

Evaluación del mejoramiento de un suelo arcilloso tipo CH mezclado con cenizas de fibra de fique. Caso de estudio Girón, Santander

Luisa Fernanda Barros Torres, Luisa Fernanda Cañizares Carrillo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

José Alberto Rondón

Ing. Civil, M. Sc.

Codirector

Luz Marina Torrado Gómez

Ing. Civil, M. Sc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Este proyecto de investigación lo dedicamos a nuestra familia, quienes han sido apoyo incondicional y motivación a lo largo de este proceso.

A nuestros padres, Alonso Cañizares y Gloria Carrillo, Cesar Barros y Juana Torres, por su paciencia, su constante ánimo y sacrificio. Su amor y enseñanzas nos han guiado en cada paso de nuestra formación, impulsándonos a superar cada desafío con determinación y compromiso.

A nuestros hermanos, Andrés Cañizares y Cesar Barros Jr, por su compañía, motivación y ejemplo a seguir.

### **Agradecimientos**

En primer lugar, queremos agradecer a Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarnos en cada paso de este proceso.

A nuestro director, José Alberto Rondón y codirectora Luz Marina Torrado, por su dedicación y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso. Su guía ha sido fundamental para la realización de este proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander (UIS) y a la empresa INGEAS S.A.S, por brindarnos los recursos y el espacio necesario para el desarrollo de la investigación. De manera especial, agradecemos al docente Luis Alberto Capacho y al técnico Jairo Hernández (la mechuda), por su apoyo y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos, por su comprensión, motivación y compañía a lo largo de este camino.

Finalmente, a nuestras familias, por su amor, su constante ánimo y respaldo incondicional en este proceso. Su confianza en nosotros ha sido nuestro mayor motor para alcanzar este logro.

**Tabla de Contenido**

|                                                                   | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                | 13          |
| 1. Objetivos .....                                                | 14          |
| 1.1 Objetivo General .....                                        | 14          |
| 1.2 Objetivos Específicos.....                                    | 14          |
| 2. Marco teórico .....                                            | 15          |
| 2.1 Suelos arcillosos.....                                        | 15          |
| 2.2 Clasificación de suelo USCS .....                             | 15          |
| 2.3 Estabilización de suelos .....                                | 16          |
| 2.4 Fibras de fique.....                                          | 17          |
| 2.5 Importancia de la fibra de fique en la ingeniería civil ..... | 17          |
| 2.6 Mejoramiento de suelos con ceniza de fibra de fique.....      | 18          |
| 2.7 Límites de Atterberg .....                                    | 19          |
| 2.8 Ensayo Proctor modificado.....                                | 19          |
| 2.9 Ensayo de compresión inconfiada .....                         | 20          |
| 3. Metodología .....                                              | 20          |
| 3.1 Fase 1: Fase preliminar .....                                 | 20          |
| 3.1.1 Revisión literaria.....                                     | 20          |
| 3.1.2 Tipo de materiales.....                                     | 20          |
| 3.1.3 Preparación de los materiales.....                          | 21          |
| 3.1.3.1 Procedimiento de preparación del suelo natural. ....      | 21          |
| 3.1.3.2 Procedimiento de calcinación de la fibra de fique .....   | 22          |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 3.2 Fase 2: Fase experimental .....                 | 25 |
| 3.2.1 Granulometría del suelo .....                 | 25 |
| 3.2.2 Límites de Atterberg .....                    | 26 |
| 3.2.3 Proctor modificado.....                       | 28 |
| 3.2.4 Compresión inconfiada .....                   | 30 |
| 3.3 Fase 3: Procesamiento y análisis de datos ..... | 31 |
| 4. Resultados .....                                 | 31 |
| 4.1 Granulometría del suelo .....                   | 32 |
| 4.2 Límites de Atterberg .....                      | 34 |
| 4.3 Proctor modificado.....                         | 36 |
| 4.4 Compresión inconfiada .....                     | 37 |
| 5. Conclusiones .....                               | 39 |
| 6. Recomendaciones para estudios futuros .....      | 40 |
| 7. Limitante .....                                  | 40 |
| Referencias Bibliografía .....                      | 42 |
| Apéndices.....                                      | 45 |

**Lista de Tablas**

|                                                                                                             | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1 Pruebas experimentales para la obtención de ceniza de fibra de fique.....                           | 23          |
| Tabla 2 Cantidad de ensayos realizados por porcentaje de ceniza .....                                       | 25          |
| Tabla 3 Condiciones para el ensayo de Proctor modificado.....                                               | 28          |
| Tabla 4 Condiciones para el ensayo de compresión inconfiada .....                                           | 30          |
| Tabla 5 Resultados del ensayo de granulometría de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique..... | 32          |
| Tabla 6 Resultados de Límites de Atterberg de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique .....    | 34          |
| Tabla 7 Resultados de Proctor modificado de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique .....      | 36          |
| Tabla 8 Resistencia a compresión inconfiada de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique .....   | 38          |

**Lista de Figuras**

|                                                                                                                                      | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1 Materiales usados en los ensayos de laboratorio (a) arcilla, y (b) fibra de fique .....                                     | 21          |
| Figura 2 Desmenuzado y secado del suelo natural .....                                                                                | 21          |
| Figura 3 Trituración del suelo natural.....                                                                                          | 22          |
| Figura 4 (a) Fibra de fique seca, y (b) fibra cortada a una longitud de 7 [cm] .....                                                 | 24          |
| Figura 5 Calcinación de la fibra.....                                                                                                | 24          |
| Figura 6 Lavado del material (arcilla CH) para la realización del ensayo de granulometría .....                                      | 25          |
| Figura 7 Tamizado del material .....                                                                                                 | 26          |
| Figura 8 Proceso para determinar el límite líquido, arcilla y ceniza de fibra de fique mezclada uniformemente .....                  | 26          |
| Figura 9 Proceso para determinar el límite líquido después de mezclar los materiales .....                                           | 27          |
| Figura 10 Proceso para determinar el límite plástico.....                                                                            | 27          |
| Figura 11 Mezcla del suelo natural con la ceniza de fibra de fique y se adiciona agua (ejemplo: 5% respecto al peso del suelo) ..... | 29          |
| Figura 12 Se pesa y ensambla el molde para iniciar la compactación.....                                                              | 29          |
| Figura 13 Compactación de cada una de las capas (25 golpes), se enraza y se pesa el molde con el material .....                      | 29          |
| Figura 14 Se extrae la probeta y se realiza este proceso con 4 puntos .....                                                          | 30          |
| Figura 15 Preparación de la mezcla de compresión inconfínada.....                                                                    | 31          |
| Figura 16 Curva granulométrica del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique. ....                                                    | 32          |
| Figura 17 Curva granulométrica del suelo con 1% de ceniza de fibra de fique .....                                                    | 33          |
| Figura 18 Curva granulométrica del suelo con 3% de ceniza de fibra de fique .....                                                    | 33          |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19 Límite líquido del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique .....                                                          | 34 |
| Figura 20 Límite líquido del suelo con 1% de ceniza de fibra de fique .....                                                          | 35 |
| Figura 21 Límite líquido del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique .....                                                          | 35 |
| Figura 22 Curvas de compactación del ensayo de Proctor modificado de una arcilla tipo CH mejorada con ceniza de fibra de fique ..... | 37 |
| Figura 23 Curvas de esfuerzo vs. deformación de probetas de arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique. ....                   | 39 |



**Lista de Apéndices****pág.**

Apéndice A. Preparación de los materiales (arcilla y fibra de fique) ..... 45

Apéndice B. Ensayos realizados en el laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, Proctor  
modificado y compresión inconfiada)

..... 45

### Glosario

**Calcinación:** es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, (temperatura de descomposición), para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química (Gaínza-Delgado, Magaña Haynes, & Rojas Vargas, 2016).

