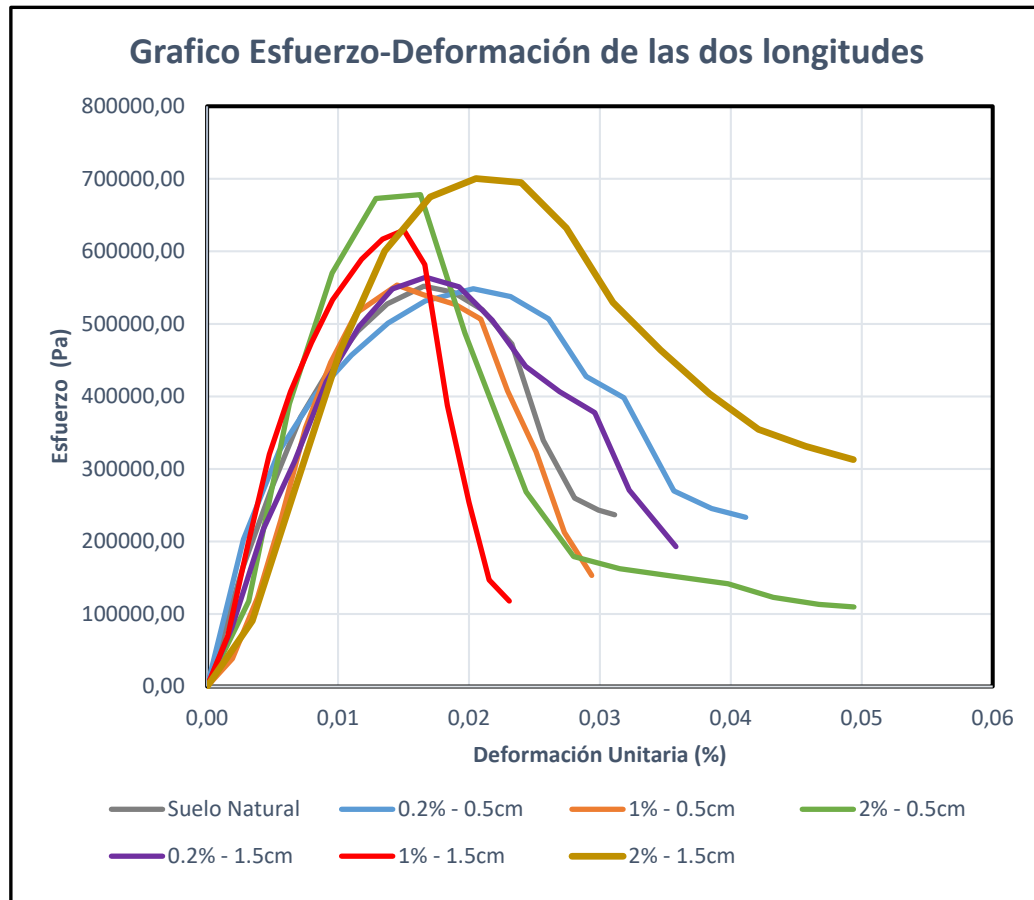
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12. Gráfica Esfuerzo – Deformación, fibra 0.5cm



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.13. Gráfica Esfuerzo – Deformación de las dos longitudes



Fuente: Elaboración propia

El análisis revela que, bajo un mismo porcentaje de fibra, el suelo muestra proyecciones de esfuerzos similares. Sin embargo, en términos de deformación unitaria, se evidencia una notable diferencia. El suelo reforzado con fibras en arcilla de baja compresibilidad presenta deformaciones unitarias considerablemente más altas en comparación con el suelo de arcillas de alta compresibilidad.

Es relevante destacar que, a pesar de que se logran esfuerzos mayores con el refuerzo de material PET reciclado, estos son alcanzados con porcentajes menores y tamaños de fibras más reducidos. Estos resultados culminan en un comportamiento frágil del suelo en comparación con el suelo de arcillas de baja compresibilidad, que exhibe mayores deformaciones unitarias, pero trabaja con resistencias menores.

