

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular

Tema: Evaluación de la Resistencia a la Compresión Simple de Suelos Orgánicos Remoldeados y Mejorados con Fibra de Abacá recubierta con Hidróxido de Sodio.

AUTOR:

JIMENEZ LOPEZ KEVIN SEBASTIAN  
POZO GALARRAGA LUIS ERNESTO

QUITO, 24 MARZO DE 2023

## INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO.....	2
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	6
INDICE DE TABLAS.....	8
CAPITULO 1: GENERALIDADES.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
OBJETIVO GENERAL:.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	3
4. ALCANCE.....	4
5. MARCO TEORICO.....	5
CAPITULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO.....	7
1. UBICACIÓN.....	7
2. MATERIAL RECUPERADO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO.....	8
3. RELACIONES FUNDAMENTALES.....	9
4. GRANULOMETRIA.....	10
4.1. TAMIZADO.....	10
4.2. HIDROMETRO.....	10
4.3. TABLA Y CURVA GRANULOMETRICA.....	11

5.	LIMITES DE ATTERBERG .....	12
5.1.	LIMITE LIQUIDO (LL) .....	13
5.2.	LIMITE PLASTICO (LP).....	14
5.3.	INDICE DE PLASTICIDAD (PI).....	14
6.	GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs).....	15
7.	CONTENIDO ORGANICO .....	15
8.	CLASIFICACION SUCS .....	16
	CAPITULO 3: FIBRA DE ABACA .....	19
1.	DESCRIPCIÓN.....	20
2.	PROCESO DE OBTENCION .....	20
3.	PROPIEDADES.....	21
	DIMENSIONES.....	23
	DENSIDAD .....	23
	HUMEDAD .....	23
	RESISTENCIA A LA TENSIÓN.....	24
	ELONGACION A LA ROTURA.....	24
	MODULO DE ELASTICIDAD .....	25
	COMPOSICION QUIMICA.....	25
4.	RESUMEN DE LA FIBRA UTILIZADA.....	26
	CAPITULO 4: MEJORAMIENTO DE SUELOS CON FIBRA DE ABACA.....	27

1.	INTRODUCCION .....	27
2.	FIBRAS NATURALES .....	27
3.	INTERACCION SUELO-FIBRA.....	28
4.	ESTABILIZACION QUIMICA DE LA FIBRA DE ABACA.....	28
5.	SELECCIÓN DE CONTENIDO DE FIBRA Y LONGITUD DE FIBRA .....	29
	CAPITULO 5: OBTENCION DE LA CURVA DE COMPACTACION .....	31
1.	INTRODUCCION .....	31
2.	PROCTOR MODIFICADO.....	32
3.	HARVARD MINIATURA .....	33
4.	RESULTADOS.....	35
	Muestra Sin Fibra.....	36
	Muestra 1% Fibra.....	39
	Muestra 2% Fibra.....	40
	CAPITULO 6: COMPRESION SIMPLE .....	42
1.	INTRODUCCION .....	42
2.	PREPARACION DE MUESTRAS .....	42
3.	RESULTADOS.....	43
	COMPRESION SIMPLE MUESTRAS REMOLDEADAS .....	43
	ESFUERZO ÚLTIMO PROMEDIO DE LAS PROBETAS REMOLDEADAS CON Y SIN FIBRA .....	46

COMPRESION SIMPLE MUESTRAS INALTERADAS .....	46
ESFUERZO ÚLTIMO PROMEDIO DE LAS MUESTRAS INALTERADAS .....	47
CAPITULO 7: ANALISIS DE RESULTADOS.....	48
CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	50
1. CONCLUSIONES .....	50
2. RECOMENDACIONES .....	52
BIBLIOGRAFIA .....	54
ANEXOS.....	56

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ubicación de extracción de la muestra de suelo. Fuente: Google Maps .....	7
Ilustración 2: Tubos Shelby obtenidos. Fuente: Propia .....	8
Ilustración 3: Curva Granulométrica Fuente: Elaboración Propia.....	12
Ilustración 4: Límites de Atterberg. Fuente: Das, 2015 .....	13
Ilustración 5: Cuadro de Plasticidad Fuente: ASTM, 2020 .....	17
Ilustración 6: Diagrama de Flujo para Clasificación de Suelos Finos. Fuente: (Das, 2015) .....	18
Ilustración 7: Ubicación de la parroquia Monterrey. Fuente: Google Maps.....	19
Ilustración 8: Principales productores de abacá. Fuente: FAO, 2023 .....	20
Ilustración 9: izq.) Fibra tratada 2% NaOH. der.) Fibra sin tratar. Fuente: Elaboración Propia.....	29
Ilustración 10: Equipo Proctor Estándar. Fuente: Das, 2015 .....	33
Ilustración 11: Equipo Harvard Miniatura. Fuente: Geotechpedia .....	34
Ilustración 12: Curva de Compactación Proctor-Sin fibra. Fuente: Elaboración Propia ..	36
Ilustración 13: Curva de compactación Harvard- sin fibra. Fuente: Elaboración Propia .	37
Ilustración 14: Curva de compactación Harvard-1% fibra. Fuente: Elaboración Propia..	40
Ilustración 15: Curva de compactación Harvard-2% fibra. Fuente: Elaboración Propia..	41
Ilustración 16: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras sin Fibra. Fuente: Elaboración Propia.....	44
Ilustración 17: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras con Fibra (1%). Fuente: Elaboración Propia.....	44
Ilustración 18: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras con Fibra (2%). Fuente: Elaboración Propia.....	45

Ilustración 19: Graficas Esfuerzo-Deformación (Media) de las distintas muestras. Fuente: Elaboración Propia.....	45
Ilustración 20: Esfuerzo-deformación muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia	47
Ilustración 21: Porcentaje de mejora de la Resistencia a Compresión Simple con respecto a la muestra inalterada N°1 y N°2. Fuente: Elaboración Propia.....	48
Ilustración 22: Porcentaje de mejora a la Deformación Unitaria con respecto a la muestra inalterada N°1 y N°2. Fuente: Elaboración Propia .....	49

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Relaciones Fundamentales Fuente: Propia .....	9
Tabla 2: Tabla de Resultados de contenido orgánico. Fuente: Elaboración Propia.....	16
Tabla 3: Tabla Comparativa de Propiedades de Fibras Naturales. Fuente: Vijayalakshmi, 2014.....	22
Tabla 4: Resumen de Propiedades de la Fibra. Fuente: Alcívar & Escobar, 2019 .....	26
Tabla 5: Muestra Proctor - Sin Fibra. Fuente: Elaboración Propia.....	36
Tabla 6: Muestra Harvard - Sin fibra. Fuente: Elaboración Propia .....	37
Tabla 7: Muestra Harvard-1% fibra. Fuente: Elaboración Propia .....	39
Tabla 8: Muestra Harvard-2% fibra. Fuente: Elaboración Propia .....	40
Tabla 9: Resultados compresión simple, muestras remoldeadas. Fuente: Elaboración Propia .....	43
Tabla 10: Media de esfuerzos últimos de las muestras remoldeadas. Fuente: Elaboración Propia .....	46
Tabla 11: Resultados compresión simple, muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia .....	46
Tabla 12: Media de esfuerzos últimos, muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia .....	47
Tabla 13: Modulo de elasticidad, cohesión y porcentaje de mejora de la deformación unitaria y esfuerzo último de las muestras inalteradas y remoldeadas con y sin fibra. Fuente: Elaboración Propia.....	48

## **CAPITULO 1: GENERALIDADES**

### **1. INTRODUCCIÓN**

El mejoramiento de suelo con fibras naturales es un método que tiene una larga historia y ha sido utilizado desde tiempos antiguos. La inclusión de fibras naturales en materiales como el adobe ha demostrado beneficios significativos en términos de resistencia y durabilidad (Vettorelo & Claria, 2014). La revisión bibliográfica realizada por Vettorelo y Claria sobre el refuerzo de suelos mediante adición de fibras es valiosa fuente de información para nuestro estudio. Esta nos proporciona una visión general de los antecedentes y el estado actual de este campo, mediante investigaciones previas y aplicaciones realizadas referentes al refuerzo de suelos con fibras.

Se ha demostrado que la adición de fibras naturales en el suelo puede mejorar las propiedades mecánicas del mismo de forma significativa. La distribución aleatoria de fibras en el suelo es un factor clave en el proceso de mejoramiento, ya que de esta forma se crea una matriz tridimensional que refuerza la estructura del suelo (Vettorelo & Claria, 2014).

Aunque existen investigaciones que respaldan la factibilidad del mejoramiento de suelos con fibras, no se ha realizado estudios previos que utilicen la fibra de abacá para este propósito. Por lo tanto, esta investigación busca llenar ese vacío de conocimiento y

contribuir con información relevante sobre la factibilidad y aplicabilidad de la fibra de abacá reforzada y su utilización en suelos orgánicos.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La justificación de esta investigación se fundamenta en la necesidad de buscar alternativas sustentables y económicas para el mejoramiento de suelos de baja calidad, como es el caso de los suelos orgánicos. La fibra de abacá sirve para este propósito debido a su gran resistencia mecánica, resistencia al daño por agua y el largo de la fibra llegando hasta 3 metros (FAO, 2023). Sin embargo, existen pocos estudios referentes a la aplicación de fibra de abacá.

Adicionalmente el Ecuador es el segundo productor mundial de abacá, donde en el año 2010 se produjo aproximadamente 10 000 toneladas, lo cual en su mayoría se destina a exportación, principalmente a Europa, Japón y Estados Unidos (FAO, 2023). Por lo tanto, es de gran importancia el aprovechar el uso de esta en el contexto nacional.

La adición de esta fibra al suelo podría traer consecuencias positivas, entre ellas una mayor resistencia a la compresión simple, mayor resistencia al corte y mayor ductilidad (Vettorelo & Claria, 2014). Por lo tanto, es necesario validar la aplicación de fibra de abacá recubierta con NaOH (Hidróxido de Sodio) en suelos orgánicos como una alternativa factible para mejorar las propiedades mecánicas del mismo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL:**

- Evaluar la resistencia a la compresión simple de suelos orgánicos remoldeados y mejorados con fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio.

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Realizar la caracterización de la muestra de suelo obtenida mediante ensayo de clasificación SUCS.
- Determinar la resistencia a la compresión simple en probetas de suelo mejorado con distintas dosificaciones.
- Comparar la resistencia a la compresión simple del suelo mejorado con la del suelo sin mejorar.
- Determinar el porcentaje óptimo de fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio para el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo.
- Determinar el mecanismo de mejora que ejerce la fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio sobre el suelo.
- Determinar posibles aplicaciones de suelos mejorados con fibras de abacá recubierta con hidróxido de sodio.

#### 4. ALCANCE

El alcance de la investigación se centra en la evaluación de la resistencia a la compresión simple de suelos orgánicos remodelados y mejorados con fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio.

Inicialmente, el trabajo será exploratorio puesto que se investigará sobre el mejoramiento de suelos remodelados con fibras naturales. Como también en una investigación respecto al tratamiento de fibras orgánicas y su comportamiento. A partir de esta información se realizará los ensayos pertinentes.

Se obtendrán muestras representativas de suelos orgánicos en el área de estudio. Estas muestras serán sometidas a ensayos para su posterior clasificación según el sistema SUCS. Posteriormente se obtendrán probetas remodeladas homogéneas para su análisis.

Se obtendrá la fibra de abacá y se la someterá a un tratamiento con hidróxido de sodio para mejorar sus propiedades, esto se realizará en base a bibliografía referencial, como también la obtención de las propiedades del tipo de fibra a utilizar. En base a la información obtenida sobre la fibra se procederá al tratamiento con hidróxido de sodio.

Se determinará las condiciones óptimas de humedad y densidad para la realización de las probetas remodeladas bajo diferentes porcentajes de fibra, esto se realizará utilizando el ensayo Harvard miniatura. Una vez determinadas las humedades óptimas se realizarán las muestras remodeladas en base a estos datos.

Se prepararán probetas de suelo remoldeado con distintos porcentajes de fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio. Se someterán las probetas a ensayos de compresión simple utilizando una máquina de carga para determinar la resistencia a la compresión simple del suelo mejorado.

## **5. MARCO TEORICO**

El presente trabajo pretende evaluar la resistencia a la compresión simple no confinada de suelos mejorados con fibra de abacá recubierta con hidróxido de sodio, por lo cual se busca evaluar su uso en el mejoramiento de suelos orgánicos.

El mejoramiento de suelos consiste en la modificación de las propiedades físicas y mecánicas mediante procesos físicos, químicos y mecánicos, de manera que pueda cumplir con las características específicas de un proyecto (Rico y Del Castillo, 2012); al mejorar un suelo se logra un incremento en su estabilidad, en su capacidad de carga y se logra una disminución de sus asentamientos (Clariá, 2014)

Existen estudios previos que demuestran que la adición de una concentración de hidróxido de sodio a las fibras orgánicas favorece a su preservación como también su comportamiento a tracción, esto se debe principalmente a la reducción de impurezas en la fibra (Castro, 2007). Es importante controlar la concentración, el tiempo de exposición y el tiempo de secado para lograr un adecuado tratamiento a la fibra.