**Fibra de fique:** es una fibra natural extraída de las hojas de la planta Furcraea, conocida por su resistencia y durabilidad (Sandoval Alfonso, 2024).

**Suelos arcillosos:** es un tipo de suelo fino, formado por partículas muy pequeñas que se compactan fácilmente, lo que le otorga alta cohesión y capacidad de retención de agua. Su baja permeabilidad y su tendencia a expandirse o contraerse con la humedad limitan su uso en ciertas construcciones (Gómez Juya, 2022).

### Resumen

**Título:** Evaluación del mejoramiento de un suelo arcilloso tipo CH mezclado con cenizas de fibra de fique. Caso de estudio Girón, Santander\*

**Autor:** Luisa Fernanda Barros Torres, Luisa Fernanda Cañizares Carrillo\*\*

**Palabras Clave:** ceniza de fibra de fique, compresión inconfiada, plasticidad, Arcilla, mejoramiento de suelos, humedad óptima.

**Descripción:** En este trabajo de investigación se analiza el mejoramiento de un suelo arcilloso tipo CH mediante la adición de ceniza de fibra de fique, con el objetivo de proponer una alternativa sostenible para el mejoramiento de suelos. La investigación incluyó ensayos de caracterización física y mecánica, como límites de Atterberg, Proctor modificado y compresión inconfiada, aplicados al suelo natural y a mezclas con proporciones de 1% y 3% de ceniza de fibra de fique. Los resultados mostraron que la adición de ceniza reduce la plasticidad del suelo, permitiendo la clasificación como un material de menor plasticidad (CL), lo cual mejora su trabajabilidad, ya que un suelo menos plástico es fácil de compactar y manejar en obra. En términos de compactación, se evidenció una leve disminución en la densidad máxima compactada, acompañada de un aumento en la humedad óptima de compactación, sin comprometer significativamente el comportamiento del suelo. En cuanto a la resistencia a compresión, las mezclas estabilizadas presentaron valores inferiores al suelo natural. Se concluye que la ceniza de fibra de fique representa una opción viable para el mejoramiento de la plasticidad de los suelos, especialmente en proyectos que prioricen el uso de materiales reciclados de bajo impacto ambiental.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: José Alberto Rondón, M. Sc. Codirector: Luz Marina Torrado Gómez. M. Sc.

### Abstract

**Title:** Evaluation of the improvement of a clayey soil type CH misex with fique fiber ashes.

**Case study** Girón, Santander\*

**Author(s):** Luisa Fernanda Barros Torres, Luisa Fernanda Cañizares Carrillo\*\*

**Key Words:** figuer fiber ash, unconfined compressio, plasticity, clay, soil improvement, optimum moisture.

**Description:** This research work analyzes the improvement of a clayey soil type CH through the addition of fique fiber ash, with the objective of proposing a sustainable alternative for soil improvement. The research included physical and mechanical characterization tests, such as Atterberg limits, modified Proctor and unconfined compression, applied to natural soil and to mixtures with proportions of 1% and 3% of fique fiber ash. The results showed that the addition of ash reduces the plasticity of the soil, allowing classification as a lower plasticity material (CL), which improves its workability, since a less plastic soil is easy to compact and handle on site. In terms of compaction, there was a slight decrease in the maximum compacted density, accompanied by an increase in the optimum compaction moisture, without significantly compromising the behavior of the soil. In terms of compressive strength, the stabilized mixtures presented lower values than the natural soil. It is concluded that fique fiber ash represents a viable option for improving soil plasticity, especially in projects that prioritize the use of recycled materials with low environmental impact.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Mechanical Physics Engineering. Civil Engineering School. Director: José Alberto Rondón, M. Sc. Codirector: Luz Marina Torrado Gómez, M. Sc.

## Introducción

Actualmente, se vive en un entorno cada vez más afectado por la contaminación derivada de los procesos industriales, sumado al constante desarrollo de las construcciones, lo cual impacta significativamente en el medio ambiente. En este contexto, se hace necesario buscar metodologías y procesos eficientes que brinden soluciones enfocadas en el uso aprovechable de recursos naturales como el fique, aportando a la sostenibilidad y reducción de costos en la ingeniería civil (Olaya Castro, 2021).

Una de las mayores problemáticas a la hora de una obra civil reside en los suelos cuando estos no presentan los requerimientos y propiedades necesarias para garantizar la estabilidad de estructuras, como lo son los suelos arcillosos. Esto se debe a su limitada y baja resistencia al corte, sus altas deformaciones y sus propiedades físicas poco favorables (Das, 2015).

A esta problemática se suma la escasez de investigaciones y datos confiables sobre alternativas sostenibles para el mejoramiento de este tipo de suelos encaminados al mejoramiento con ceniza de fibra de fique. Esta limitación en la disponibilidad de información destaca la necesidad de estudios experimentales que exploren nuevas formas de estabilización más accesibles, ecológicas y económicamente factibles (Martínez, 2019).

Desde una perspectiva ambiental y social, se hace prioritario reducir el uso de materiales tradicionales que generan altos costos e impactos ambientales, como la cal y el cemento. En este contexto, el uso de residuos agrícolas como la ceniza de fibra de fique, siendo un producto abundante en regiones como Santander, ofrece una alternativa prometedora. Aprovechar este tipo de materiales no solo constituye a la economía, sino que aporta beneficios directos para

comunidades rurales y proyectos de vías terciarias donde los recursos suelen ser limitados (Olaya Castro, 2021).

El objetivo general de esta investigación es evaluar la efectividad de la ceniza de fibra de fique como estabilizante en suelos arcillosos tipo CH, a partir del análisis de sus efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante ensayos de límites de Atterberg, Proctor modificado y compresión inconfiada.

El estudio busca demostrar que esta fibra natural puede ser una solución viable y sostenible para mejorar la capacidad portante y estabilidad de suelos problemáticos, generando un impacto positivo tanto en el ámbito técnico como ambiental y económico.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar la efectividad del mejoramiento del suelo tipo CH con adición de cenizas de fibra de fique a través de ensayos de compresión inconfiada y plasticidad, en busca de mejorar las propiedades del suelo para su aplicación en proyectos de ingeniería civil.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo virgen tipo CH mediante ensayos de laboratorio, incluyendo la determinación de los límites de Atterberg y la resistencia a la compresión inconfiada.