4.6 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO

Histograma

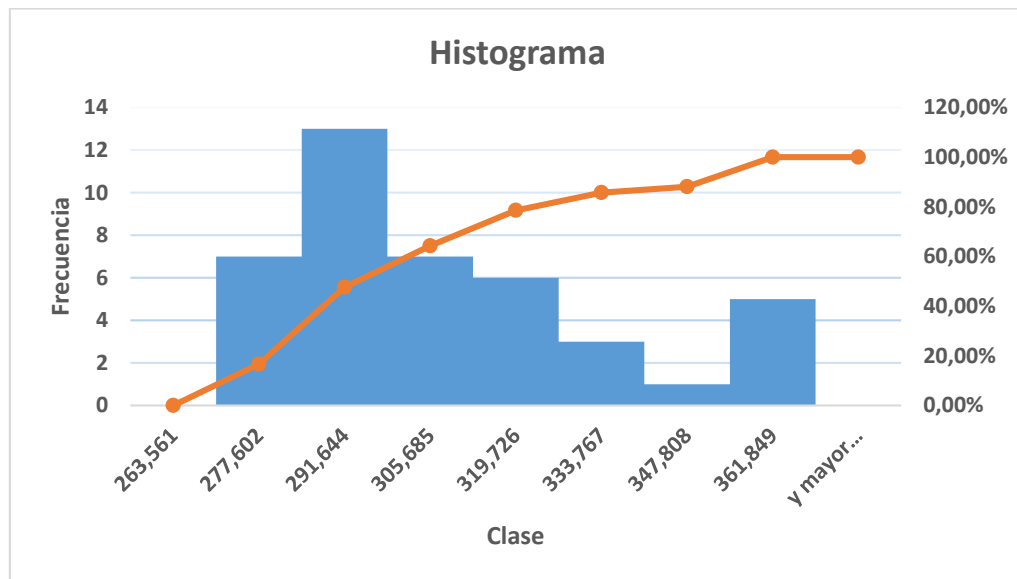
Alcance (A):	$A = [263.661; 361.949]$
Rango o recorrido R):	$R = 361.949 - 263.661 = 98.288$
Numero de intervalos de clase (K):	$K = 1 + 3.3 \text{Log}(n) = 6.36 = 7$
Ancho de clase (W):	$W = R/K = 14.04$

Tabla 4.11. Tabla de intervalos y clasificación

Intervalos		Grupos	Frecuencia
Linf	Lsup		
	263,661	263,561	0
263,661	277,702	277,602	7
277,702	291,744	291,644	13
291,744	305,785	305,685	7
305,785	319,826	319,726	6
319,826	333,867	333,767	3
333,867	347,908	347,808	1
347,908	361,849	361,849	5

Fuente: Elaboración propia

Figura 5.1. Histograma



Fuente: Elaboración propia

Medidas de tendencia central

-Media (\bar{X})

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^K f_i * X_i}{n}$$

$$\bar{X}_1 = 301.44$$

-Mediana (Me)

$$Me = Linf + W * \left(\frac{\frac{n}{2} * F(m-1)}{f_m} \right)$$

$$Me_1 = 293.51$$

-Moda (Mo)

$$Mo = Linf + W * \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right)$$

$$Mo_1 = 296.88$$

Medidas de dispersión

-Varianza (S^2)

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

$$S^2_1 = 713.12$$

-Desviación estándar (σ)

$$\sigma = \sqrt{S^2}$$

$$\sigma = 26.70$$

4.6.1 Tratamiento estadístico inferencial

Tabla 4.12. Media de datos – media de la media

	Suelo natural	Suelo-fibra PET reciclado
	\bar{x}_1	\bar{x}_2
	(kPa)	(kPa)
Media	263.66	293.51
M. media	263.66	293.51

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis nula (H₀). - La media de resistencia de arcilla con fibra PET reciclado es menor a la media de resistencia cortante sin fibra PET reciclado:

$$H_0: 293.51\text{kPa (con fibra PET reciclado)} < 263.66\text{kPa (Sin material PET reciclado)}$$

Hipótesis alternativa (H_a). – La media de resistencia de arcilla con fibra PET reciclado es mayor a la media resistencia cortante sin fibra PET reciclado:

$$H_a: 293.51\text{kPa (con fibra PET reciclado)} > 263.66\text{kPa (Sin material PET reciclado)}$$