La estabilización del suelo es la alternativa más viable cuando las propiedades de un suelo no son las deseadas para el proyecto. Estos procesos son viables debido a su bajo costo y al control de calidad que se puede emplear en obra. (Das, 2015). La estabilización de suelos puede ser:

- Estabilización mecánica, la cual consiste en mejorar la condición del suelo sin adición de componentes externos, sino simplemente alterando la condición en la que se encuentra; como puede ser mediante compactación, precarga o drenes. (Das, 2015)
- Estabilización química, la cual consiste en la adición de un agente químico el cual produce una mejora en las propiedades del suelo, cambiando su comportamiento o mejorando la adhesión de sus granos.
- Estabilización física, la cual consiste en la adición de un material adicional al suelo el cual modifique o ayude en el comportamiento mecánico del mismo.

En el caso de este estudio, se empleará una técnica de estabilización física del suelo mediante la adición de fibra de abacá previamente tratada.

## CAPITULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

En el presente capítulo, se llevará a cabo una detallada caracterización del suelo utilizado en esta investigación. Se realizará un análisis del suelo extraído de una profundidad de 0.50 a 1.00 m, con el objetivo de comprender sus características y propiedades.

Se aplicará el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos (SUCS) para categorizar el suelo de acuerdo con sus características y comportamiento.

### 1. UBICACIÓN

La muestra de suelo utilizado para esta investigación se obtuvo del sector del "Garrochal", al sur del Distrito Metropolitano de Quito, Provincia de Pichincha - Ecuador, coordenadas  $0^{\circ}20'25.0''S$   $78^{\circ}31'56.0''W$ .

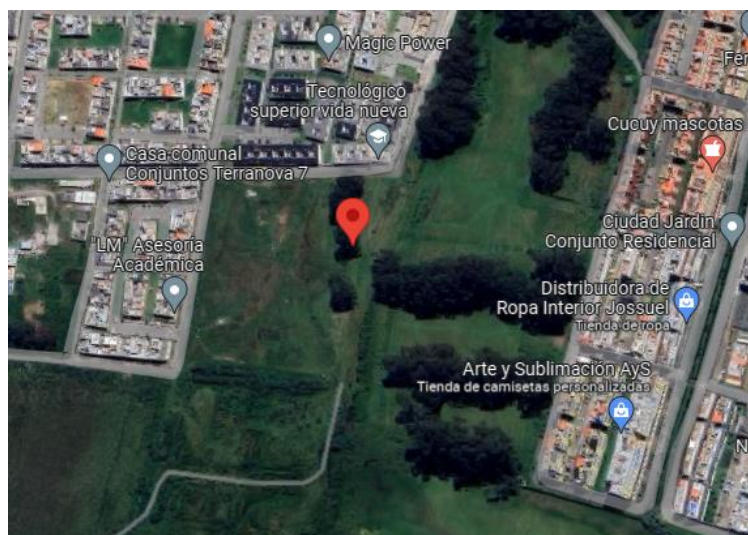


Ilustración 1: Ubicación de extracción de la muestra de suelo. Fuente: Google Maps

## 2. MATERIAL RECUPERADO PARA ENSAYOS DE LABORATORIO

Para llevar a cabo el muestreo del suelo, se extrajeron muestras significativas del suelo, tanto muestras inalteradas como alteradas. Las muestras inalteradas se obtuvieron mediante tubo Shelby. Este procedimiento se llevó a cabo con tubos de 0.5m en un rango de profundidad hasta 3.50 m. Resultando en 5 muestras de tubo Shelby las cuales posterior a su extracción se selló. El objetivo de estas muestras es obtener muestras representativas del suelo en su estado natural, sin alteraciones ni cambios en su composición para su posterior comparación con las muestras remoldeadas.



Ilustración 2: Tubos Shelby obtenidos. Fuente: Propia

Además, se extrajo una muestra alterada de aproximadamente 80 kg de suelo mediante calicata, a una profundidad de 0.5 m a 1.00 m en 3 diferentes puntos del terreno. Esta muestra específica se seleccionó con el propósito de realizar ensayos posteriores que permitirán caracterizar y evaluar las propiedades del suelo, así como también para la realización de las muestras remoldeadas.

### 3. RELACIONES FUNDAMENTALES

Las propiedades físicas del suelo se presentan en la Tabla 1, los resultados presentados se obtuvieron mediante el procedimiento de la Norma ASTM D2763-21 (Standard Test Method for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens).

*Tabla 1: Relaciones Fundamentales Fuente: Propia*

Relaciones Fundamentales	
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1.1985
Densidad Seca (gr/cm <sup>3</sup> )	0.8318
Densidad Saturada (gr/cm <sup>3</sup> )	1.4934
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	11.7534
Peso Específico Seco (kN/m <sup>3</sup> )	8.1575
Peso Específico Saturado (kN/m <sup>3</sup> )	14.6799
Humedad (%)	43.8872
G <sub>s</sub>	2.4800
e (relación de vacíos)	1.9981
n (porosidad %)	66.4582
S (grado de saturación)	55.5205

## **4. GRANULOMETRIA**

El análisis granulométrico es un procedimiento utilizado para determinar la distribución de tamaños de partículas en un suelo o agregado. Este análisis es de gran importancia para la caracterización de los suelos. Para propósitos de nuestra investigación y en base al suelo a ensayar cubriremos el análisis granulométrico por dos métodos:

### **4.1.TAMIZADO**

Para la determinación granulométrica por tamizado se seguirá la normativa ASTM D6913. Este método consiste en utilizar una serie de tamices de diferentes aberturas para separar las partículas en fracciones. Posteriormente se pesa el material retenido en cada tamiz y se registra su relación en base al peso total de la muestra.

### **4.2.HIDROMETRO**

Para la determinación granulométrica por hidrómetro se seguirá la normativa ASTM D7928-16, la cual sirve para determinar los tamaños de partícula pasantes del tamiz N200 (ASTM, 2020c). Este método se basa en la sedimentación de las partículas en suspensión en agua, utilizando un hidrómetro para medir la densidad aparente de la suspensión en intervalos regulares de tiempo.

### 4.3.TABLA Y CURVA GRANULOMETRICA

Tabla 2: Granulometría Fuente: Propia

	Granulometría			
	% Pasante	Diámetro (mm)	% Pasante	Diámetro (mm)
<b>Tamizado</b>	100.00	2.0000	100.00	2.0000
	98.51	0.4250	98.43	0.4250
	84.00	0.0750	79.63	0.0750
<b>Hidrómetro</b>	81.41	0.0733	75.31	0.0751
	79.38	0.0604	73.27	0.0619
	73.27	0.0438	69.20	0.0444
	67.16	0.0317	63.09	0.0321
	59.02	0.0230	56.99	0.0232
	52.92	0.0166	50.88	0.0168
	44.78	0.0125	44.78	0.0125
	36.64	0.0090	36.64	0.0090
	30.53	0.0065	30.53	0.0065
	26.46	0.0047	26.46	0.0047
	22.39	0.0033	22.39	0.0033
	20.35	0.0024	20.35	0.0024
	18.32	0.0014	18.32	0.0014
16.28	0.0010	16.28	0.0010	

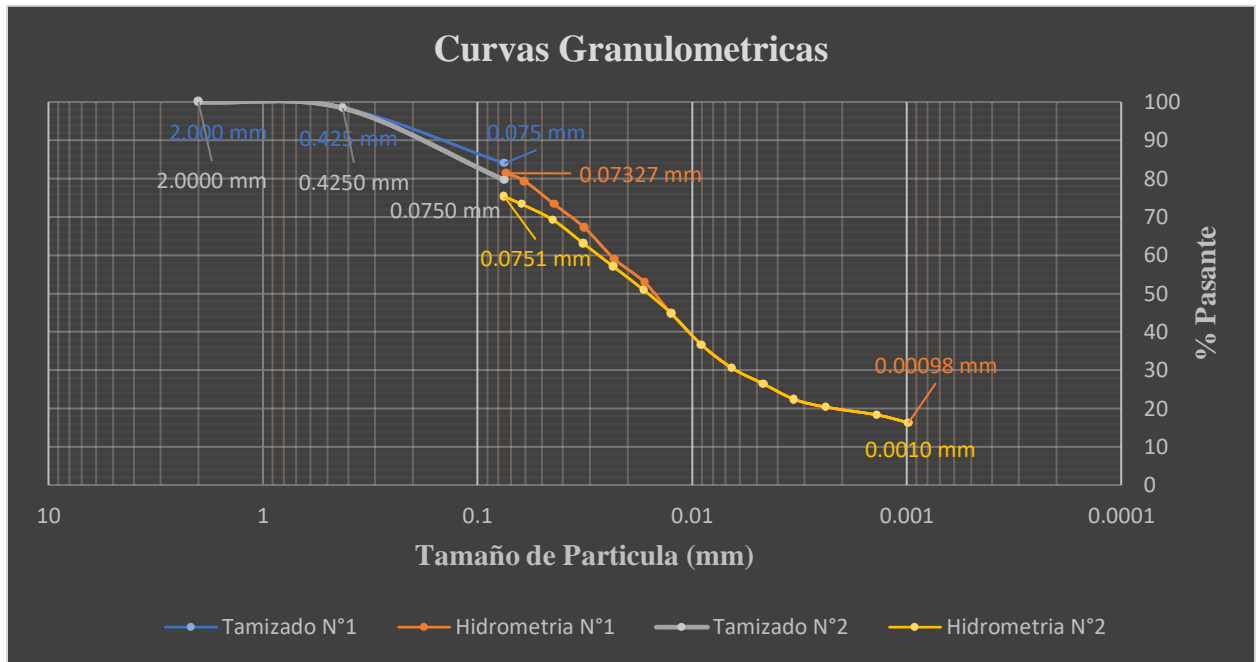
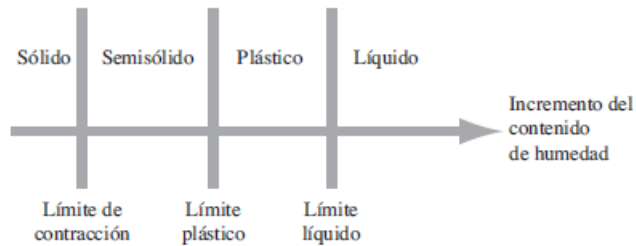


Ilustración 3: Curva Granulométrica Fuente: Elaboración Propia

## 5. LIMITES DE ATTERBERG

Los límites de Atterberg son una fuente de información valiosa sobre la plasticidad y capacidad de retención de agua de un suelo. En 1900, el científico sueco Albert Mauritz Atterberg desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino en diferentes niveles de humedad. Dependiendo del contenido de humedad, el suelo puede comportarse como sólido, semisólido, plástico o líquido. Los límites se utilizan para clasificar los suelos. La ilustración 4 muestra los distintos estados que puede presentar los suelos.



*Ilustración 4: Límites de Atterberg. Fuente: Das, 2015*

## **5.1.LIMITE LIQUIDO (LL)**

El límite líquido corresponde al porcentaje de humedad en el cual el suelo pasa de un estado semisólido a un estado líquido. Se determina mediante el ensayo de Casagrande el cual consiste llenar la copa con una capa de suelo preparada y realizar una ranura que la divide en dos partes, el límite líquido se determina cuando la ranura cierra a un número determinado de golpes. (Das, 2015)

El límite líquido se determina mediante la normativa ASTM D4318-17e1, existe dos metodologías, método unipunto y multipunto. Para determinación del LL se optó por el método multipunto, el cual consiste en obtener el porcentaje de humedad en rangos de 15-25 golpes, 20-30 golpes, 25-35 golpes. Para el cálculo del límite líquido se traza una gráfica semilogarítmica en donde las ordenadas será el porcentaje de humedad y las abscisas el número de golpes, para determinar el LL se traza una recta que pase por los 3 puntos o más tomados, adicionalmente se traza una recta perpendicular al eje de las abscisas en los 25 golpes, donde ambas rectas intersequen se traza una horizontal que cortará con el eje de coordenadas dando como resultado el LL (ASTM, 2018). Para la realización del límite líquido se realizaron 3 muestras con las cuales se determinó que la

media del límite líquido (no seco) del suelo es igual a 51, mientras que la media del límite líquido (seco) es igual a 33.

## **5.2.LIMITE PLASTICO (LP)**

El límite plástico corresponde al porcentaje de humedad en el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido (Das, 2015).

Para la determinación del límite plástico se aplicará la normativa ASTM D4318 utilizando el método de enrollamiento manual, el cual consiste en enrollar una masa de suelo sobre un vidrio formando un hilo de aproximadamente 3 mm de diámetro, hasta que el mismo se quiebre.

Se realizó el ensayo con 3 muestras, con lo cual se determinó que el límite plástico del suelo es igual a 39.

## **5.3.INDICE DE PLASTICIDAD (PI)**

El índice de plasticidad se define como la diferencia entre el límite líquido del suelo y el límite plástico (Das, 2015). Este representa la capacidad de deformación del suelo.

Donde:

$$PI = LL - PL$$

$$LL = \text{Limite Plastico}$$

$$LP = \text{Limite Plastico}$$

Por lo tanto, el índice de plasticidad del suelo obtenida es igual a:

$$PI = 51 - 39 = 12$$

## **6. GRAVEDAD ESPECIFICA (Gs)**

El Gs es la relación entre la masa de un volumen unitario de los sólidos del suelo y la masa del mismo volumen de agua destilada libre de gas a 20°C, se conoce como densidad aparente del suelo (ASTM, 2020b).