Identificar porcentajes en peso de las cenizas de fibra de fique para adicionar al suelo arcilloso tipo CH, con el fin de preparar muestras experimentales para la realización de ensayos.

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso tipo CH estabilizado con cenizas de fibra de fique, mediante la realización de ensayos de límites de Atterberg y compresión confinada, identificando los cambios inducidos por la adición de este material.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Suelos arcillosos**

Los suelos arcillosos pertenecen a la familia mineral de los filosilicatos, dado que, desde un punto de vista químico, son silicatos de aluminio, magnesio, hierro, etc. Este tipo de suelos presenta características especiales, tales como la plasticidad y estructuras únicas, las cuales están conformadas por silicatos de aluminio, hierro y magnesio (Gómez Juya, 2022).

Estos suelos presentan problemas de expansión y contracción ante la presencia de agua, lo que conlleva a alteraciones volumétricas y contracciones críticas que causan afectación de las estructuras que se encuentren sobre este (Gómez Juya, 2022).

### **2.2 Clasificación de suelo USCS**

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) es ampliamente utilizado en ingeniería y geología para describir las características granulométricas de los suelos. Este sistema permite clasificar la mayoría de los suelos no consolidados mediante la asignación de un símbolo compuesto por dos letras, que representan las propiedades predominantes del suelo. Para llevar a cabo esta clasificación, es necesario realizar previamente ensayos de granulometría por tamizado y, en caso de suelos finos, complementar con los límites de Atterberg (Urdanivia Roque, 2019).

El USCS también es conocido como la clasificación modificada de Casagrande, ya que se basa en sus fundamentos originales y ha sido adaptado para su uso en el ámbito de la ingeniería

civil. Su aplicación resulta fundamental para el diseño y evaluación de soluciones de estabilización, especialmente en suelos problemáticos como los de tipo CH (Urdanivia Roque, 2019).

El USCS clasifica los suelos en dos grandes grupos: suelos gruesos y suelos finos, distinción que se realiza a partir del porcentaje de partículas que pasan por la malla No. 200 (con abertura de 0.075 mm). Un suelo se considera grueso cuando más del 50% en peso de sus partículas son retenidas por esta malla; por el contrario, se clasifica como fino si más del 50% pasa a través de ella (Urdanivia Roque, 2019).

### **2.3 Estabilización de suelos**

La estabilización de suelos es un proceso mediante el cual se modifican propiedades físicas, químicas y/o mecánicas del terreno con el fin de mejorar su comportamiento ingenieril, haciéndolo más adecuado para su utilización en obras de infraestructuras. Su objetivo principal es incrementar la resistencia del suelo, reducir su susceptibilidad a los fenómenos de contracción – expansión y aumentar su capacidad portante, contribuyendo a un desempeño más estable y seguro en condiciones de carga (Ali et al., 2024).

Para alcanzar estos fines, se han desarrollado diversos métodos de estabilización, los cuales pueden clasificarse en distintas categorías según el tipo de intervención. Entre los más utilizados se encuentran la estabilización mecánica, que implica la compactación o mezcla con otros materiales; la estabilización química; la estabilización con geotextiles y geosintéticos, que proporciona refuerzo estructural; y la estabilización eléctrica, que recurre al uso de corrientes eléctricas para modificar la estructura interna del suelo, principalmente en suelos muy finos (Ali et al., 2024).



## **2.4 Fibras de fique**

El fique es el nombre genérico que se le da a las plantas del género *furcraea*, originarias de los trópicos americanos. Su cultivo se concentra principalmente en las regiones andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador, debido a las condiciones climáticas favorables de estas zonas. También conocida como cabuya, la fibra de fique se clasifica como una fibra vegetal dura, extraída de las hojas de la planta. Su estructura está compuesta por hilos superpuestos que adquieren buena resistencia mecánica, gracias a su alto grado de lignificación y a la concentración de componentes estructurales como la celulosa y la hemicelulosa (Ortiz Forero & Picón Carrascal, 2021).

El proceso de obtención de la fibra inicia con la separación de la corteza de las hojas, lo que permite exponer las fibras internas. Se realiza el lavado y escarmenado, procedimiento en el cual se eliminan impurezas y se separan los hilos, preparándolos para sus diversos usos. Gracias a su facilidad de extracción y bajo costo, el fique ha adquirido gran relevancia en múltiples sectores, desde la industria geotextil, pasando por el diseño de empaques biodegradables, hasta la aplicación en construcción (Ortiz Forero & Picón Carrascal, 2021).

## **2.5 Importancia de la fibra de fique en la ingeniería civil**

El concepto de utilizar fibras naturales como material de construcción no es completamente innovador (Saini et al., 2024). Durante siglos, las fibras naturales han sido parte de la construcción, actuando como refuerzo de paja para muros de tierra, cuerdas para puentes y residuos vegetales para techos de refugios de bambú (Saini et al., 2024). Las viviendas y otras estructuras rurales construidas con materiales vegetales eran sostenibles y ofrecían la resistencia requerida bajo diversas cargas y condiciones climáticas (Saini et al., 2024). Además, estas construcciones tienen la ventaja de ser económicas, ya que están hechas de materiales disponibles localmente, brindan aislamiento térmico, son livianas y fáciles de reparar y mantener (Saini et al., 2024).

Las casas romanas y griegas se erigían principalmente con ladrillos de adobe reforzados con paja y arcilla con yeso, y los techos solían estar hechos de residuos agrícolas. Aún hoy, muchas viviendas rurales se construyen con bambú y desechos agrícolas en países como Bangladesh, China, Etiopía, India, Indonesia, Filipinas, Tailandia y Colombia. Sin embargo, con la industrialización, urbanización y comercialización, estos materiales están siendo gradualmente sustituidos por estructuras de concreto y acero, lo que ha llevado al conocimiento y la práctica del uso de fibras naturales a quedar en desuso (Saini et al., 2024).

## **2.6 Mejoramiento de suelos con ceniza de fibra de fique**

El mejoramiento de suelos con ceniza de fibra de fique se perfila como una alternativa reciente e innovadora dentro del campo de la ingeniería civil, destacándose por su enfoque sostenible. Aunque esta línea de investigación aún se encuentra en una etapa inicial, ya han comenzado a desarrollarse estudios que exploran el potencial de este material para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos, especialmente aquellos de alta plasticidad. A diferencia de estabilizantes convencionales como la cal o el cemento, la ceniza de fique representa una opción ambientalmente responsable (Ortiz Forero & Picón Carrascal, 2021).

Un ejemplo de ello es un estudio desarrollado en el tramo Unión Leticia – Cóndorcocha, en Junín (Perú), donde se evaluó la influencia de la ceniza de fibra de fique combinada con óxido de calcio en la subrasante de una vía (Taype Sánchez & Vega Cahuana, 2020). Los resultados demostraron reducciones significativas en el índice de plasticidad del suelo y aumentos en la densidad seca máxima y la resistencia, según las proporciones (Taype Sánchez & Vega Cahuana, 2020). Estos hallazgos confirman el potencial de la ceniza de fique como un mejorador geotécnico eficaz y ecológico; sin embargo, dada la novedad del enfoque, es necesario continuar investigando

para establecer parámetros de aplicación estandarizados y validar su comportamiento en distintos contextos geotécnicos (Taype Sánchez & Vega Cahuana, 2020).