Precisión y rango de confiabilidad

Tabla 4.13. Nivel de confianza y significancia

Datos para el cálculo	
Confiabilidad	95 %
Margen de error	5 %

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 Prueba de hipótesis

$$Z=1.9600 \quad \text{Intervalo: } [-1.9600 ; 1.9600] \quad Z = \frac{\bar{X}-u}{\sigma_{\bar{x}}} \quad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

U= 272.57 kPa Promedio considerado por la hipótesis nula

\bar{X} = 301.44 kPa Media muestral tomada

σ = 26.70 kPa Desviación estándar de la muestra

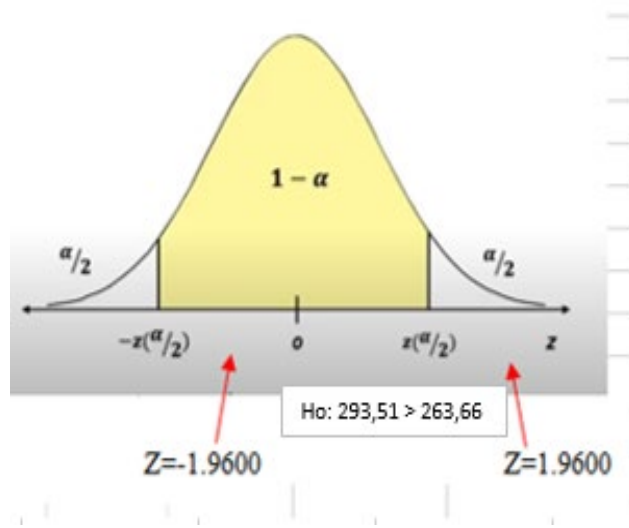
n= 42 Número de elementos muestreados

$\sigma_{\bar{x}}$ =4.11 Desviación estándar tipificada

Z= 7.13 Valor de Z tipificado

Se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Figura 5.2. Prueba de hipótesis de dos colas



Fuente: Elaboración propia

Ha: 293.51kPa (con fibra PET reciclado) > 263.66kPa (Sin material PET reciclado)

Se observa que el valor de la media de resistencia de arcilla con fibra de material PET reciclado es de mayor resistencia al suelo sin fibra de material PET reciclado, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que sí existe una diferencia muy significativa entre el valor de resistencia del suelo arcilloso reforzado con fibra de material PET reciclado.

4.7 APLICACIÓN DEL REFUERZO DEL RESIDUO PLÁSTICO EN LA EXCAVACIÓN DE ZAPATAS

Uno de los objetivos de este proyecto es aplicar los hallazgos de la investigación sobre la resistencia al corte de suelos arcillosos reforzados con residuos plásticos en un escenario práctico y realista. En particular, nos enfocaremos en el análisis de excavación de una zapata para ambos tipos de suelo arcilloso CH y CL, en el que se observará la variación del área de zapatas, tras la adición de refuerzo de material PET reciclado en sus diferentes tamaños y porcentajes.

Dimensionamiento de Zapata Basado en la Cohesión del Suelo Reforzado CH con Fibras de residuo PET (Fibra de 1.5 cm y 0.5 cm)

Se asumirá una carga total para el edificio de cinco pisos de 1000 kN y se utiliza un factor de seguridad de 3.0 y una profundidad de cimentación de 2.5 m.

Cálculos

Fórmulas Utilizadas

1. Capacidad de Carga Última (q_{ult}):

$$q_{ult} = c * N_c + \gamma * Df * N_q$$

Donde N_c y N_q son factores de capacidad de carga de Terzaghi (asumidos como 5.14 y 1.0 respectivamente).

2. Capacidad de Carga Permitida (q_{perm}):

$$q_{perm} = \frac{q_{ult}}{FS}$$

Con un factor de seguridad (FS) de 3.0.

3. Área de Zapata (A):

$$A = \frac{P}{q_{perm}}$$

Donde P es la carga aplicada (1000 kN).