La gravedad específica del suelo se determina mediante la normativa ASTM D854-14, donde se establece dos maneras de determinar el Gs; para el cálculo utilizamos el Método A con tres muestras, ya que es el método preferido para suelos orgánicos el cual dio como resultado una media de Gs igual a 2.48.

## **7. CONTENIDO ORGANICO**

Mediante características visuales se determina la posible presencia de material orgánico en el suelo, ya que posee un color negro y olor característico de un suelo orgánico. Para corroborar la presencia de contenido orgánico se realizó el ensayo de contenido orgánico en base a la normativa ASTM D2974-13 (Standard test methods for Moisture and Organic Matter of Peat and other organic soils).

Dicho ensayo se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica, como de ceniza en el suelo (ASTM, 2020a). Los resultados promedios obtenidos de la realización de 6 muestras de ensayo se muestran en la tabla 2.

El % de Ceniza y el % de contenido orgánico se calculó con las siguientes ecuaciones:

$$\%Ceniza (D) = (C * 100)/B$$

$$\% Material Organico = 100 - D$$

Donde:

- C: Masa del suelo seco quemado (gr).
- B: Masa del suelo seco (gr).

Tabla 2: Tabla de Resultados de contenido orgánico. Fuente: Elaboración Propia

Resultados - ASTM D2974-13	
% Ceniza	94.899
% Contenido Organico	5.101

## 8. CLASIFICACION SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS) fue originalmente propuesto por Casagrande en 1948, y en 1952 fue revisado por U.S. Bureau of Reclamation. La SUCS clasifica los suelos en dos categorías, suelos de grano grueso y arena con menos del 50% de pesante por el tamiz núm. 200, y suelos de grano fino donde el 50% o más pasa el tamiz núm. 200. La clasificación se realiza mediante la normativa ASTM D2487-17e1. (Das, 2015)

La SUCS permite clasificar suelos minerales y suelos minerales con contenido orgánico, la clasificación parte de las características granulométricas, límite líquido y el índice de plasticidad (ASTM, 2020).

Una vez obtenidos los datos granulométricos, los límites de Atterberg y evaluado el contenido orgánico de la muestra de suelo, se procede a clasificar el suelo según el Sistema de Clasificación Unificado de Suelos y la normativa ASTM D2487-17e1.

Clasificamos el suelo utilizando la Ilustración 5 mostrada a continuación:

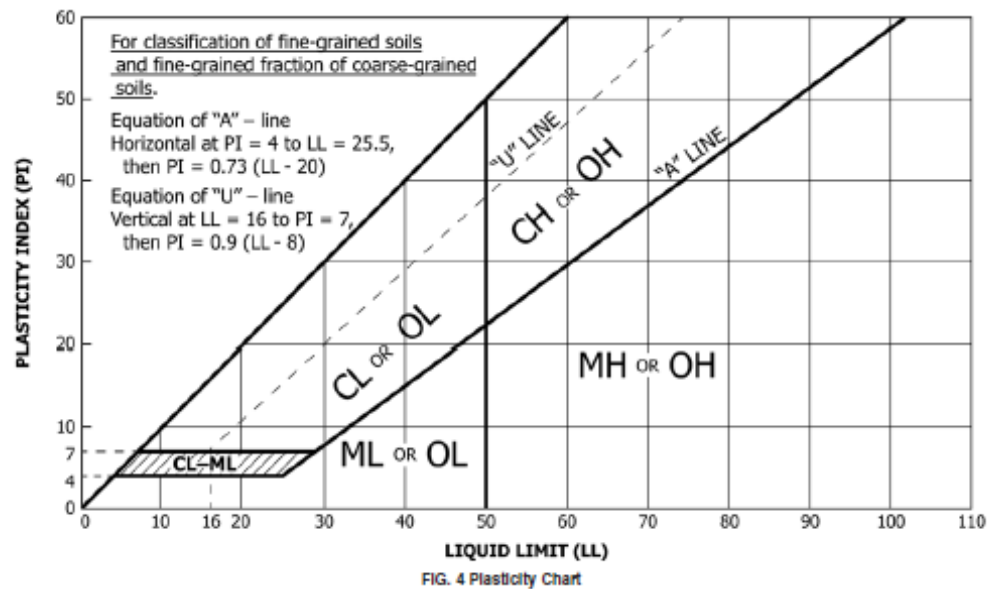


Ilustración 5: Cuadro de Plasticidad Fuente: ASTM, 2020

Sin embargo, la clasificación anterior es preliminar, ya que no especifica de manera exacta el tipo de suelo, para una clasificación más certera se utiliza la Ilustración 6 mostradas a continuación:

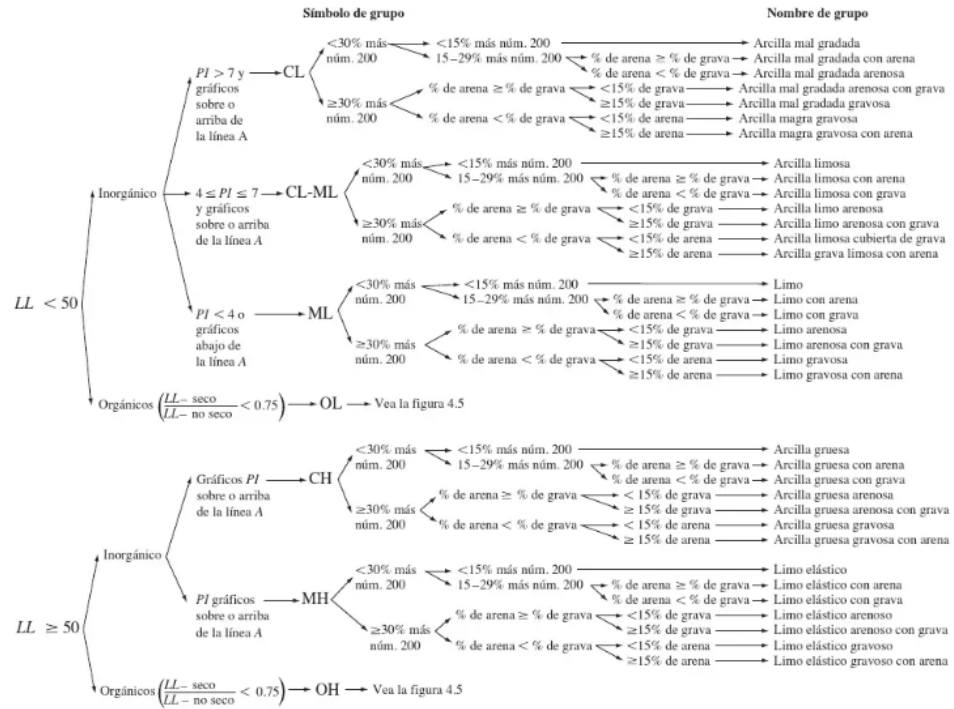


Figura 4.4 Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limo inorgánico y suelos arcillosos (Reproducido con permiso del Libro Anual de Normas ASTM, 2010, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428)

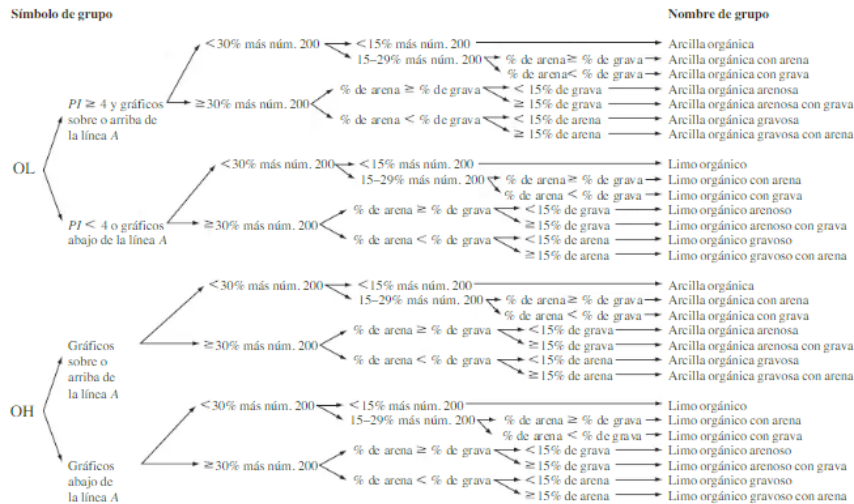


Figura 4.5 Diagrama de flujo de nombres de los grupos para limoso orgánico y suelos arcillosos (Reproducido con permiso del Libro Anual de Normas ASTM, 2010, copyright ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428)

Ilustración 6: Diagrama de Flujo para Clasificación de Suelos Finos. Fuente: (Das, 2015)

Utilizando la Ilustración 5 y 6, junto con la granulometría, límite líquido (seco) y límite líquido (no seco). El suelo estudiado se clasifica como un suelo OH - limo orgánico arenoso.

### CAPITULO 3: FIBRA DE ABACA

En este capítulo se proporcionará una descripción detallada de la fibra de abacá; que incluye su proceso de obtención, su situación actual en el Ecuador, así como sus características y propiedades, físicas, químicas y mecánicas. Además, se realizará una descripción de la fibra utilizada en la realización de la investigación, mediante ensayos de laboratorio.



*Ilustración 7: Ubicación de la parroquia Monterrey. Fuente: Google Maps*

La fibra utilizada para los ensayos se obtuvo específicamente de la parroquia Monterrey, ubicada en el cantón la Concordia en la provincia de Santo Domingo, Ecuador, coordenadas  $0^{\circ}02'45.3''S$   $79^{\circ}31'24.9''W$ . La región se caracteriza por sus condiciones climáticas que favorecen el cultivo de la planta. La economía de Monterrey se basa en el cultivo y producción de abacá, la cual es exportada a varios países de Norteamérica, Europa y Asia (Diario La Hora, 2021). El país cuenta con las condiciones climáticas adecuadas para el cultivo de esta planta, lo que ha impulsado el cultivo y exportación de su fibra como una alternativa sostenible y rentable.

## 1. DESCRIPCIÓN

La fibra de abacá, conocida por su nombre científico “*Musa textilis*” o también llamada cáñamo de Manila, es un material vegetal fibroso de hoja obtenido de la planta de abacá, la cual se cultiva en regiones tropicales, como las Filipinas y el Ecuador. Es una fibra reconocida por su resistencia, durabilidad y versatilidad, lo que la convierte en un recurso valioso en la industria textil y automotriz (FAO, 2023).



*Ilustración 8: Principales productores de abacá. Fuente: FAO, 2023*

La fibra de abacá se cultiva en zonas donde se tenga un clima tropical-húmedo, con temperaturas entre los 22 a 28 grados centígrados. También la zona debe poseer precipitaciones entre 1800 a 2500 mm/año y una altitud menor a 600 m.s.n.m. En el valle de Santo Domingo en Ecuador, se cumplen plenamente estas condiciones (Salas, 2009).

## 2. PROCESO DE OBTENCION

El proceso de obtención de la fibra de abacá consta de varios pasos, los cuales involucran la extracción y tratamiento de las fibras presentes en la hoja de la planta. En base a (Terranova Papers, n.d.) el tratamiento de la fibra de abacá consta de 6 pasos: la

cosecha, la cual consiste en la identificación de tallos maduros de la planta. El siguiente paso es el “Tuxyng” el cual consiste en la separación de la corteza del tronco, el cual se realiza de manera manual para acceder a las fibras internas a utilizar. Después se procede al desfibrado. Este paso implica separar las fibras individualmente. Esto se logra mediante proceso manual o mecánico. Una vez desfibrado, se somete a un proceso de secado para eliminar la humedad presente en la fibra para mejorar su manejabilidad y posterior clasificación. Por último, se prensan para facilitar su almacenamiento y transporte. Es importante destacar que la descripción es un proceso general y podría variar ligeramente según el uso y equipos en cada contexto.

### **3. PROPIEDADES**

La fibra de abacá destaca por su alta resistencia a la tracción, su baja densidad, su alta capacidad de absorción de humedad y su resistencia a agentes químicos. Esto lo convierte en un material idóneo para diversas aplicaciones, como podría ser el mejoramiento de suelos.

Las principales propiedades físicas para considerar del abacá son la densidad, longitud de fibra, el diámetro, su resistencia a tracción, su elongación y su absorción de humedad (Vijayalakshmi et al., 2014).

Tabla 3: Tabla Comparativa de Propiedades de Fibras Naturales. Fuente: Vijayalakshmi, 2014

Physical properties	Abaca	Hemp	Jute	Sisal	Linon	Cotton
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.5	1.48	1.46	1.33	1.4	1.54
Fibre length	2-4 mtr	1-2 mtr	3-3.5 mtr	1 mtr	Upto 90cm	10-65mm
Fibre diameter	150-260 microns	16-50 microns	60-110 microns	100-300 microns	12-60 microns	11-22 microns
Tensile strength (N/ m <sup>2</sup> )	980	550-900	400-800	600-700	800	400
Elongation	1.1%	1.6%	1.8%	4.3%	2.7-3.5%	3-10%
Moisture regain	5.81%	12%	13.75%	11%	10-12%	8.5%
Young's modulus (GPa)	41	30-60	20-25	17-22	50-70	6-10

En el Ecuador, se producen principalmente dos variedades de abacá, la Bungalanon y la Tangongón, siendo la primera la más común y la segunda en menor proporción (Salas, 2009). Además de la variedad de fibra, también pueden diferenciarse por su grado. El color de la fibra es un indicador importante para determinar el grado de la fibra. La fibra de grado 1 es aquella que posee una tonalidad blanca, y es considerado de mayor calidad.