## **2.7 Límites de Atterberg**

Los límites de Atterberg son una medida básica de la naturaleza o consistencia de un suelo de grano fino. Estos límites corresponden a valores específicos de contenido de humedad ( $w$ ). Fueron creados por Albert Atterberg (1910) y posteriormente perfeccionados por Arthur Casagrande (1927). Los límites de Atterberg permiten distinguir entre limo y arcilla. Además, permiten distinguir entre diferentes tipos de limos y arcillas (Dhir et al., 2017).

Dependiendo del contenido de humedad del suelo, este puede presentarse en cuatro estados: sólido, semisólido, plástico y líquido. En cada estado, la consistencia y el comportamiento del suelo son diferentes, al igual que sus propiedades ingenieriles. Por lo tanto, el límite entre cada estado puede definirse en función de un cambio en el comportamiento del suelo (Dhir et al., 2017).

## **2.8 Ensayo Proctor modificado**

El ensayo Proctor modificado es un procedimiento que permite determinar la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca máxima que puede alcanzar un suelo cuando es compactado con un alto nivel de energía. Este método es fundamental en el diseño de obras de infraestructura, ya que permite establecer parámetros óptimos de compactación que aseguran el desempeño estructural del suelo en campo (ASTM International, 2012).

Se establece que el suelo debe prepararse previamente mediante tamizado y mezclarse con diferentes contenidos de humedad. Una vez compactadas las muestras, se determina su contenido de humedad, y se calcula la densidad seca correspondiente. Posteriormente, se grafica la curva de compactación para identificar el punto de humedad óptima y densidad seca máxima, parámetros esenciales para el control de calidad y especificaciones en obra (ASTM International, 2012).

## **2.9 Ensayo de compresión inconfiada**

Este ensayo establece el método para determinar la resistencia a la compresión no confinada (RCI) en suelos cohesivos, mediante la aplicación de carga axial sin confinamiento lateral. Se evalúa la capacidad del suelo para resistir compresión en condiciones no drenadas y es aplicable a suelos que mantienen su forma sin soporte lateral, como arcillas y limos. El resultado obtenido representa una estimación de la resistencia al corte no drenado, siendo útil para caracterizar el comportamiento mecánico de suelos estabilizados (ASTM International, 2006).

## **3. Metodología**

Este estudio se desarrolló en tres fases principales para evaluar el mejoramiento de un suelo CH mediante la adición de ceniza de fibra de fique.

### **3.1 Fase 1: Fase preliminar**

#### **3.1.1 Revisión literaria**

Se recopiló y revisó literatura relevante relacionada con la estabilización y mejoramiento de suelos mediante el uso de materiales alternativos, como fibras naturales y residuos agroindustriales.

#### **3.1.2 Tipo de materiales**

El tipo de suelo que se emplea es una arcilla tipo CH caracterizada por su alta plasticidad y fibra de fique utilizada como material para el mejoramiento del suelo en forma de ceniza. La fibra se recolectó en Aratoca, Santander, debido a la disponibilidad y calidad de las fibras en la zona. En la figura 1 se observan los materiales utilizados en esta investigación.

**Figura 1**

*Materiales usados en los ensayos de laboratorio (a) arcilla, y (b) fibra de fique*



a)

b)

**3.1.3 Preparación de los materiales**

La fibra de fique y la arcilla deben tener un proceso de preparación inicial para la realización de los ensayos correspondientes en este proyecto. A continuación, se describen los procedimientos realizados para cada material.

**3.1.3.1 Procedimiento de preparación del suelo natural.** Inicialmente, se hace la recolección del suelo. Luego, se desmenuza manualmente en fragmentos más pequeños para extenderlo en bandejas y secarlo al aire libre. Una vez el suelo está completamente seco, se realiza la tritución en la máquina de los Ángeles (esferas: 10, tiempo: 45 minutos, velocidad: 33 rpm). En la figura 2 y 3 se muestra el proceso del suelo natural.

**Figura 2**

*Desmenuzado y secado del suelo natural*

**Figura 3**

*Trituración del suelo natural*



**3.1.3.2 Procedimiento de calcinación de la fibra de fique.** Se llevaron a cabo varias pruebas en un horno con una temperatura máxima de 400°C, variando el tiempo, observando el color y la textura de la ceniza obtenida. Se determinó que la mejor condición para obtener una ceniza con las características más adecuadas fue la prueba N° 6, ya que produjo un material de color gris claro, con una textura fina y homogénea. Además, por seguridad, se tuvo en cuenta que al iniciar la calcinación en el horno podría presentarse fuego, por esta razón, se realizó un pretratamiento térmico en una estufa eléctrica y posteriormente, se procedió a llevar el material al horno para dar inicio al proceso de calcinación. En la tabla 1 se muestran las pruebas experimentales realizadas.

**Tabla 1***Pruebas experimentales para la obtención de ceniza de fibra de fique*

| N° | Temperatura<br>°C | Equipo          | Tiempo<br>[h] | Imagen                                                                              | Color               | Textura                                               | Observaciones                                                                                                   |
|----|-------------------|-----------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 400               | Horno           | 0.5           |    | Negro               | Restos fibrosos visibles.                             | Muy poco calcinado con materia orgánica.                                                                        |
| 2  | 400               | Horno           | 1             |    | Gris - Marrón       | Irregular, algunos residuos fibrosos poco visibles.   | No toda la fibra se descompuso completamente, lo cual puede estar relacionado con una temperatura insuficiente. |
| 3  | 400               | Horno           | 2             |   | Gris - Marrón claro | Fina, aspecto homogéneo similar al talco o la harina. | Sin presencia de partículas a simple vista, pero el color podría no ser el más apropiado.                       |
| 4  | 400               | Horno           | 4             |  | Gris claro          | Fina, aspecto homogéneo similar al talco o la harina. | Adecuada, pero solo para muestras con poca cantidad de fibra en el horno.                                       |
| 5  | 150<br>300<br>400 | Horno           | 1<br>1<br>4   |  | Gris oscuro         | Fina, aspecto homogéneo similar al talco o la harina. | Homogénea, pero su color oscuro indica que aún podría contener materia orgánica.                                |
| 6  | 200<br>400        | Estufa<br>Horno | 2<br>6        |  | Gris claro          | Fina, aspecto homogéneo similar al talco o la harina. | Ceniza homogénea y adecuada.                                                                                    |

En la figura 4 y 5 se muestra el proceso de calcinación de la fibra de fique.