Resultados

Datos Asumidos

$\gamma=14.67 \text{ kN/m}^3$ (peso unitario del suelo)

$Df=2.5 \text{ m}$

$Nc=5.14$

$Nq=1$

Datos de Cohesión:

Fibra de 1.5 cm:

0.00%: 277.80 kPa

0.20%: 292.36 kPa

1.00%: 317.72 kPa

2.00%: 356.35 kPa

Fibra de 0.5 cm:

0.00%: 277.80 kPa

0.20%: 284.35 kPa

1.00%: 293.09 kPa

2.00%: 351.30 kPa

Cálculos

Para Fibra de 1.5 cm

1. Para 0.00% de Fibra:

$$c = 277.80 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = 277.80 \times 5.14 + 14.67 \times 2.5 \times 1.0 = 1464.54 \text{ kPa}$$

$$q_{perm} = 1464.54/3 = 488.18 \text{ kPa}$$

$$A = 1000/488.18 = 2.05 \text{ m}^2$$

2. Para 0.20% de Fibra:

$$c = 292.36 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = 292.36 \times 5.14 + 14.67 \times 2.5 \times 1.0 = 1539.38 \text{ kPa}$$

$$q_{perm} = 1539.38/3 = 513.13 \text{ kPa}$$

$$A = 1000/513.13 = 1.95 \text{ m}^2$$

3. Para 1.00% de Fibra:

$$c = 317.72 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = 317.72 \times 5.14 + 14.67 \times 2.5 \times 1.0 = 1649.17 \text{ kPa}$$

$$q_{perm} = 1649.17/3 = 549.72 \text{ kPa}$$

$$A = 1000/549.72 = 1.82 \text{ m}^2$$

4. Para 2.00% de Fibra:

$$c = 356.35 \text{ kPa}$$

$$q_{ult} = 356.35 \times 5.14 + 14.67 \times 2.5 \times 1.0 = 1868.29 \text{ kPa}$$

$$q_{perm} = 1868.29/3.0 = 622.76 \text{ kPa}$$

$$A = 1000/622.76 = 1.61 \text{ m}^2$$

Resumen de Resultados Suelo CH

Fibra	Porcentaje de Fibra	Cohesión (kPa)	Capacidad de Carga Última (q_ult) kPa	Capacidad de Carga Permitida (q_perm) kPa	Área de Zapata (m ²)
SN	0.00%	277,80	1464,54	488,18	2,05
1.5 cm	0.20%	292,36	1539,38	513,13	1,95
1.5 cm	1.00%	313,72	1649,17	549,72	1,82
1.5 cm	2.00%	356,35	1868,29	622,76	1,61
0.5 cm	0.20%	284,35	1498,21	499,40	2,00
0.5 cm	1.00%	293,09	1543,13	514,38	1,94
0.5 cm	2.00%	351,30	1842,33	614,11	1,63

Fuente: Elaboración propia

Dimensionamiento de Zapata Basado en la Cohesión del Suelo Reforzado CL con Fibras de residuo PET (Fibra de 1.5 cm y 0.5 cm)

Se asumirá de la misma forma la carga total para el edificio de cinco pisos de 1000 kN, utilizando un factor de seguridad de 3.0 ,un peso unitario del suelo de 14.37 Kn/m³ y una profundidad de cimentación de 2.5 m.

Resumen de Resultados Suelo CL

Fibra	Porcentaje de Fibra	Cohesión (kPa)	Capacidad de Carga Última (q_ult) kPa	Capacidad de Carga Permitida (q_perm) kPa	Área de Zapata (m ²)
SN	0.00%	267,36	1410,33	470,11	2,13
1.5 cm	0.20%	285,20	1502,03	500,68	2,00
1.5 cm	1.00%	298,15	1568,59	522,86	1,91
1.5 cm	2.00%	325,10	1707,11	569,04	1,76
0.5 cm	0.20%	274,67	1447,90	482,63	2,07
0.5 cm	1.00%	290,05	1526,96	508,99	1,96
0.5 cm	2.00%	318,97	1675,61	558,54	1,79

Fuente: Elaboración propia

4.8 ANÁLISIS DE COSTOS PARA EL REFUERZO DE SUELO CON FIBRA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EXCAVACIÓN DE ZAPATAS

Para realizar el análisis de costos, primero se necesita calcular el volumen adicional del refuerzo y de excavación que se necesitará para reforzar la zapata en comparación con el suelo natural. Luego, se puede determinar el costo de excavación tanto para el suelo natural como para el suelo reforzado.