Por otro lado, la fibra de grado 5, de color oscuro, pertenece a la parte más externa del tallo y se considera de menor calidad. La fibra utilizada en los ensayos para esta investigación es de la variedad Tangongon de grado 1. Las propiedades físicas y químicas de la fibra de abacá fueron tomadas de los trabajos previos principalmente del trabajo de Alcívar & Escobar. Los cuales fueron realizados en el centro textil de la EPN, con una variedad de fibra obtenida del mismo sector (Monterrey) y de la misma variedad de fibra de abacá, siendo ambas Tangongon de grado 1. Es importante destacar la importancia de actualizar los estudios de las propiedades de la fibra, sin embargo, dichos datos no serán utilizados directamente en la realización de ninguno de los ensayos a realizarse en el contexto de los objetivos de esta investigación.

## **DIMENSIONES**

La fibra de abacá se caracteriza por tener un diámetro uniforme que generalmente varía entre 0.2 y 1.1 mm. Además, presenta una longitud aproximada de 2 a 4 metros. Estas dimensiones son generales por lo cual puede haber variaciones dependiendo de la variedad de esta, las condiciones de cultivo y sus características específicas. En el caso de nuestra investigación se utilizó fragmentos de fibra cortada de 1.5 mm, y con un promedio de 0.5 mm de diámetro.

## **DENSIDAD**

La fibra de abacá se caracteriza por tener una baja densidad debido a su estructura celular hueca. Tiene una densidad promedio de  $1.5 \text{ g/cm}^3$  (Vijayalakshmi et al., 2014). Según la norma ASTM D1577 la densidad lineal de la fibra es también llamada título de hilos, la cual consiste en unidad de masa por unidad de longitud (tex) la cual se obtiene con segmentos de fibra de aproximadamente 50 cm (ASTM, 2015b).

La densidad lineal promedio es de  $40.85 \pm 7.41 \text{ tex}$  resultado del ensayo de 30 segmentos de fibra de 50cm (Alcívar & Escobar, 2019).

## **HUMEDAD**

Es importante la determinación del contenido de humedad, ya que la humedad es capaz de producir deterioro en la fibra haciendo que se pudra. Al no existir una normativa

específica para la determinación del porcentaje de humedad de la fibra, se determinó el porcentaje de humedad mediante un ensayo de gravimetría. El cual consiste en determinar la cantidad de una sustancia en base a su cambio de masa.

Por lo tanto, se realizó un ensayo, con una muestra de aproximadamente 6 gramos la cual fue secada al horno donde se registró un cambio de masa. Se determinó un porcentaje de humedad de 11.1%. En este parámetro existe una diferencia con las propiedades referenciadas y realizadas por un laboratorio, teniendo la fibra de Alcivar & Escobar un porcentaje de humedad de 6%.

### **RESISTENCIA A LA TENSIÓN**

La resistencia a la tracción de la fibra es una propiedad fundamental que se refiere a la máxima tensión que puede soportar antes de romperse. Para la determinación de este parámetro se utiliza la norma ASTM D3822, el cuál mide la tensión de la fibra en función de su densidad. Los ensayos referenciados (Alcívar & Escobar, 2019), obtuvieron los siguientes resultados: una tenacidad promedio de  $25.54 \pm 8.15$  cN/tex de tenacidad y una carga de rotura promedio de  $21.4 \pm 4.7$  N.

### **ELONGACION A LA ROTURA**

La elongación a la rotura es una medida en porcentaje de la capacidad de deformación de una fibra antes de romperse bajo tensión. Para la realización de este ensayo se utiliza la normativa ASTM D3822. De los resultados referenciados (Alcívar & Escobar,

2019) se obtuvo un porcentaje de elongación promedio de  $1.74 \pm 0.16$  % en un tiempo promedio de 20.09 s.

## **MODULO DE ELASTICIDAD**

El módulo de elasticidad, también conocido como módulo de Young es una medida de rigidez del material. Representa la capacidad de un material para resistir deformaciones elásticas bajo la aplicación de una fuerza. La fibra de abacá tiene un módulo de elasticidad promedio de 41 GPa (Vijayalakshmi et al., 2014).

Según la referencia proporcionada (Alcívar & Escobar, 2019) se obtuvo un valor promedio del módulo elástico de la fibra de abacá de 37.3 GPa. Dicho valor es consistente con los valores proporcionados por la bibliografía.

## **COMPOSICION QUIMICA**

Las fibras vegetales se componen principalmente por celulosa, lignina y pectina. Según (Guerrón, 2005) la composición de la fibra de abacá se encuentra de la siguiente manera: 63.2% celulosa, 19.6% hemicelulosa, 5.1% lignina, 0.5% pectina, 1.4% extracto aceroso y 0.2% grasa y cera.

Según la referencia (Alcívar & Escobar, 2019) la fibra fue sometida a ensayos químicos para determinar la composición de la fibra y sus porcentajes. La cual arrojó datos promedios de: Celulosa 63.35%, Hemicelulosa 18.3%, Lignina 6.3%, Grasas 0.76% y Ceniza 1.24%.

#### 4. RESUMEN DE LA FIBRA UTILIZADA

En base a la referencia (Alcívar & Escobar, 2019) de las propiedades mecánicas y químicas se obtuvieron los siguientes resultados:

*Tabla 4: Resumen de Propiedades de la Fibra. Fuente: Alcívar & Escobar, 2019*

<b>Propiedades Mecánicas de la Fibra</b>	
Densidad lineal (tex)	40,9
Contenido de humedad (%)	6,11
Tenacidad (Cn/tex)	52,5
Carga de Rotura (N)	21,4
Elongación en la rotura (%)	1,74
<b>Propiedades Químicas de la fibra</b>	
Celulosa (%)	63,35
Hemicelulosa (%)	18,30
Lignina (%)	6,30
Cenizas (%)	1,24
Grasas (%)	0,76

## **CAPITULO 4: MEJORAMIENTO DE SUELOS CON FIBRA DE ABACA**

### **1. INTRODUCCION**

El mejoramiento de suelos o también conocido como estabilización del suelo, es un proceso mediante el cual se altera las propiedades del suelo in situ, el mejoramiento tiene como propósito incrementar la estabilidad, la capacidad de carga y minimizar los asentamientos que se puedan producir. Agregar fibras vegetales para mejorar el suelo es una técnica antigua, sin embargo, su estudio se limita a las 3 últimas décadas. El mejoramiento de suelo se realiza con fibras estabilizadas químicamente; múltiples variables de la fibra intervienen en la eficiencia del mejoramiento que tendrá el suelo, como es el tipo de fibra, longitud, forma, relación longitud-diámetro, y rugosidad (Vettorelo & Clariá, 2014).

### **2. FIBRAS NATURALES**

El uso de fibras naturales es una técnica ecológicamente amigable y de bajo costo. Sin embargo, las fibras son biodegradables y presentan una baja resistencia a la corrosión. Para abordar ese problema, varios investigadores han propuesto un recubrimiento con materiales sintéticos. Este enfoque ha demostrado ser eficiente en comparación con las fibras sin recubrimiento. (Vettorelo & Clariá, 2014). Debido a esto, en la presente investigación se optó por un tratamiento con hidróxido de sodio.

### **3. INTERACCION SUELO-FIBRA**

A microescala, en la matriz del suelo, las fibras se encuentran sometidas a esfuerzo de tracción como consecuencia del movimiento entre partículas, y a un esfuerzo de compresión debido a los granos del suelo. La interacción empieza al momento que el suelo se ha reacomodado de forma que se genere un anclaje. Mientras el suelo incrementa su deformación la fibra contribuye más a la resistencia del suelo. (Vettorelo & Clariá, 2014)

### **4. ESTABILIZACION QUIMICA DE LA FIBRA DE ABACA**

La estabilización química provoca una mejor compatibilidad entre la fibra natural y el suelo, en nuestro caso el tratamiento comprende un proceso alcalino. El tratamiento llega a eliminar una cantidad de lignina, cera y aceites que cubren la superficie de la fibra. Además, despolimeriza la celulosa, lo cual aumenta la capacidad de absorción de agua de la fibra. (Guru et al., 2011).

Para el proceso el abacá se sumergirá en una solución de hidróxido de sodio al 2.0%, esta concentración ha dado como resultado un incremento en la resistencia a la tracción de la fibra y el módulo de elasticidad en referencia a (Guru et al., 2011), la fibra estará sometida a esta concentración durante un periodo de 3 horas, para posteriormente lavarlo con abundante agua destilada y colocar en el horno a 100°C durante un periodo de 20 horas, la temperatura seleccionada remueve la humedad existente sin afectar la integridad de la fibra (Castro et al., 2007).



*Ilustración 9: izq.) Fibra tratada 2% NaOH. der.) Fibra sin tratar. Fuente: Elaboración Propia*

## **5. SELECCIÓN DE CONTENIDO DE FIBRA Y LONGITUD DE FIBRA**

Para los propósitos de nuestra investigación, es fundamental determinar el contenido de fibra y la longitud de esta a utilizar en los ensayos. Estos parámetros serán seleccionados con base en publicaciones previas y estudios relevantes en el campo.

Según (Vettorelo & Claria, 2014) publicaciones existentes utiliza un porcentaje de fibra entre el 0.25% y el 3% respecto al peso del suelo seco. Mas allá de este límite, el aumento de la resistencia del suelo debido al refuerzo de fibras es prácticamente nulo. Mientras que las longitudes de fibra más comunes se encuentran entre los 10 mm y los 60 mm.

Basándonos en el estudio realizado por (Alcívar & Escobar, 2019), donde se determinó que el porcentaje óptimo de fibra de abacá es cercano al 2% y la longitud de fibra óptima es de 15 mm, se utilizarán estos valores como referencia para la elaboración de nuestros ensayos.

La elección de porcentajes de fibra de abacá tratada con NaOH será de 1% y 2%. Estos porcentajes son intermedios respecto a la bibliografía consultada lo cual nos permitirá evaluar el efecto de la fibra en el suelo.

En relación con la longitud de fibra, a medida que aumenta la longitud de fibra se obtiene una mejora en las propiedades del suelo. Debido a las limitaciones en la elaboración de las probetas remoldeadas, debido al tamaño del molde y su trabajabilidad hemos seleccionado una longitud única de fibra de 15mm, que se considera adecuada y factible en la construcción de las muestras para nuestros ensayos.

De esta manera, al utilizar porcentajes de fibra de 1% y 2%, así como una longitud de fibra de 15mm, podremos evaluar y comparar los efectos de la fibra tratada con NaOH con el suelo en estado natural y también la muestra sin fibra. Esto nos permitirá obtener conclusiones más sólidas y comprender mejor el comportamiento del suelo mejorado con fibra de abacá en el contexto específico de investigación.

## **CAPITULO 5: OBTENCION DE LA CURVA DE COMPACTACION**

### **1. INTRODUCCION**

La curva de compactación es una representación gráfica que relaciona la densidad seca de un suelo y su contenido de humedad en un proceso de compactación bajo una energía controlada. El eje horizontal representa el contenido de humedad en porcentaje respecto al peso seco del suelo, mientras que el eje vertical representa la densidad seca del suelo. Este ensayo es de gran importancia para determinar el contenido de humedad óptimo y la máxima densidad seca del suelo.

La obtención de la curva de compactación requiere la realización de ensayos específicos de compactación utilizando distintos porcentajes de humedad. Durante el ensayo se preparan muestras de suelo con distintas humedades. Cada muestra se compacta utilizando una energía de compactación controlada. Una vez compactadas se determina la densidad del suelo seco junto con su humedad correspondiente y con ello construimos la gráfica densidad seca vs contenido de humedad. A medida que se incrementa el contenido de humedad, la densidad seca también aumenta. Sin embargo, a partir de un punto concreto el aumento de contenido de humedad disminuye la densidad seca.

El punto máximo de densidad seca es el punto óptimo de compactación. Este punto representa el contenido de humedad en el cual se logra la máxima densidad seca del suelo. Seleccionar este punto es crucial para obtener una muestra remoldeada con las mejores propiedades mecánicas para su posterior ensayo.

## 2. PROCTOR MODIFICADO

Al desarrollarse rodillos más pesados y su uso in situ, el ensayo de Proctor estándar fue modificado para obtener una mejor aproximación de las condiciones del suelo en campo (Das, 2015). Para la realización del ensayo se utilizó la normativa ASTM D1557-12 (Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort).