**Figura 4**

*(a) Fibra de fique seca, y (b) fibra cortada a una longitud de 7 [cm]*



a)

b)

**Figura 5**

*Calcinación de la fibra*



a)

b)

*Nota.* (a) pretratamiento térmico de la fibra de fique en una estufa eléctrica a 200°C durante 2 horas para reducir la materia orgánica, y (b) calcinación en el horno a 400°C durante 6 horas.



### 3.2 Fase 2: Fase experimental

En esta fase se realizaron ensayos para evaluar las propiedades físicas y mecánicas del suelo en estado natural y con adición de ceniza de fibra de fique. En la tabla 2 se presenta el número total de ensayos realizados.

**Tabla 2**

*Cantidad de ensayos realizados por porcentaje de ceniza*

| Ensayo                   | Nº Total de ensayos | Ceniza de fibra de fique [%] |
|--------------------------|---------------------|------------------------------|
| Granulometría            | 3                   | 0, 1, 3                      |
| Límites de Atterberg     | 3                   |                              |
| Proctor modificado       | 3 (4 puntos c/u)    |                              |
| Compresión<br>inconfiada | 3                   |                              |

#### 3.2.1 Granulometría del suelo

Este ensayo se realiza siguiendo los lineamientos de la norma INV E-123, con el objetivo de determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo. En la figura 6 y 7 se observa el proceso del ensayo.

**Figura 6**

*Lavado del material (arcilla CH) para la realización del ensayo de granulometría*



**Figura 7**

*Tamizado del material*



a)

b)

c)

*Nota.* a) Mezcla del suelo con ceniza de fibra de fique, b) montaje de tamices, y c) tamizado de forma manual.

### 3.2.2 Límites de Atterberg

Se determina límite líquido (LL), límite plástico (LP), e índice de plasticidad (IP) en el suelo natural y con adición de ceniza de fibra de fique, según la norma INV E-126 e INV E-125. A continuación, se describe el proceso para el ensayo con adición de ceniza de fibra de fique.

Inicialmente, se tamiza el suelo natural seco a través del tamiz N° 40 (425  $\mu\text{m}$ ) y el suelo pasante será el utilizado. Luego, se realiza el ensayo para determinar el límite líquido (LL) teniendo en cuenta que el proceso se repite para tres pruebas, considerando que la ranura se cierre dentro de uno de los siguientes intervalos: 25-35, 20-30 y 15-25 golpes (INVIAS, 2012).

En la figura 8 y 9 se muestra el proceso para determinar el límite líquido.

**Figura 8**

*Proceso para determinar el límite líquido, arcilla y ceniza de fibra de fique mezclada uniformemente*

**Figura 9**

*Proceso para determinar el límite líquido después de mezclar los materiales*



a)                      b)                      c)

*Nota.* a) se adicionó agua hasta obtener una pasta uniforme, b) se colocó una porción de la muestra en la cazuela de Casagrande, se dividió la muestra en dos mitades y se inició a golpear la cazuela con la manija hasta que la ranura se cierre a 13 [mm], y c) se extrajo una muestra de la pasta, se pesa y se coloca en el horno (INVIAS, 2012).

El procedimiento para determinar el límite plástico (LP) se observa en la figura 10. Este procedimiento se repite hasta obtener dos recipientes con muestra, donde, cada uno contenga al menos 6 g (INVIAS, 2012).

**Figura 10**

*Proceso para determinar el límite plástico*



a)

b)

*Nota.* a) se tomó una porción de suelo del ensayo de límite líquido, se moldeó y se formaron rollos, y b) cuando el rollo se rompió o presentó fisuras al alcanzar los 3.2 [mm] de diámetro, se tomó una muestra y se pesó en un recipiente (INVIAS, 2012).

Para finalizar, se determina el índice de plasticidad (IP) como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP) (INVIAS, 2012).

### 3.2.3 Proctor modificado

Este ensayo determina la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad de un suelo. Se seguirán los lineamientos de la norma INV E-142. En la tabla 3 se muestran las condiciones tomadas de la Tabla 142-1 de la norma INV E-142.

**Tabla 3**

*Condiciones para el ensayo de Proctor modificado*

| <b>Método</b>      |                            | <b>A</b> |
|--------------------|----------------------------|----------|
| Diámetro del molde | 101.6 [mm]                 |          |
| Material           | Pasa tamiz N°4 (4.75 [mm]) |          |
| Capas              | 5                          |          |
| Golpe/capa         | 25                         |          |

El proceso de Proctor modificado con adición de ceniza de fibra de fique se muestra en las figuras 11, 12, 13 y 14.

### Figura 11

*Mezcla del suelo natural con la ceniza de fibra de fique y se adiciona agua (ejemplo: 5% respecto al peso del suelo)*



### Figura 12

*Se pesa y ensambla el molde para iniciar la compactación*



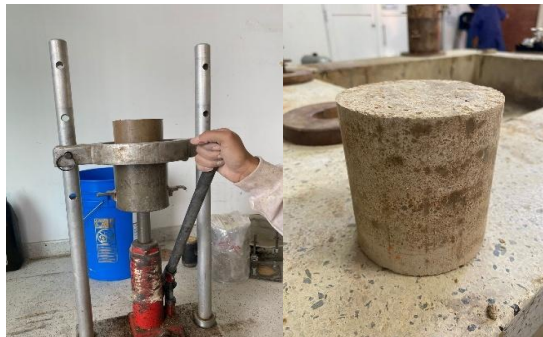
### Figura 13

*Compactación de cada una de las capas (25 golpes), se enraza y se pesa el molde con el material*



**Figura 14**

*Se extrae la probeta y se realiza este proceso con 4 puntos*



### 3.2.4 Compresión inconfínada

Este ensayo se determina según la norma INV E-152 y se tienen en cuenta las condiciones de la tabla 4.

**Tabla 4**

*Condiciones para el ensayo de compresión inconfínada*

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| Diámetro del molde | 5 cm                     |
| Altura del molde   | 10 cm                    |
| Material           | Pasa tamiz N°4 (4.75 mm) |
| Capas              | 3                        |
| Compactación/capa  | Prensa hidráulica        |

La figura 15 muestra la preparación de la mezcla utilizando la arcilla tipo CH que pasa el tamiz N°4.

**Figura 15**

*Preparación de la mezcla de compresión inconfiada*



La compactación de cada una de las capas y la ejecución del ensayo de compresión inconfiada se realizó en la prensa hidráulica Controls Multiloader® con una celda de carga de 5000 Kg (50 kN) siguiendo el protocolo del Apéndice B (Protocolo del ensayo de compresión inconfiada con adición de ceniza de fibra de fique).

### **3.3 Fase 3: Procesamiento y análisis de datos**

Se procesa y analiza los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio utilizando Microsoft Excel. Este análisis permitirá una interpretación más precisa del comportamiento de la ceniza de fibra de fique en el mejoramiento del suelo arcilloso CH.