Cálculo del Volumen de Excavación

La fórmula para el volumen de excavación es:

$$V = A \times Df$$

donde:

V es el volumen de excavación

A es el área de la zapata

Df es la profundidad de cimentación

Cálculo del Volumen a estabilizar

Que resulta de la resta del volumen de excavación natural y el volumen de excavación de cada porcentaje

Cálculo del volumen de la fibra

Resulta del porcentaje de fibra multiplicado por el volumen a estabilizar siendo todo esto dividido entre cien.

Altura de desplante df

Resulta de la longitud efectiva multiplicada por dos y siendo la Altura a estabilizar la resta entre la altura de desplante natural y la altura de desplante de los diferentes porcentajes.

Tabla resumen Suelo CH

Fibra	Porcentaje de Fibra	Área de Zapata (m ²)	Volumen de excavación (m ³)	Volumen a estabilizar (m ³)	Volumen de la fibra (m ³)	Altura de desplante df (m)	Altura a estabilizar (m)
SN	0.00%	2,05	5,86	0	0,00	2,86	0,00
1.5 cm	0.20%	1,95	5,44	0,42	0,00	2,79	0,07
1.5 cm	1.00%	1,82	4,91	0,96	0,01	2,70	0,16
1.5 cm	2.00%	1,61	4,07	1,79	0,04	2,53	0,33
0.5 cm	0.20%	2,00	5,67	0,20	0,00	2,83	0,03
0.5 cm	1.00%	1,94	5,42	0,44	0,00	2,79	0,07
0.5 cm	2.00%	1,63	4,16	1,71	0,03	2,55	0,31

Tabla resumen Suelo CL

Fibra	Porcentaje de Fibra	Área de Zapata (m ²)	Volumen de excavación (m ³)	Volumen a estabilizar (m ³)	Volumen de la fibra (m ³)	Altura de desplante df (m)	Altura a estabilizar (m)
SN	0.00%	2,13	6,20	0,00	0,00	2,92	0,00
1.5 cm	0.20%	2,00	5,65	0,56	0,00	2,83	0,09
1.5 cm	1.00%	1,91	5,29	0,91	0,01	2,77	0,15
1.5 cm	2.00%	1,76	4,66	1,55	0,03	2,65	0,27
0.5 cm	0.20%	2,07	5,96	0,24	0,00	2,88	0,04
0.5 cm	1.00%	1,96	5,51	0,70	0,01	2,80	0,11
0.5 cm	2.00%	1,79	4,79	1,41	0,03	2,68	0,24

Para la generación de los precios unitarios se tomó en cuenta solo los porcentajes más altos de los dos suelos del tamaño más largo de fibra, además de longitudes constructivas con fines comparativos con el suelo natural.

Para generar un análisis de costos detallado, es importante primero desglosar todas las actividades necesarias para realizar el refuerzo de la zapata con fibra de PET reciclado.

A continuación, se enumeran las actividades principales junto con una breve descripción de cada una. Luego, se realizó el análisis de los costos a cada actividad en base a los recursos requeridos, como mano de obra, equipos y materiales.

Actividades Principales

1. Excavación del Suelo

Excavación manual o mecánica del área de la zapata.

Verificación de la profundidad de excavación.

2. Preparación del Suelo para Mezcla

Extensión del suelo excavado.

Determinación y preparación de la cantidad de fibra de PET.

3. Mezcla del Suelo con Fibra de PET

Distribución de la fibra de PET sobre el suelo.

Mezclado manual del suelo con la fibra.

4. Colocación del Suelo Mezclado

Colocación del suelo en capas.

5. Compactación

Compactación de cada capa de suelo mezclado. Se realizarán capas de 10cm con fines constructivos.

Verificación de la densidad y compactación adecuada.

6. Construcción de la Zapata

Instalación del refuerzo de acero (si aplica).