El ensayo de compactación nos permite establecer la relación entre el porcentaje de humedad y la densidad seca del suelo. A partir de los resultados obtenidos, se traza la curva de compactación para determinar el porcentaje de humedad óptimo y la densidad seca máxima del suelo. En nuestro estudio, utilizamos la metodología A según las especificaciones de ASTM. Este método se aplica para material pasante del tamiz de 9.5mm y requiere de un molde metálico de 101.6 mm de diámetro. Durante el ensayo el material es compactado en 5 capas sucesivas, y se preparan un total de 5 muestras con diferentes porcentajes de humedad. El porcentaje tendrá una variación del 2% de una muestra con respecto a otra, con el fin de trazar la curva de compactación, se necesita mínimo dos puntos ascendentes y descendentes. Con ello podremos trazar correctamente la curva de compactación (ASTM, 2015a).

Es importante mencionar que la toma de una muestra desde el molde de un ensayo de compactación Proctor puede ser poco confiable cuando se utiliza un suelo con fibra. La presencia de fibra tiende a adherirse al suelo, lo cual interfiere en el proceso de tallado de

los especímenes y provoca la fragmentación del suelo debido a su adherencia. En ese sentido se utilizó un método alternativo para la determinación de la curva de compactación el cual fue la utilización del aparato Harvard miniatura. Para de esta forma tener resultados congruentes entre las curvas de compactación y las muestras remoldeadas utilizando una misma energía de compactación.



*Ilustración 10: Equipo Proctor Estándar. Fuente: Das, 2015*

### **3. HARVARD MINIATURA**

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el ensayo de compactación de suelos con el equipo Harvard miniatura se emplea para determinar la relación entre el porcentaje de humedad en una muestra de suelo que pasa a través del tamiz N° 4 y su densidad seca correspondiente cuando es compactado utilizando el aparato de compactación.

El procedimiento consiste en colocar una muestra de suelo y compactarla en un molde en cinco capas utilizando un equipo de apisonamiento especial. Se aplica 25 golpes

a cada capa para lograr un esfuerzo de compactación estándar. Con ello establecemos una curva de compactación, donde son necesarios por lo menos cinco muestras de suelo; cada uno con un contenido de humedad diferente.

El equipo especial para este ensayo consiste en una porta moldes con una placa base sólida, un molde de compactación con una capacidad  $1/454 \text{ ft}^3$  con un collar de extensión desmontable y un Tamper de compactación provisto de resortes que pueden pre-ajustarse para una carga de 20 lbf (Ortiz, 2017).



*Ilustración 11: Equipo Harvard Miniatura. Fuente: Geotechpedia*

Este método permite determinar el contenido de humedad óptimo para lograr la máxima densidad seca del suelo con la presencia de fibra de abacá. Posteriormente, se procederá a realizar las muestras remoldeadas en su porcentaje de humedad óptimo, lo cual garantizará una uniformidad en los resultados obtenidos.

Este enfoque asegurara que las muestras remoldeadas no tengan variaciones en términos de densidad y contenido de humedad. De esta manera, se podrán realizar comparaciones confiables entre las muestras de suelo natural y las muestras mejoradas en cuanto a su resistencia a la compresión simple.

#### **4. RESULTADOS**

Para determinar el contenido de humedad óptimo, se realizó el ensayo Proctor modificado siguiendo la norma establecida por la ASTM. Este ensayo se llevó a cabo por triplicado para obtener valores confiables y representativos.

Al realizar el ensayo por triplicado, se obtienen valores de contenido de humedad óptimo y densidad seca para cada muestra de suelo. Estos valores se promedian para así obtener resultados más representativos y reducir la posibilidad de errores experimentales o variaciones aleatorias. Con esto es posible obtener un valor más representativo y confiable. Gracias a ello se puede garantizar uniformidad en los resultados obtenidos y de esta manera tener una base sólida para la determinación de la resistencia a la compresión simple.

## Muestra Sin Fibra

Tabla 5: Muestra Proctor - Sin Fibra. Fuente: Elaboración Propia

Sin Fibra	1	2	3	4	5
Mold+Sh (gr)	5694	5750.66667	5755	5721.66667	5682.66667
%W	28%	32%	32%	36%	40%
D. húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.53594086	1.59200311	1.59629022	1.56331243	1.52472841
D. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.19995379	1.2095864	1.2051636	1.14956136	1.08857145

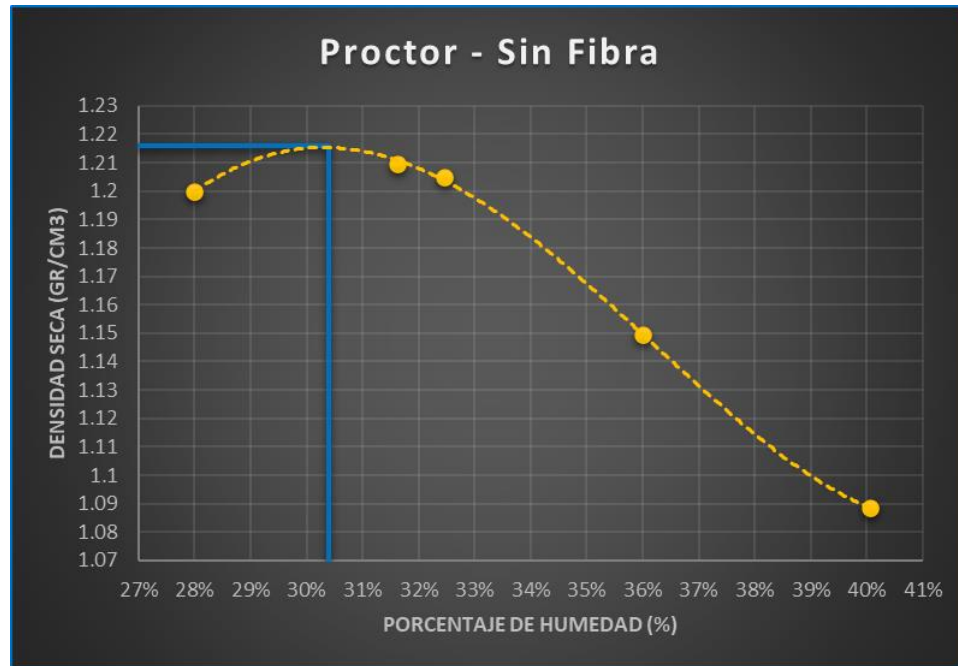


Ilustración 12: Curva de Compactación Proctor-Sin fibra. Fuente: Elaboración Propia

Tras la realización del ensayo Proctor modificado utilizando el Método A para el suelo sin la adición de fibra, se obtuvo un contenido de humedad óptimo de 30.4%. Este valor representa el porcentaje de humedad en el suelo remoldeado para obtener la máxima densidad seca durante la compactación.

La densidad máxima seca obtenida en el ensayo fue de 1.216 gr/cm<sup>3</sup>. Esta medida representa la máxima densidad alcanzada por la muestra de suelo compactada bajo las condiciones de energía de compactación y contenido de humedad establecidos.

Se realizó la curva de compactación de la muestra de suelo sin fibra mediante el ensayo Proctor, posterior a ello se realizó la misma curva utilizando el ensayo Harvard miniatura, para así comparar ambos métodos. Este método fue seleccionado debido a su idoneidad para la preparación de las muestras remoldeadas que serán utilizadas en los ensayos posteriores.

Tabla 6: Muestra Harvard - Sin fibra. Fuente: Elaboración Propia

Sin Fibra	1	2	3	4	5
Mold+Sh (gr)	224.22	229.32	232.6	232.13	229.28
%W	27%	29%	32%	33%	33%
d. húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.59024407	1.67321333	1.72657395	1.71892776	1.67256259
d. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.25167068	1.29790704	1.31170406	1.29491894	1.25603203

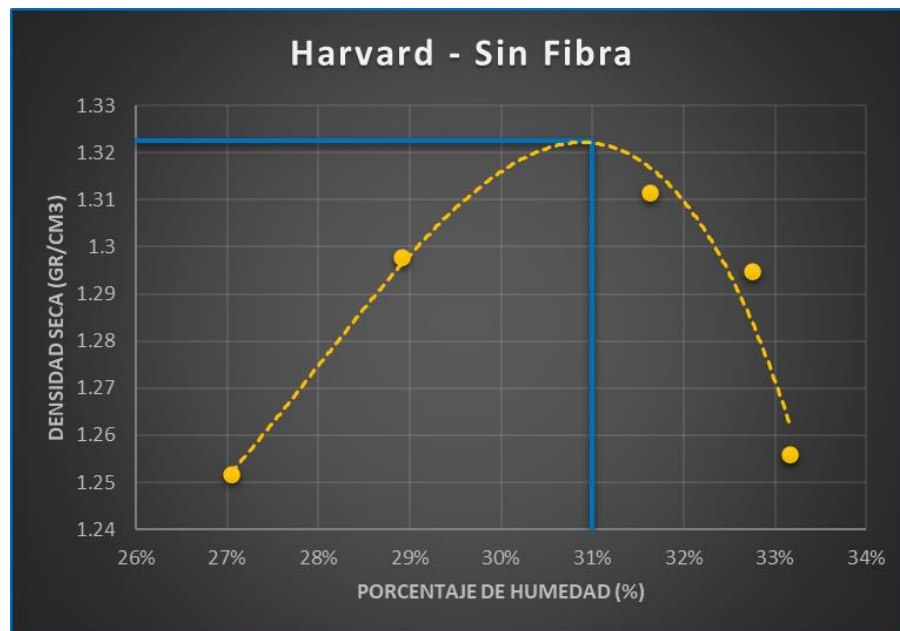


Ilustración 13: Curva de compactación Harvard- sin fibra. Fuente: Elaboración Propia

Al realizar el ensayo Harvard miniatura en una muestra de suelo sin adición de fibra, se determinó que el contenido de humedad óptimo fue de 31%. Mientras que la densidad máxima seca obtenida fue de 1.323 gr/cm<sup>3</sup>.

Comparar los resultados de la curva de compactación obtenida mediante el ensayo Harvard miniatura con los resultados del ensayo Proctor modificado previamente realizado permitirá evaluar las diferencias y similitudes entre ambos métodos de compactación. Los resultados obtenidos deberían dar una idea sobre la idoneidad y confiabilidad del método Harvard miniatura para la preparación de muestras remoldeadas en nuestra investigación.

Basándonos en los resultados obtenidos de las muestras ensayadas, se observa que el contenido de humedad óptimo obtenido mediante el ensayo de compactación con Harvard miniatura es aproximadamente 0.6% mayor que el obtenido con el ensayo Proctor modificado. Es lógico que exista una variación tanto en porcentaje de humedad como en densidad seca, ya que ambos métodos utilizan una energía de compactación distinta. El valor de humedad es significativo ya que modificaría la densidad seca en ensayo Proctor, por lo cual para su aplicación en campo es necesario realizar un análisis comparativo más detallado.

Para propósitos de nuestra investigación se utilizará una misma energía de compactación para determinar la curva, como también en la realización de las muestras remoldeadas. Para esta investigación se realizará las muestras remoldeadas con Harvard miniatura. Por ello se realizará el ensayo de compactación por el mismo método, para así tener congruencia y compatibilidad. Sin embargo, es importante destacar que para su aplicación en campo no es aplicable.

Luego de realizar la curva de compactación utilizando los valores promedios de los ensayos por triplicado, tal como se muestra en la Tabla 6, se obtuvo la Ilustración 13 que representa la curva de compactación para la muestra sin fibra. En dicha ilustración se observa que el porcentaje de humedad óptimo necesario para alcanzar una densidad máxima seca de 1.32 gr/cm<sup>3</sup> es de aproximadamente 31%. Estos resultados serán los utilizados en el desarrollo de la muestra remoldeado para el posterior ensayo de compresión simple.

### Muestra 1% Fibra

Tabla 7: Muestra Harvard-1% fibra. Fuente: Elaboración Propia

Fibra 1%	1	2	3	4	5
Mold+Sh (gr)	227.905	230.72	231.175	230.27	229.915
%W	33%	34%	35%	36%	36%
d. húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.650193424	1.6959892	1.70339136	1.68866838	1.68289307
d. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.242147854	1.26802931	1.26177138	1.24166793	1.23379257

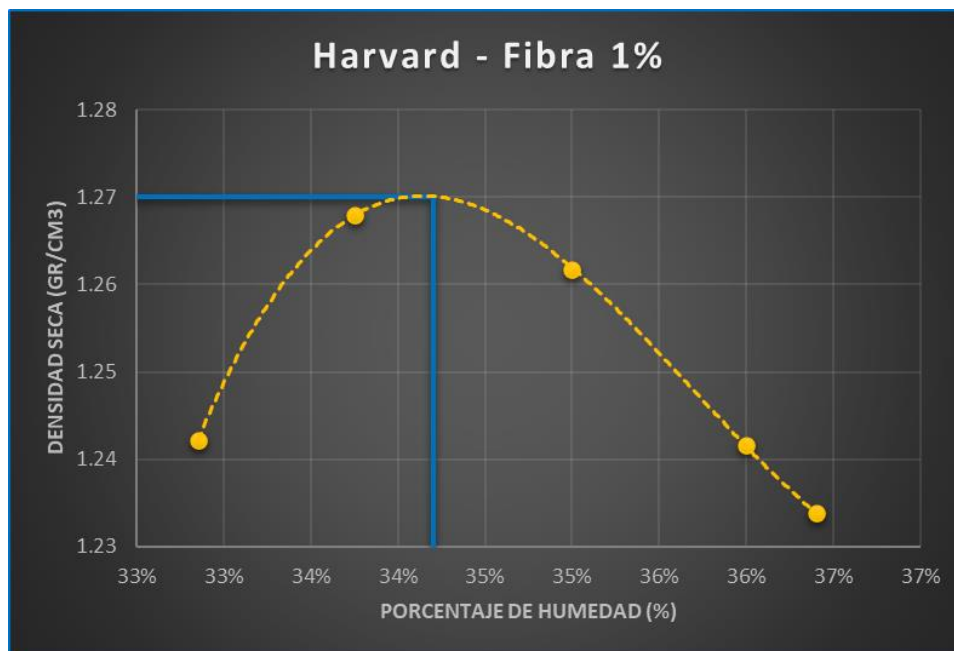


Ilustración 14: Curva de compactación Harvard-1% fibra. Fuente: Elaboración Propia

Luego de realizar la curva de compactación utilizando los valores promedios de los ensayos por triplicado, tal como se muestra en la Tabla 7, se obtuvo la Ilustración 14 que representa la curva de compactación para la muestra con 1% de fibra. En dicha ilustración se observa que el porcentaje de humedad óptimo necesario para alcanzar una densidad máxima seca de 1.27 gr/cm<sup>3</sup> es de aproximadamente 34.4%. Estos resultados serán los utilizados en el desarrollo de la muestra remoldeado para el posterior ensayo de compresión simple.