## **4. Resultados**

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los ensayos realizados en el laboratorio de una arcilla tipo CH mejorada con ceniza de fibra de fique (0%,1% y 3%).4.1

Resultado de las propiedades físicas

#### 4.1 Granulometría del suelo

De los resultados obtenidos del ensayo de granulometría del suelo tipo CH con tres porcentajes distintos de ceniza de fibra de fique (0%, 1% y 3%), se observa que el suelo presenta un alto contenido de finos en todas las muestras, superando el 77%. Al aumentar el porcentaje de ceniza de fibra de fique, disminuye ligeramente la fracción de finos y aumenta la fracción de arenas y gravas. Esto indica que la adición de ceniza de fibra de fique modifica gradualmente la distribución de partículas, lo cual podría contribuir a mejorar las propiedades de trabajabilidad, compactación y drenaje del material. En la tabla 5 se muestran los resultados del ensayo.

**Tabla 5**

*Resultados del ensayo de granulometría de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique*

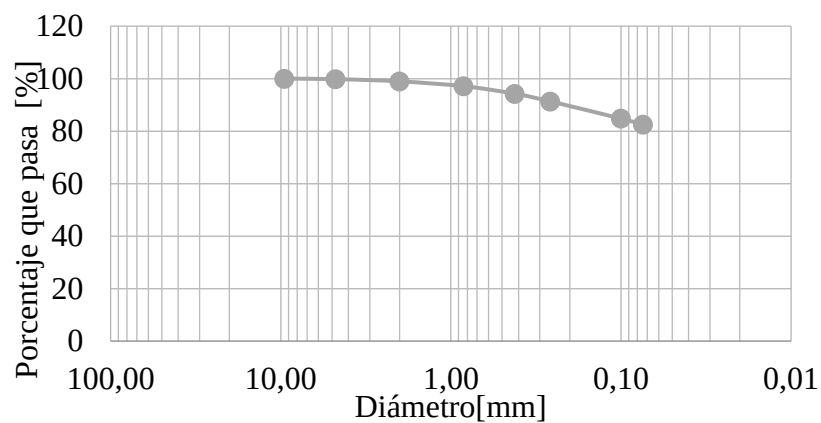
| <b>% Ceniza</b> | <b>0%</b> | <b>1%</b> | <b>3%</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| % Gravas        | 0,18      | 0,05      | 0,37      |
| % Arenas        | 17,43     | 19,32     | 21,83     |
| % Finos         | 82,38     | 80,62     | 77,79     |

Las figuras 16, 17 y 18 muestran las curvas granulométricas para 0%, 1% y 3% de ceniza de fibra de fique. Relacionando el porcentaje que pasa [%] y el diámetro [mm].

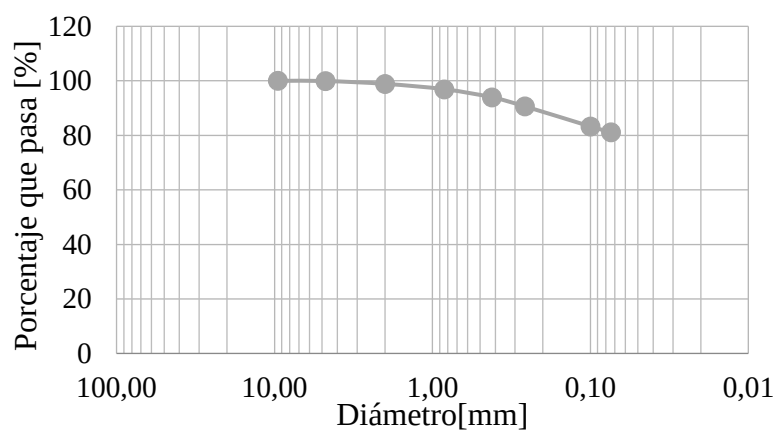
**Figura 16**

*Curva granulométrica del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique.*

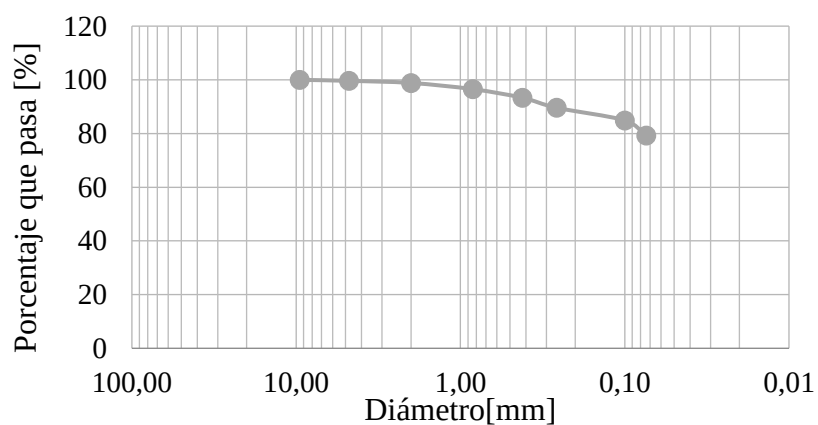


**Figura 17**

*Curva granulométrica del suelo con 1% de ceniza de fibra de fique*

**Figura 18**

*Curva granulométrica del suelo con 3% de ceniza de fibra de fique*



## 4.2 Límites de Atterberg

En la tabla 6 se presentan los resultados de los límites de Atterberg, los cuales muestran que, al incorporar ceniza de fibra de fique al suelo arcilloso tipo CH, se reduce el límite líquido (LL) de 50,16% a 45,20% y el índice de plasticidad de 24,87% a 20,23%. Por lo tanto, la clasificación según sistema unificado de clasificación de suelos (USCS) cambia de CH (arcilla de alta plasticidad) en su estado natural a CL (arcilla de baja plasticidad) con 1% y 3% de ceniza, lo que representa una mejora en las características de plasticidad del suelo.

**Tabla 6**

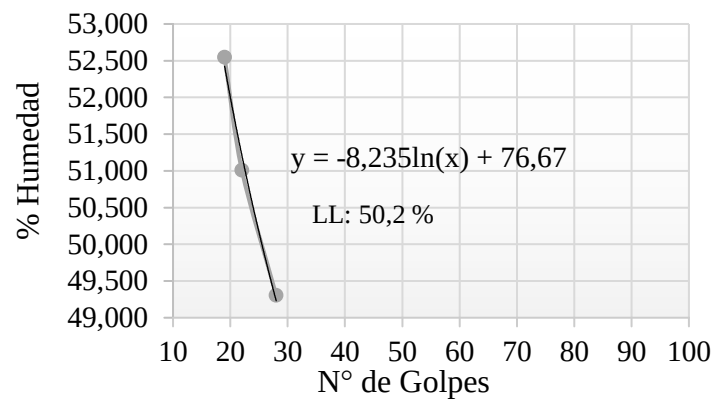
*Resultados de Límites de Atterberg de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique*

| <b>% Ceniza</b> | <b>0%</b> | <b>1%</b> | <b>3%</b> |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| LL              | 50,16     | 46,66     | 45,20     |
| LP              | 25,29     | 25,12     | 24,97     |
| IP              | 24,87     | 21,53     | 20,23     |
| Clasificación   | CH        | CL        | CL        |