PRECIOS UNITARIOS SUELO CH

DATOS GENERALES					
Proyecto:	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA CORTANTE DE LOS SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS				
Actividad:	EXCAVACIÓN SUELO NATURAL- ARCILLA CH PARA ZAPATA				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	GLB				
Moneda:	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	EXCAVACIÓN MANUAL	M3	6,00	64,00	384,00
TOTAL MATERIALES					384,00
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	ALBAÑIL	DIA	1,00	145,00	145,00
2	AYUDANTE	DIA	1,00	125,00	125,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					270,00
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				71,18%	192,19
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,94%	69,05
TOTAL MANO DE OBRA					531,24
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
5,00%	HERRAMIENTAS=(% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				26,56
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					26,56
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
9,50%	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3				89,47
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					89,47
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
9,50%	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4				97,97
TOTAL UTILIDAD					97,97
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
3,09%	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5				34,89
TOTAL IMPUESTOS					34,89
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1.129,24
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1.129,24

PRECIOS UNITARIOS SUELO CH REFORZADO

DATOS GENERALES					
Proyecto:	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA CORTANTE DE LOS SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON RESIDUOS PLASTICOS				
Actividad:	EXCAVACIÓN ARCILLA CH PARA ZAPATA CON REFUERZO DE FIBRA PET DE 1,5CM AL 2%				
Unidad:	GLB				
Moneda:	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	EXCAVACIÓN MANUAL	M3	6,00	64,00	384,00
2	FIBRA PET RECICLADO	KG	1,20	32,00	38,40
3	COMPACTACIÓN MANUAL CON SALTARIN	M3	1,00	380,00	380,00
TOTAL MATERIALES					802,40
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	ALBAÑIL	DIA	1,00	145,00	145,00
2	AYUDANTE	DIA	1,00	125,00	125,00
3	OPERADOR	DIA	1,00	180,00	180,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					450,00
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				71,18%	320,31
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,94%	115,08
TOTAL MANO DE OBRA					885,39
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	SALTARIN	DIA	1,00	400,00	400,00
5,00%	HERRAMIENTAS=(% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				44,27
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					444,27
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
9,50%	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3				202,55
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					202,55
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
9,50%	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4				221,79
TOTAL UTILIDAD					221,79
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
3,09%	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5				78,99
TOTAL IMPUESTOS					78,99
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					2.556,40
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					2.556,40

PRECIOS UNITARIOS SUELO CL

DATOS GENERALES					
Proyecto:	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA CORTANTE DE LOS SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS				
Actividad:	EXCAVACIÓN SUELO NATURAL- ARCILLA CL PARA ZAPATA				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	GLB				
Moneda:	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	EXCAVACIÓN MANUAL	M3	6,20	64,00	396,80
TOTAL MATERIALES					396,80
2. MANO DE OBRA					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	ALBAÑIL	DIA	1,00	145,00	145,00
2	AYUDANTE	DIA	1,00	125,00	125,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					270,00
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				71,18%	192,19
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,94%	69,05
TOTAL MANO DE OBRA					531,24
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
5,00%	HERRAMIENTAS=(% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				26,56
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					26,56
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
9,50%	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3				90,69
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					90,69
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
9,50%	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4				99,30
TOTAL UTILIDAD					99,30
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
3,09%	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5				35,37
TOTAL IMPUESTOS					35,37
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					1.144,59
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					1.144,59

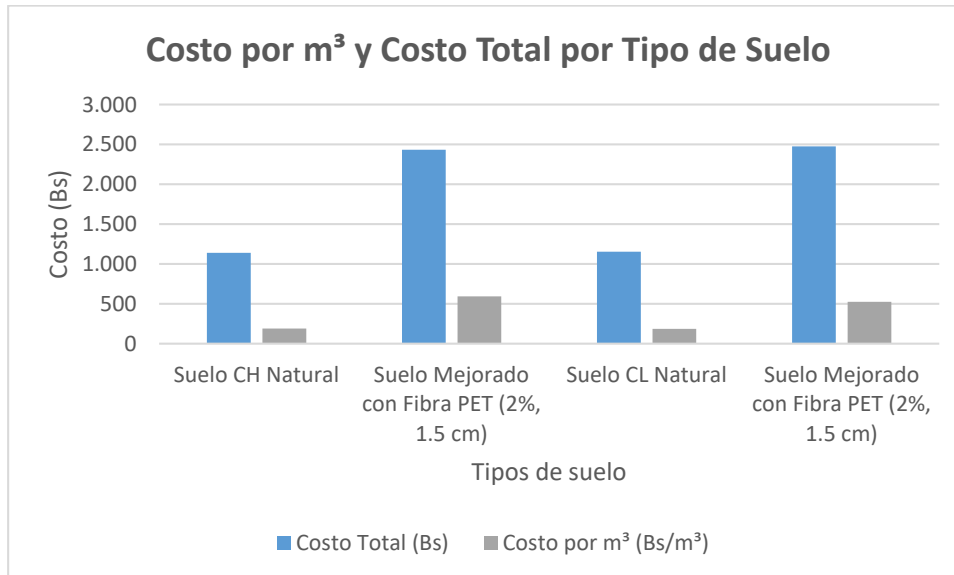
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS SUELO CL REFORZADO