### Muestra 2% Fibra

Tabla 8: Muestra Harvard-2% fibra. Fuente: Elaboración Propia

Fibra 2%	1	2	3	4	5	6
Mold+Sh (gr)	223.53	225.81	229.995	231.155	230.61	229.475
%W	31%	32%	35%	36%	38%	39%
d. húmeda (gr/cm <sup>3</sup> )	1.579018818	1.61611096	1.68419455	1.70306599	1.69419967	1.67573494
d. seca (gr/cm <sup>3</sup> )	1.201688598	1.22247425	1.24893923	1.25687527	1.22679194	1.20296837

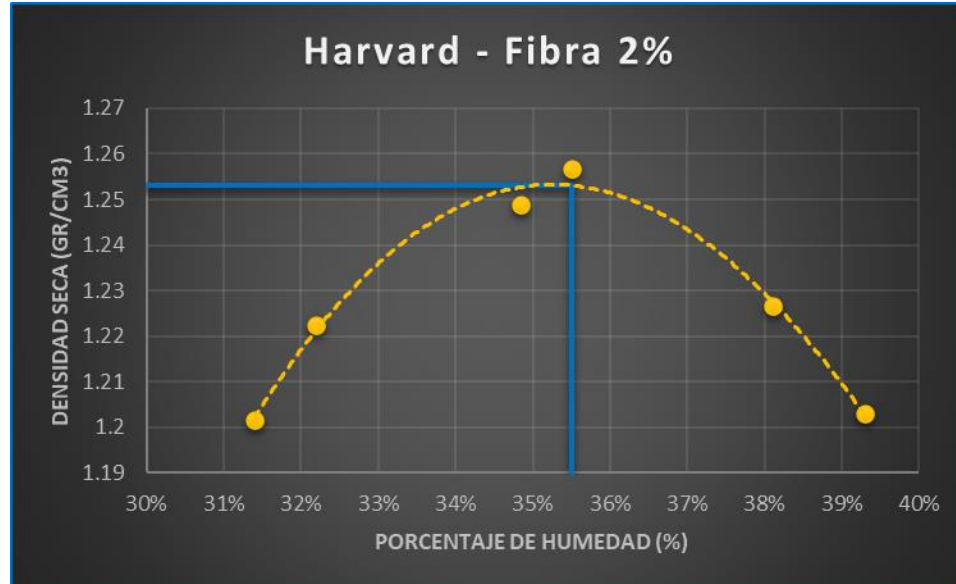


Ilustración 15: Curva de compactación Harvard-2% fibra. Fuente: Elaboración Propia

Luego de realizar la curva de compactación utilizando los valores promedios de los ensayos por triplicado, tal como se muestra en la Tabla 8, se obtuvo la Ilustración 15 que representa la curva de compactación para la muestra con 2% de fibra. En dicha ilustración se observa que el porcentaje de humedad óptimo necesario para alcanzar una densidad máxima seca de 1.25 gr/cm<sup>3</sup> es de aproximadamente 35.5%. Estos resultados serán los utilizados en el desarrollo de la muestra remodelado para el posterior ensayo de compresión simple.

## **CAPITULO 6: COMPRESION SIMPLE**

### **1. INTRODUCCION**

El ensayo de compresión no confinada permite determinar la resistencia a la compresión que se producen en muestras intactas, remodeladas o reconstituidas; aplicando una carga axial. El ensayo se realizará según lo especifica la norma ASTM D2166-16 – (Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil). Los resultados del ensayo proporcionan valores aproximados de la resistencia de los suelos cohesivos en términos de esfuerzos totales. Se aplica a suelos cohesivos que no expulsan agua mientras se aplica la carga axial (ASTM, 2016). Para propósitos de nuestra investigación se realizará el ensayo a las probetas remodeladas sin fibra, como también a las muestras inalteradas obtenidas entre 0.50-1.00 metros de profundidad.

### **2. PREPARACION DE MUESTRAS**

Las muestras serán remodeladas en 5 capas sucesivas con 25 golpes por capa mediante el aparato de compactación Harvard, las dimensiones de las muestras son de aproximadamente  $33 \pm 1$  mm de diámetro y  $70 \pm 3$  mm de altura. (United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, 1984). Con base a los resultados de los ensayos de compactación se realizarán muestras por triplicado de la siguiente manera:

- 3 probetas remodeladas sin fibra con 31% de humedad y densidad máxima seca de 1.32 gr/cm<sup>3</sup>.

- 3 probetas remoldeadas con un 1% de fibra a 34.4% humedad y densidad máxima seca de 1.27 gr/cm<sup>3</sup>.
- 3 probetas remoldeadas con un 2% de fibra a 35.5% de humedad y densidad máxima seca de 1.25 gr/cm<sup>3</sup>.

### 3. RESULTADOS

#### COMPRESION SIMPLE MUESTRAS REMOLDEADAS

Tabla 9: Resultados compresión simple, muestras remoldeadas. Fuente: Elaboración Propia

Media Probetas S/F		Media Probetas C/F 1%		Media Probetas C/F 2%	
$\epsilon$ l	Esfuerzo	$\epsilon$ l	Esfuerzo	$\epsilon$ l	Esfuerzo
0.000	-0.150	0.000	-0.742	0.000	-1.041
0.106	21.988	0.104	9.719	0.105	9.110
0.300	35.522	0.307	18.503	0.296	16.541
0.495	52.132	0.511	26.676	0.488	24.370
0.689	71.205	0.714	35.558	0.680	32.037
0.883	89.325	0.917	45.122	0.871	39.968
1.078	110.455	1.120	55.401	1.063	49.338
1.272	132.255	1.323	66.173	1.255	58.834
1.466	153.525	1.526	78.828	1.446	69.026
1.661	173.384	1.729	91.561	1.638	81.089
1.855	191.832	1.932	105.252	1.829	92.941
2.049	208.456	2.135	119.615	2.021	105.635
2.244	222.074	2.338	135.496	2.213	120.031
2.438	233.743	2.541	152.742	2.404	136.123
2.632	239.977	2.744	168.357	2.596	152.725
2.827	238.337	2.947	186.898	2.788	171.749
3.021	210.372	3.150	201.950	2.979	190.823
3.216	162.758	3.353	213.040	3.171	198.932
		3.556	235.625	3.363	221.484
		3.759	253.567	3.554	238.118
		3.962	268.874	3.746	262.334
		4.165	282.677	3.938	283.040
		4.368	293.154	4.129	304.662
		4.571	298.337	4.321	326.186
		4.775	300.544	4.513	345.502
		4.978	299.101	4.704	366.284
		5.181	294.477	4.896	384.858
		5.384	288.352	5.088	402.077
		5.587	277.004	5.279	418.390
				5.471	431.654
				5.663	442.731
				5.854	451.972
				6.046	456.785
				6.238	461.437
				6.429	463.684
				6.621	465.072
				6.813	464.508
				7.004	462.826
				7.196	460.591
				7.388	458.517
				7.579	456.580

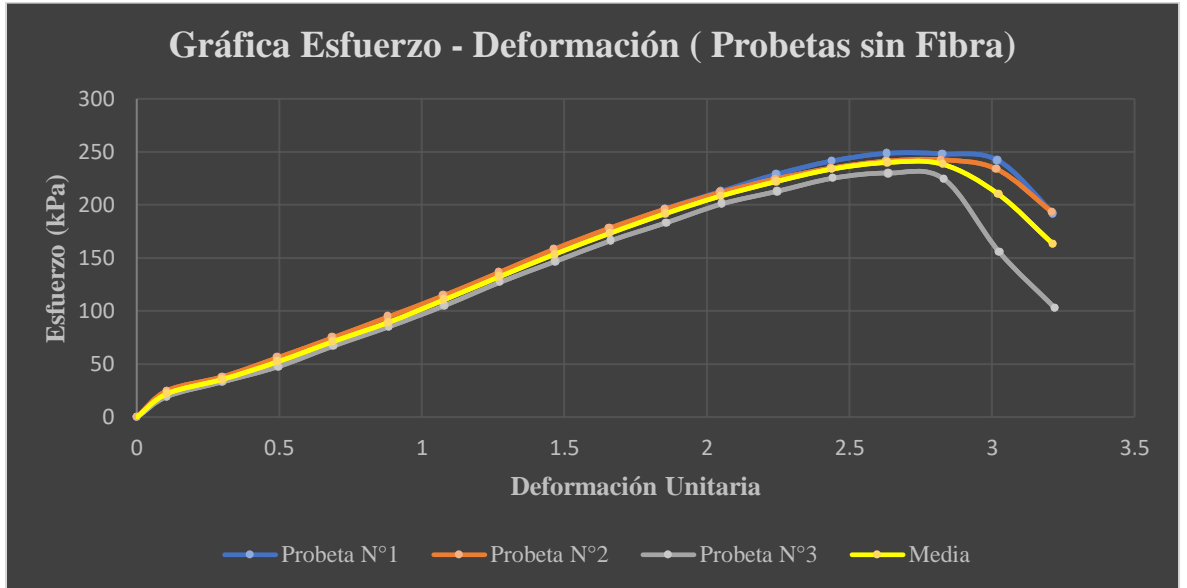


Ilustración 16: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras sin Fibra. Fuente: Elaboración Propia

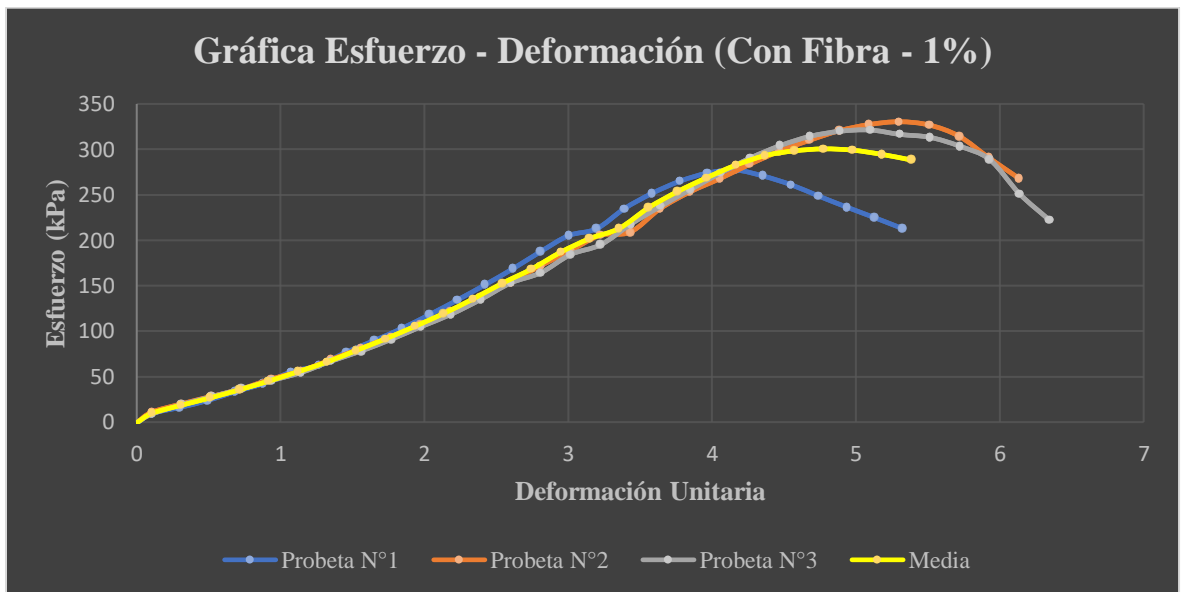


Ilustración 17: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras con Fibra (1%). Fuente: Elaboración Propia