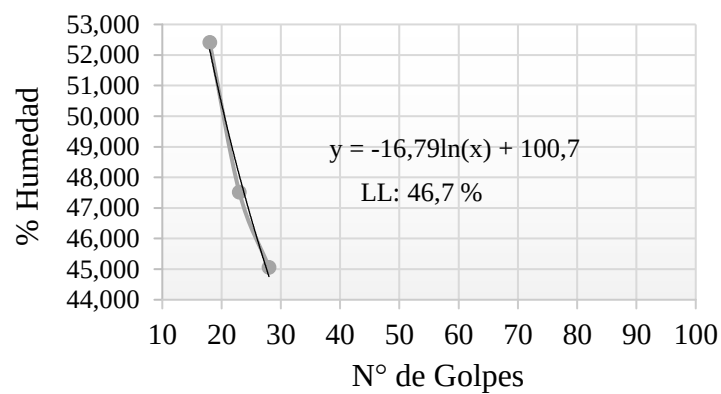
Las figuras 19, 20 y 21 muestran el límite líquido de 0%, 1% y 3% de ceniza de fibra de fique. Relacionando humedad y el número de golpes.

**Figura 19**

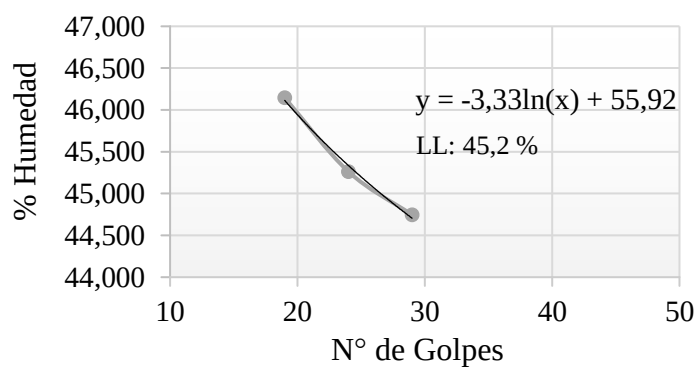
*Límite líquido del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique*

**Figura 20**

*Límite líquido del suelo con 1% de ceniza de fibra de fique*

**Figura 21**

*Límite líquido del suelo con 0% de ceniza de fibra de fique*



### 4.3 Proctor modificado

Los resultados del ensayo Proctor Modificado se presentan en la tabla 7, estos indican que, al aumentar el contenido de ceniza de fibra de fique, la humedad óptima del suelo se incrementa, pasando de 12,2% en el suelo natural a 15,6% con 3% de ceniza de fibra de fique. Al mismo tiempo, la densidad seca máxima disminuye levemente de 1,77 [g/cm<sup>3</sup>] a 1,74 [g/cm<sup>3</sup>]. Estos cambios pueden deberse a la presencia de poros en la ceniza, que absorbe mayor cantidad de agua y reduce la densidad del sistema. Sin embargo, estas variaciones son moderadas y pueden considerarse positivas si se acompañan de mejoras en otras propiedades del suelo.

**Tabla 7**

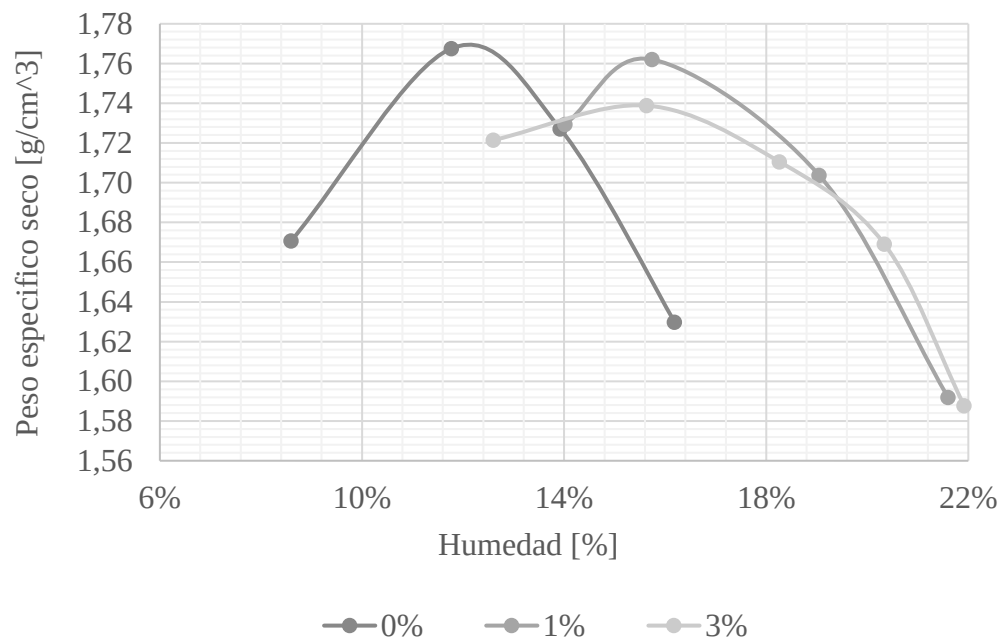
*Resultados de Proctor modificado de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique*

| Contenido de ceniza | Densidad máxima      | Humedad |
|---------------------|----------------------|---------|
| [%]                 | [g/cm <sup>3</sup> ] | [%]     |
| 0                   | 1,77                 | 12,2    |
| 1                   | 1,76                 | 15,45   |
| 3                   | 1,74                 | 15,6    |

La figura 22 presenta las curvas de compactación obtenidas en el ensayo de Proctor modificado para los porcentajes de 0%, 1% y 3% de ceniza de fibra de fique. Relaciona el peso específico seco [g/cm<sup>3</sup>] y humedad.

**Figura 22**

*Curvas de compactación del ensayo de Proctor modificado de una arcilla tipo CH mejorada con ceniza de fibra de fique*



#### 4.4 Compresión inconfiada

Los resultados de la tabla 8 muestran que la mayor resistencia a compresión inconfiada se obtuvo en el suelo natural (0% de ceniza), con un esfuerzo máximo de 798,47 [kN/m²]. Al adicionar 1% y 3% de ceniza, la resistencia disminuyó a 531,21 [kN/m²] y 514,84 [kN/m²] respectivamente, lo que representa reducciones del 33,5% y 35,5%. Esto indica que la ceniza de fibra de fique, en las proporciones evaluadas, no mejoró la resistencia de la arcilla tipo CH. Por el contrario, se evidencia una disminución en la capacidad cortante del material. Este comportamiento puede atribuirse a la ausencia de reacciones puzolánicas o activadores químicos. Asimismo, la granulometría del material cambió al incorporar la ceniza, generando un aumento en el contenido de arenas y gravas, este cambio no fue suficiente para mejorar la resistencia del suelo,

ya que los finos siguen siendo predominantes. Por otro lado, el aumento en la humedad óptima también podría afectar negativamente la resistencia del suelo, ya que un mayor contenido de agua reduce la fricción entre partículas.