DATOS GENERALES					
Proyecto:	ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA CORTANTE DE LOS SUELOS ARCILLOSOS REFORZADOS CON RESIDUOS PLÁSTICOS				
Actividad:	EXCAVACIÓN Y MEJORAMIENTO DE ZAPATA CON REFUERZO DE 1,5CM AL 2%				
Cantidad:	1,00				
Unidad:	GLB				
Moneda:	BOLIVIANOS				
1. MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	EXCAVACIÓN MANUAL	M3	4,70	64,00	300,80
2	FIBRA PET RECICLADO	KG	1,10	32,00	35,20
3	COMPACTACIÓN MANUAL CON SALTARIN	M3	1,00	380,00	380,00
TOTAL MATERIALES					716,00
2. MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	ALBAÑIL	DIA	1,00	145,00	145,00
2	AYUDANTE	DIA	1,00	125,00	125,00
3	OPERADOR	DIA	1,00	180,00	180,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA					450,00
CARGAS SOCIALES = (% DEL SUBTOTAL DE MANO DE OBRA)				71,18%	320,31
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA = (% DE SUMA DE SUBTOTAL DE MANO DE OBRA + CARGAS SOCIALES)				14,94%	115,08
TOTAL MANO DE OBRA					885,39
3. EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					
DESCRIPCIÓN		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO TOTAL
1	SALTARIN	DIA	1,00	400,00	400,00
5,00%	HERRAMIENTAS=(% DEL TOTAL DE MANO DE OBRA)				44,27
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS					444,27
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					
					COSTO TOTAL
10,00%	GASTOS GENERALES = % DE 1 + 2 + 3				204,57
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS					204,57
5. UTILIDAD					
					COSTO TOTAL
10,00%	UTILIDAD = % DE 1 + 2 + 3 + 4				225,02
TOTAL UTILIDAD					225,02
6. IMPUESTOS					
					COSTO TOTAL
3,09%	IMPUESTOS IT = % DE 1 + 2 + 3 + 4 + 5				76,49
TOTAL IMPUESTOS					76,49
TOTAL PRECIO UNITARIO (1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6)					2.475,25
TOTAL PRECIO UNITARIO ADOPTADO (Con dos (2) decimales)					2.475,25

Resumen precios unitarios

Tipo de Suelo	Costo Total (Bs)	Volumen de la Zapata (m ³)	Costo por m ³ (Bs/m ³)
Suelo CH Natural	1.139,58	6,00	189,93
Suelo Mejorado con Fibra PET (2%, 1.5 cm)	2.432,66	4,10	593,33
Suelo CL Natural	1.155,06	6,20	186,30
Suelo Mejorado con Fibra PET (2%, 1.5 cm)	2.475,25	4,70	526,65

Gráfica de Costos de los diferentes suelos



La adición de fibra PET para mejorar el suelo resulta en un costo significativamente más alto. Este aumento en el costo se debe a los materiales adicionales y el trabajo necesario para incorporar las fibras al suelo.