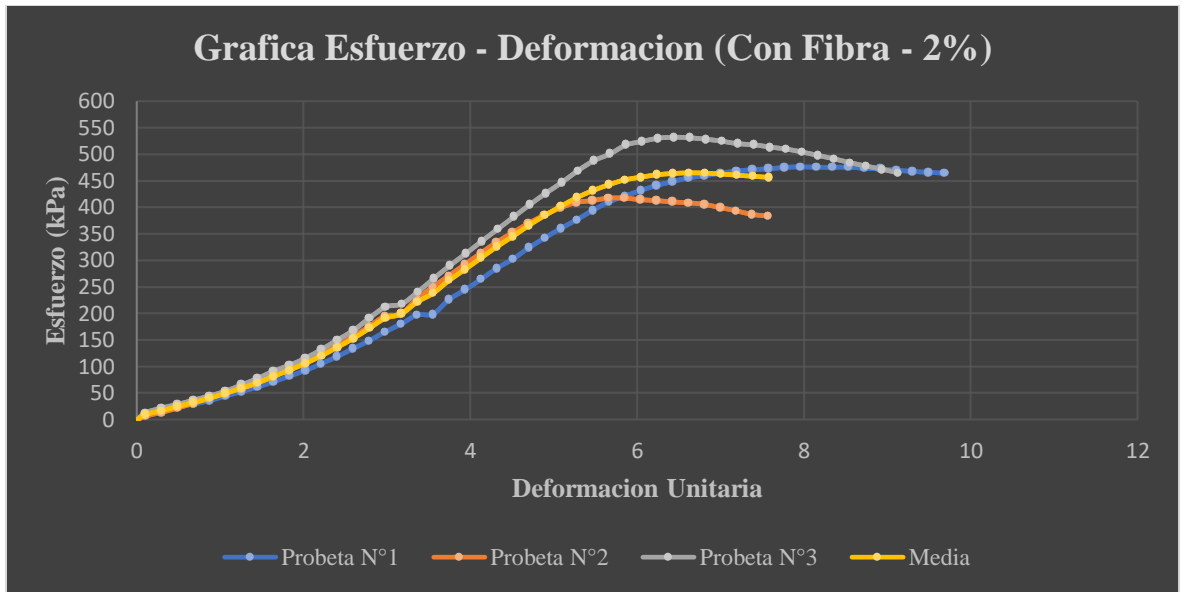


Ilustración 18: Grafica Esfuerzo-Deformación de las distintas muestras con Fibra (2%). Fuente: Elaboración Propia

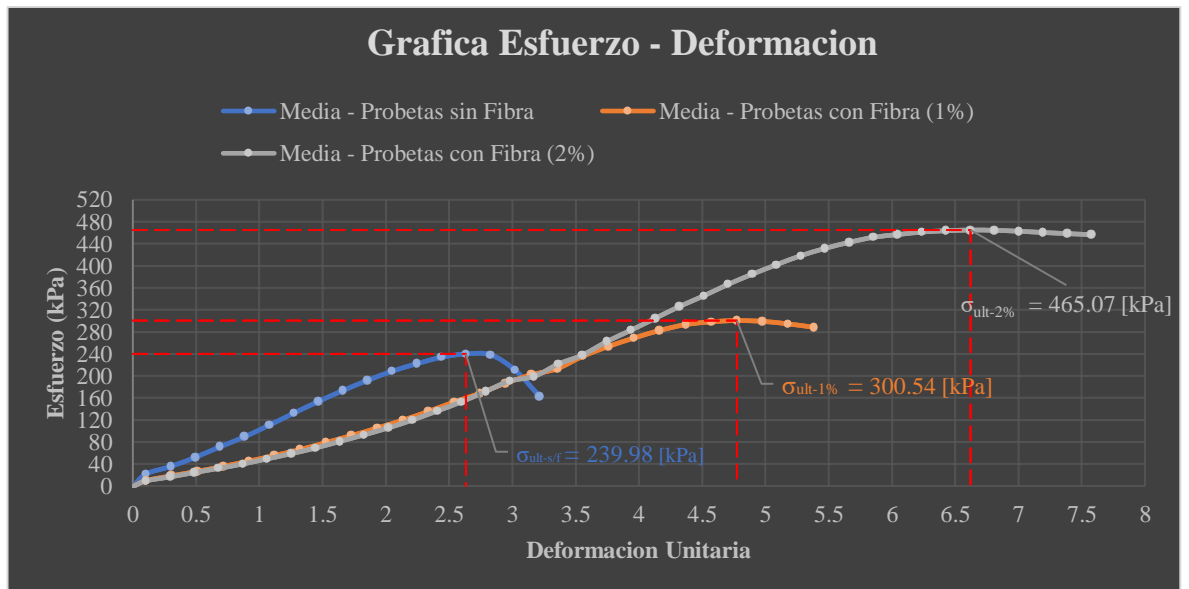


Ilustración 19: Graficas Esfuerzo-Deformación (Media) de las distintas muestras. Fuente: Elaboración Propia

## ESFUERZO ÚLTIMO PROMEDIO DE LAS PROBETAS REMOLDEADAS CON Y SIN FIBRA

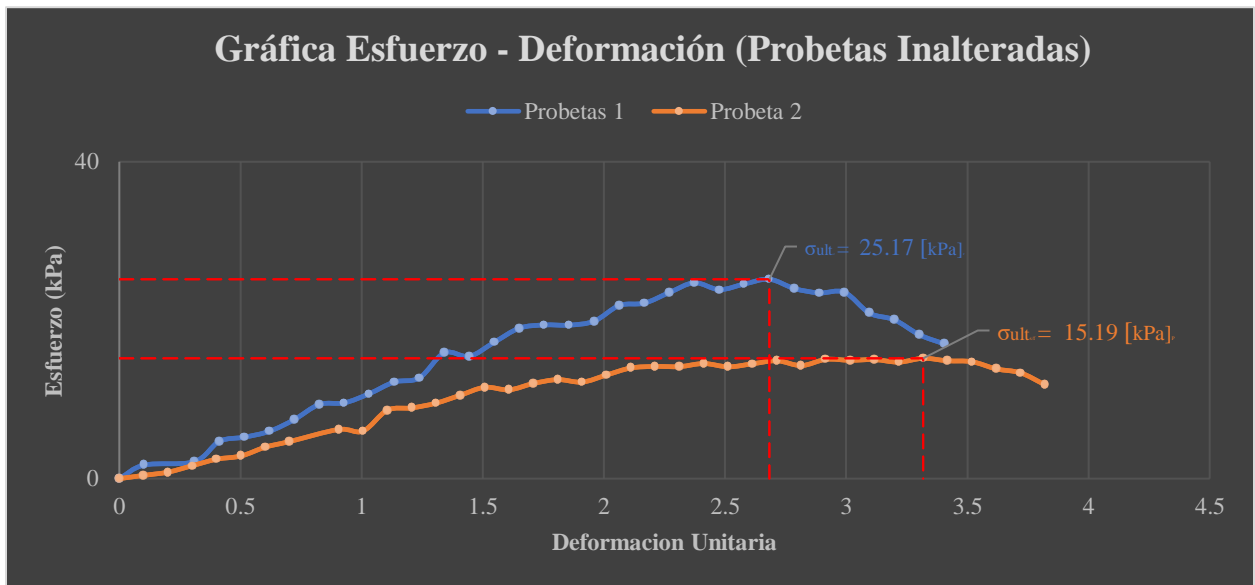
*Tabla 10: Media de esfuerzos últimos de las muestras remodeladas. Fuente: Elaboración Propia*

	$\epsilon$ 1	Esfuerzo Ultimo [kPa]
<b>Media Probetas S/F</b>	2.632	239.977
<b>Media Probetas C/F 1%</b>	4.775	300.544
<b>Media Probetas C/F 2%</b>	6.621	465.072

## COMPRESION SIMPLE MUESTRAS INALTERADAS

*Tabla 11: Resultados compresión simple, muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia*

Probeta 1		Probeta 2	
$\epsilon$ 1	Esfuerzo [kPa]	$\epsilon$ 1	Esfuerzo [kPa]
0.000	0.000	0.000	0.000
0.103	1.715	0.101	0.410
0.310	2.139	0.201	0.820
0.413	4.702	0.302	1.638
0.516	5.231	0.402	2.454
0.619	5.972	0.503	2.860
0.722	7.457	0.603	3.980
0.826	9.365	0.704	4.690
0.929	9.568	0.905	6.206
1.032	10.726	1.005	5.997
1.135	12.200	1.106	8.631
1.238	12.717	1.206	8.926
1.341	15.880	1.307	9.525
1.445	15.440	1.408	10.528
1.548	17.220	1.508	11.528
1.651	18.996	1.609	11.213
1.754	19.398	1.709	12.009
1.857	19.378	1.810	12.501
1.961	19.883	1.910	12.186
2.064	21.859	2.011	13.079
2.167	22.151	2.111	13.970
2.270	23.491	2.212	14.157
2.373	24.723	2.312	14.142
2.477	23.860	2.413	14.528
2.580	24.566	2.513	14.113
2.683	25.167	2.614	14.498
2.786	23.993	2.715	14.883
2.889	23.446	2.815	14.269
2.992	23.525	2.916	15.051
3.096	20.901	3.016	14.936
3.199	20.048	3.117	15.020
3.302	18.158	3.217	14.707
3.405	16.999	3.318	15.188
		3.418	14.874
		3.519	14.760
		3.619	13.854
		3.720	13.345



*Ilustración 20: Esfuerzo-deformación muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia*

## ESFUERZO ÚLTIMO PROMEDIO DE LAS MUESTRAS INALTERADAS

*Tabla 12: Media de esfuerzos últimos, muestras inalteradas. Fuente: Elaboración Propia*

Probeta 1		Probeta 2	
$\epsilon 1$	Esfuerzo Ultimo [kPa]	$\epsilon 1$	Esfuerzo Ultimo [kPa]
3.643	25.167	3.318	15.188

## CAPITULO 7: ANALISIS DE RESULTADOS

Tabla 13: Modulo de elasticidad, cohesión y porcentaje de mejora de la deformación unitaria y esfuerzo último de las muestras inalteradas y remoldeadas con y sin fibra. Fuente: Elaboración Propia

Muestra	Probeta Inalterada N°1	Probeta Inalterada N°2	Probetas R. sin Fibra (Media)	Probetas R. con 1% de Fibra (Media)	Probetas R. con 2% de Fibra (Media)	
Deformación Unitaria	3.643	3.318	2.632	4.775	6.621	
EsfuerzoUltimo [kPa]	25.167	15.188	239.977	300.544	465.072	
Mod. de Elasticidad [kPa]	10.595	7.053	100.915	57.443	60.790	
Cohesion [kpa]	12.583	7.594	119.989	150.272	232.536	
% de Mejoramiento (Esfuerzo Ultimo [kPa])	Probeta Inalterada N°1	0.000	-	853.543	1094.206	1747.951
	Probeta Inalterada N°2	-	0.000	1480.084	1878.878	2962.177
% de Mejoramiento (Deformación Unitaria)	Probeta Inalterada N°1	0.000	-	-27.745	31.048	81.728
	Probeta Inalterada N°2	-	0.000	-20.654	43.910	99.564

El modulo de elasticidad se obtuvo calculando la pendiente en el rango elástico de las gráficas esfuerzo – deformación de las probetas inalteradas y remoldeadas con y sin fibra. En el ensayo de compresión simple el valor del esfuerzo de confinamiento es igual a 0 (Das, 2015), por lo tanto, la cohesión se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_u = \frac{q_u}{2}$$

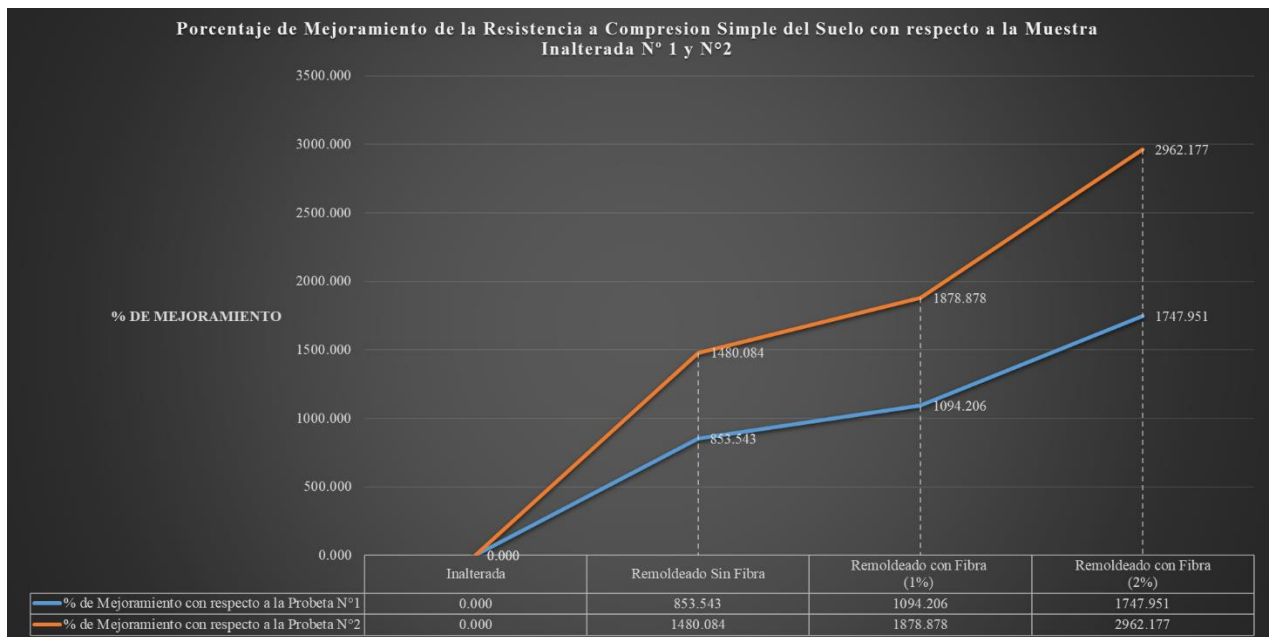
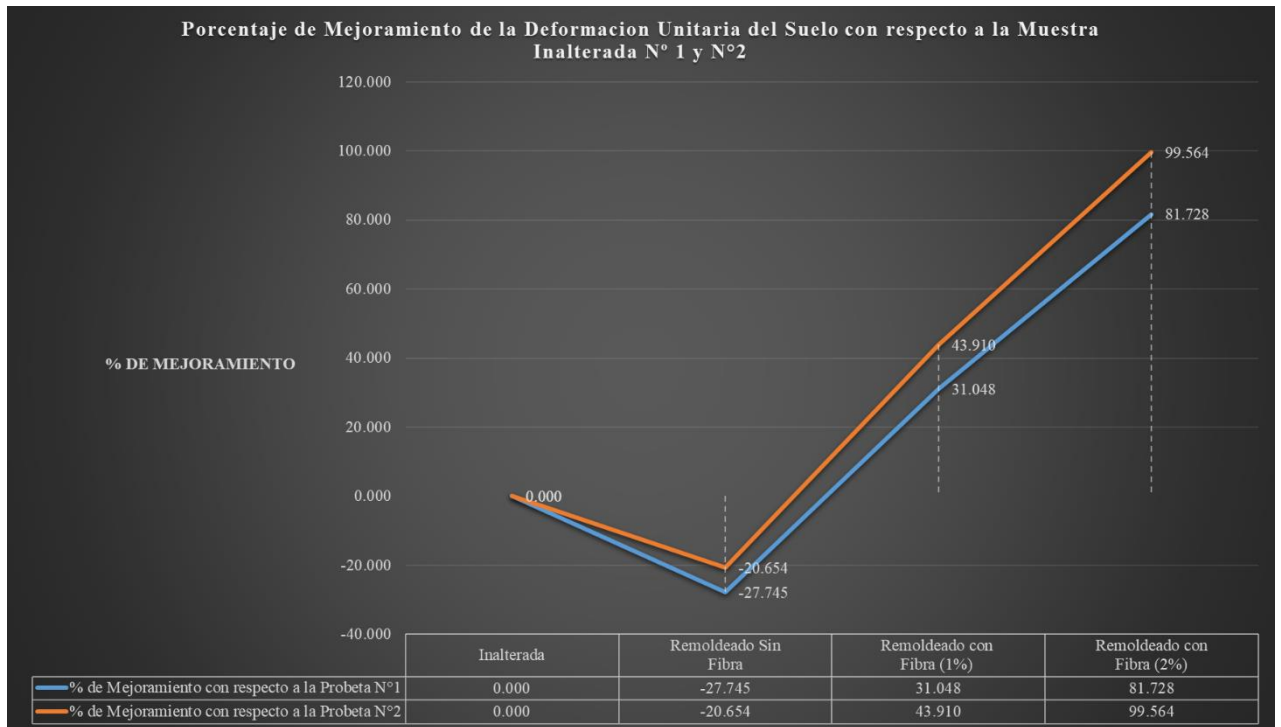


Ilustración 21: Porcentaje de mejora de la Resistencia a Compresión Simple con respecto a la muestra inalterada N°1 y N°2. Fuente: Elaboración Propia



*Ilustración 22: Porcentaje de mejora a la Deformación Unitaria con respecto a la muestra inalterada N°1 y N°2. Fuente: Elaboración Propia*

## CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. CONCLUSIONES

- Según la clasificación del suelo realizado con base en la normativa ASTM D2487 (SUCS), se determinó que el suelo del sector del Garrochal es un limo orgánico arenoso (OH).
- Para el mejoramiento de nuestro suelo orgánico, se observó que la utilización de una longitud de fibra de 15 mm y un porcentaje de fibra del 2% es el que mejores resultados obtuvo.
- Se realizó un análisis por separado de las muestras inalteradas, ya que la muestra #1 obtuvo un porcentaje de humedad de 43.34%. Mientras que la muestra #2 obtuvo un porcentaje de humedad de 68.42%. Eso explicaría la diferencia en los resultados obtenidos en el ensayo de compresión simple.
- El suelo remoldeado sin fibra, compactado a su humedad óptima, presentó una reducción en la deformación unitaria en comparación a las muestras inalteradas #1 y #2, con un 27.8% y 20.7% respectivamente.
- La resistencia última del suelo remoldeado con fibra dio como resultado una mejora con respecto a las muestras de suelo inalterado; mejorando un 1094.21% con un 1% de fibra y un 1747.95% con un 2% de fibra, con respecto a la muestra inalterada #1; y mejorando un 1878.88% con un 1% de fibra y un 2962.18% con un 2% de fibra, con respecto a la muestra inalterada #2.

- La deformación unitaria del suelo dio como resultado una mejora con respecto a las muestras inalteradas; mejorando un 31.05% con un 1% de fibra y un 81.72% con un 2% de fibra, con respecto a la muestra inalterada #1; y mejorando un 43.91% con un 1% de fibra y un 99.56% con un 2% de fibra, con respecto a la muestra inalterada #2.
- El módulo de elasticidad de la muestra inalterada #1 fue de 10.60 kPa, mientras que para la muestra inalterada #2 fue de 7.05 kPa. Mientras que las muestras remodeladas obtuvieron:  $E_{\text{Sinfibra}} = 100.92$  kPa,  $E_{\text{Confibra2\%}} = 57.44$  kPa,  $E_{\text{Confibra2\%}} = 60.79$  kPa. Con esto concluimos que hay una mejora significativa respecto a las muestras inalteradas, mientras que la adición de fibra disminuye el módulo de elasticidad de esta. Esto se debe a que hay una disminución de capacidad a la deformación unitaria.
- Se obtuvo la cohesión no drenada del suelo siendo el ángulo de fricción nulo para este ensayo. La cohesión no drenada obtenida fue la siguiente: Inalterada #1 12.58 kPa, Inalterada #2 7.59 kPa. Mientras que para las muestras remodeladas fue: sin fibra  $C_{\text{sinfibra}} = 119.99$  kPa,  $C_{\text{confibra1\%}} = 150.27$  kPa,  $C_{\text{confibra2\%}} = 232.54$  kPa. En base a los datos obtenidos existe una mejora significativa con la adición de fibra.
- En función de los resultados obtenidos de esfuerzo último, deformación unitaria, y cohesión no drenada. Se determina que existe una mejora en las características del suelo con la adición de fibra. Siendo la adición de 2% de fibra el que mejor características obtuvo, con un  $q_u$  de 465.07 kPa, cohesión no drenada de 232.54 kPa.

## 2. RECOMENDACIONES

- En base a los resultados obtenidos se recomienda la adición de fibra de abacá tratada con NaOH favorece a la absorción de humedad, con lo cual sus posibles aplicaciones serían en zonas expuestas a erosión, con lo cual su posible aplicación sería en taludes con pendientes pronunciadas o suelos expuestos a erosión.
- Dado que las muestras utilizadas en el ensayo de Harvard miniatura tienen un peso relativamente bajo en comparación con el ensayo Proctor, se recomienda tomar varias muestras representativas. Esto ayudará a obtener una mejor estimación de humedad y densidad del suelo.
- Es importante homogeneizar correctamente la muestra de suelo-fibra. Si la muestra no se mezcla adecuadamente, la fibra puede agruparse, lo que dará lugar a espacios vacíos y a una distribución no uniforme de la fibra. Esto podría resultar en resultados inconsistentes y poco fiables.
- Es importante tener en cuenta que el ensayo Harvard miniatura no está normado por ASTM, lo que significa que su aplicación en campo no es posible. Por lo tanto, se recomienda realizar estudios posteriores para evaluar y comparar los resultados obtenidos con otros métodos para su utilización en campo.
- Dado que no existen estudios específicos que determinen la concentración adecuada de hidróxido de sodio para la interacción con fibra de abacá, se

recomienda realizar ensayos especializados para investigar esta interacción.

Esto permite comprender mejor como la concentración de hidróxido de sodio afecta las propiedades de la fibra y su comportamiento.

- El recubrimiento de hidróxido de sodio se presume que mejora la resistencia a la descomposición de la fibra de abacá. Por ello se recomienda realizar un estudio detallado para evaluar y comprender como es el proceso de descomposición con recubrimiento y demostrar su aplicación.

## BIBLIOGRAFIA

- Alcívar, E., & Escobar, D. (2019). INFLUENCIA DE LA INCLUSIÓN DE FIBRA DE ABACÁ EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE LIMOS ARENOSOS REMOLDEADOS. *Repositorio PUCE*.
- ASTM. (2015a). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*.
- ASTM. (2015b). *Standard Test Methods for Linear Density of Textile Fibers*.
- ASTM. (2018). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- ASTM. (2020a). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes*.
- ASTM. (2020b). *Standard test methods for Moisture and Organic Matter of Peat and other organic soils*.
- ASTM. (2020c). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer I*.
- Das, B. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica 4ta edición. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Braja m Das 4ta Edicion, 2015(1), 1–658*.  
[https://www.academia.edu/36776734/Fundamentos\\_de\\_ingenieria\\_geotecnica\\_braja\\_m\\_das\\_4ta\\_edicion](https://www.academia.edu/36776734/Fundamentos_de_ingenieria_geotecnica_braja_m_das_4ta_edicion)
- Castro, C., Palencia, A., Gutiérrez, I., Vargas, G., & Gañan, P. (2007). *Determination of optimal alkaline treatment conditions for fique fiber bundles as reinforcement of composites materials*.
- Diario La Hora. (2021). *Monterrey, capital mundial del abacá*.  
<https://www.lahora.com.ec/santo-domingo/monterrey-capital-mundial-del-abaca-26-noviembre-2021/>

- FAO. (2023). *Future Fibres: Abacá*.  
<https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/abaca0/es/>
- Guru, S., Deepti, M., Prabha, P., Manish, M., Savita, D., & Mohd, A. (2011). *Characterisation Studies and Impact of Chemical Treatment*.
- Ortiz, R. (2017). *MANUAL DE PRÁCTICAS LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL*.
- Salas, A. (2009). *OBTENCION DE COMPUESTOS DE POLIETILENO REFORZADO CON FIBRAS DE ABACA MEDIANTE MOLDEO POR COMPRESION*.
- Terranova Papers. (n.d.). *El Abacá*. Retrieved June 7, 2023, from <https://terranovapapers.com/el-abaca>
- USBR. (1984). *USE OF THE HARVARD MINIATURE APPARATUS FOR OBTAINING MOISTURE-UNIT WEIGHT RELATIONSHIPS OF SOILS*.
- Vettorelo, P., & Claria, J. (2014). Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones. *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, 1. [https://www.researchgate.net/publication/273763093\\_Suelos\\_Reforzados\\_con\\_Fibras\\_Estado\\_del\\_Arte\\_y\\_Aplicaciones](https://www.researchgate.net/publication/273763093_Suelos_Reforzados_con_Fibras_Estado_del_Arte_y_Aplicaciones)
- Vijayalakshmi, K., Neeraja, C. Y. K., Kavitha, A., Hayavadana, J., & Professor, A. (2014). *Abaca Fibre. Transactions on Engineering and Sciences*, 2(9).

## ANEXOS

- Anexo N°1:



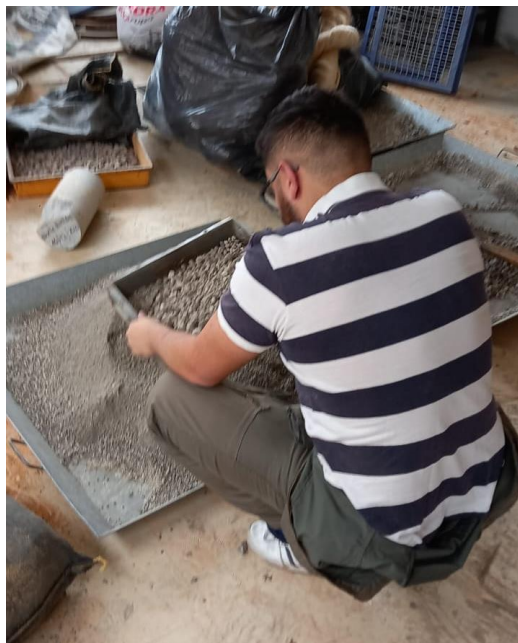
- Anexo N°2:



- Anexo N°3:



- Anexo N°4:



- Anexo N°5:



- Anexo N°6:



- Anexo N°7:



- Anexo N°8: Muestra Sin Fibra



- Anexo N°9: Muestra Sin Fibra



- Anexo N°10: Muestra con Fibra (1%)



- Anexo N°11: Muestra (1%)



- Anexo N°12: Muestra con Fibra (2%)



- Anexo N°13: Muestra (2%)