Aunque el costo inicial es significativamente mayor, el incremento en la capacidad de carga y la reducción de asentamientos pueden traducirse en ahorros a largo plazo debido a menores necesidades de mantenimiento y reparaciones.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El estudio detallado del comportamiento de los suelos arcillosos tipo CL y CH reforzados con fibras de PET reciclado, revela mejoras significativas en la cohesión y resistencia al corte. En el suelo CL, se observó un aumento sustancial en la cohesión con el incremento del contenido de fibra, alcanzando un valor máximo de 325.10 kPa con un porcentaje del 2% y una longitud de 1.5 cm, representando un incremento del 21.57% respecto al estado natural. Además, se evidenció una mayor deformación en el suelo reforzado, indicando una respuesta más robusta al esfuerzo aplicado y características dúctiles, especialmente con fibras de mayor longitud.

Por otro lado, en el suelo CH, se registró un incremento notable en la cohesión, pasando de 277.80 kPa a 356.35 kPa, con un aumento del 28.26% con el máximo porcentaje de fibra utilizado. Aunque se observaron esfuerzos similares bajo un mismo porcentaje de fibra, las deformaciones unitarias fueron considerablemente más altas en el suelo CH en comparación con el CL. Esto sugiere que el suelo CH presenta un comportamiento más frágil en términos de resistencia y deformación unitaria.

El uso de fibra PET para el refuerzo del suelo CL y CH muestra claros beneficios técnicos en términos de capacidad de carga y estabilidad del suelo. Sin embargo, los costos significativamente más altos requieren una evaluación detallada de la viabilidad económica para cada proyecto específico. Para proyectos críticos donde la estabilidad y la reducción de asentamientos son prioritarios, la inversión en fibra PET puede ser justificable y beneficiosa a largo plazo. Para otros proyectos, puede ser necesario considerar alternativas más económicas o una combinación de técnicas de mejora del suelo. Los resultados del estudio respaldan la viabilidad técnica del refuerzo con fibras de PET en suelos arcillosos, al demostrar mejoras sustanciales en la capacidad de carga y estabilidad de las cimentaciones.

Las fibras plásticas se colocaron de forma aleatoria al realizar las probetas para el ensayo de corte directo, pero teniendo en cuenta el peso del suelo y el porcentaje del mismo. Esto se hizo para garantizar que las fibras se distribuyan uniformemente en el suelo.

Con las fibras de mayor longitud se observa que la cohesión varía muy poco entre los porcentajes contenidos de fibra, mientras que en las de menor longitud la variación es notable con porcentajes más altos de fibra. Esto podría indicar que a menor longitud y mayor porcentaje puede existir una mejor homogenización de la mezcla generando mejor consistencia y mayores esfuerzos de resistencia.

Al observar que la adición de fibra de plástico reciclado mejora las propiedades del suelo, también puede disminuir el impacto ambiental sacando provecho de los residuos de la industria del plástico.

5.2 RECOMENDACIONES

Para fibras mayores a 5.0 cm no deben utilizarse porcentajes mayores a 1.5%, ya que las probetas son difíciles de manipular y moldear.

La homogenización manual del suelo con la fibra es muy laboriosa, por tal razón la utilización de medios específicos en obra deberá ser requerida para una mejor mezcla. Esta homogenización es más complicada con fibras de mayor longitud.

Llevar a cabo estudios adicionales para evaluar la durabilidad a largo plazo del refuerzo con fibras de PET en suelos arcillosos. Esto podría incluir pruebas de campo a largo plazo y monitoreo de estructuras reales construidas sobre suelos reforzados para evaluar la efectividad y estabilidad del refuerzo en condiciones ambientales reales.

Explorar diferentes métodos y técnicas de incorporación de fibras de PET en el suelo para maximizar su efectividad y durabilidad, llevando a cabo investigaciones sobre la distribución y orientación óptimas de las fibras en el suelo, se sugiere investigar los resultados con láminas de plástico reciclado.

Llevar a cabo análisis más detallados de costos y evaluaciones de viabilidad económica para determinar la rentabilidad y la factibilidad financiera del refuerzo con fibras de PET en diferentes proyectos de ingeniería civil.

Realizar estudios adicionales para evaluar el impacto ambiental completo del refuerzo con fibras de PET, para evaluar los posibles efectos secundarios no deseados en el suelo y el medio ambiente circundante, lo cual podría ayudar a identificar y mitigar cualquier riesgo potencial asociado con la técnica de refuerzo.