**Tabla 8**

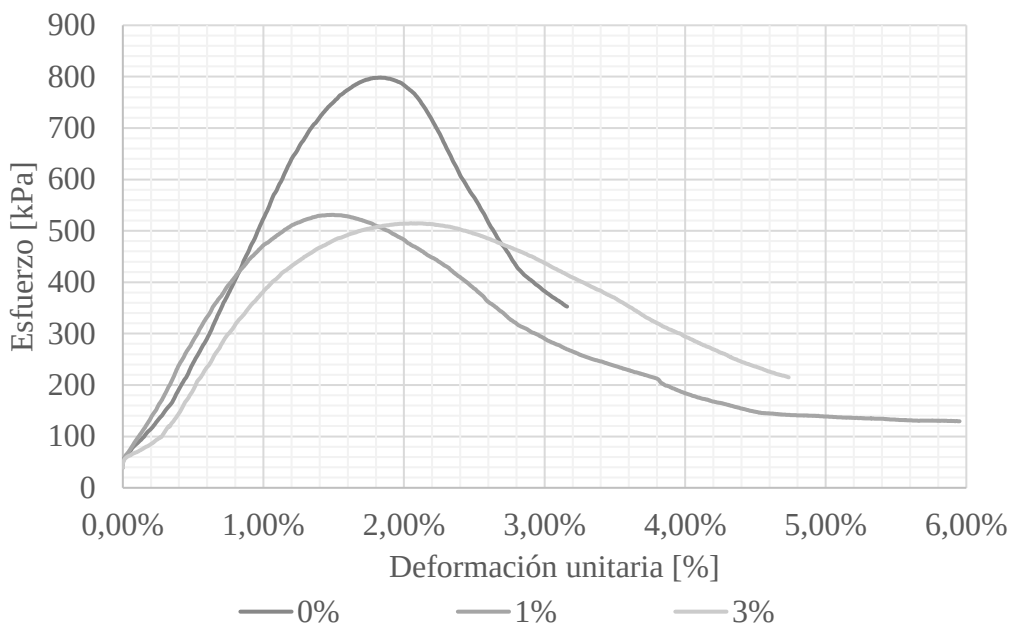
*Resistencia a compresión inconfiada de una arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique*

| Contenido de ceniza | Fuerza máxima, qu | Resistencia compresión inconfiada |
|---------------------|-------------------|-----------------------------------|
| [%]                 | [kN]              | [kN/m <sup>2</sup> ]              |
| 0                   | 1,644             | 798,47                            |
| 1                   | 1,093             | 531,21                            |
| 3                   | 1,074             | 514,84                            |

En la figura 23 se muestran las curvas esfuerzo vs. deformación obtenidas en el ensayo de compresión inconfiada para mezclas de arcilla tipo CH con 0%, 1% y 3% de ceniza de fibra de fique. Se evidencia que la adición de ceniza de fibra de fique disminuye la resistencia del suelo y que no genera un mejoramiento en términos de comportamiento mecánico bajo carga axial.

**Figura 23**

*Curvas de esfuerzo vs. deformación de probetas de arcilla CH mejorada con ceniza de fibra de fique.*



## 5. Conclusiones

Se seleccionaron las proporciones de 1% y 3% de ceniza de fibra de fique con el propósito de evaluar si, con pequeñas cantidades de este residuo, era posible generar mejoras en el comportamiento del suelo arcilloso tipo CH. En cantidades reducidas de ceniza se pueden evidenciar cambios positivos, especialmente en la plasticidad del suelo.

La adición de ceniza de fibra de fique redujo los límites de Atterberg del suelo tipo CH (límite líquido e índice de plasticidad), esto permitió que el suelo pasará de clasificarse como CH (arcilla de alta plasticidad) a CL (arcilla de baja plasticidad), según el sistema SUCS. Esta mejora en la plasticidad puede facilitar el manejo de suelo en obra, ya que reduce su sensibilidad al agua.

Por otro lado, en términos de resistencia mecánica, evaluada mediante compresión inconfiada, no se observaron incrementos significativos, posiblemente debido a una baja reactividad de la ceniza calcinada y la ausencia de un agente activador.

## **6. Recomendaciones para estudios futuros**

Realizar ensayos de caracterización química como difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX), con el fin de determinar la composición mineralógica de la ceniza y establecer la temperatura óptima de calcinación.

Realizar pruebas complementarias como ensayos triaxiales, de consolidación y durabilidad, así como explorar otras dosis mayores de ceniza o combinaciones con diferentes aditivos estabilizantes.

## **7. Limitante**

Una de las principales limitaciones del presente estudio fue la disponibilidad de equipos en el laboratorio, ya que únicamente se contó con un horno cuya temperatura máxima era de 400 °C. Esta restricción impidió evaluar el comportamiento de la ceniza de fibra de fique calcinada a temperaturas más elevadas, las cuales, según la literatura, podrían mejorar sus propiedades puzolánicas y su efectividad como aditivo estabilizante. Por esta razón, se usó el procedimiento descrito en esta investigación y, en función de esta condición, se definieron tanto la cantidad como el tipo de ensayos realizados. A pesar de esta limitación, el desarrollo de este proyecto busca



aportar un granito de arena al conocimiento sobre el uso de residuos orgánicos en la ingeniería civil y representar el punto de partida para futuras investigaciones en este campo.

Otra limitación del estudio fue no medir la succión del suelo, lo que dificulta entender su comportamiento frente a cambios de humedad.

Debido a la escasa disponibilidad de literatura científica y técnica relacionada con el uso de ceniza de fibra de fique como estabilizante de suelos, esta investigación se desarrolló con un enfoque netamente experimental. La falta de referencias bibliográficas previas limitó el uso de antecedentes teóricos o comparativos, lo que resalta el carácter innovador y exploratorio del estudio. Los resultados obtenidos constituyen un aporte preliminar para futuras investigaciones que busquen aprovechar residuos agroindustriales en la mejora de los suelos problemáticos en ingeniería civil.

### Referencias Bibliografía

- Ali, M. A. M., Johari, M. A. H., Aziz, M. A. A., & Zain, M. A. M. (2024). Mechanical and microstructural properties of stabilized clay soil using waste materials: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e01803. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532302641X>
- ASTM International. (2006). ASTM D2166-06: Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International. <https://www.astm.org/d2166-06.html>
- ASTM International. (2012). ASTM D1557-12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> or 2,700 kN-m/m<sup>3</sup>). ASTM International. <https://www.astm.org/d1557-12.html>
- Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4.<sup>a</sup> ed.). Cengage Learning. [https://www.academia.edu/36776734/Fundamentos\\_de\\_ingenieria\\_geotecnica\\_braja\\_m\\_das\\_](https://www.academia.edu/36776734/Fundamentos_de_ingenieria_geotecnica_braja_m_das_)
- Dhir, R. K., Ghataora, G. S., & Lynn, C. J. (2017). Sewage sludge ash characteristics. En Elsevier eBooks (pp. 69–110). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100987-1.00004-4>
- Gáinza-Delgado, Y., Magaña Haynes, M. E., & Rojas Vargas, A. (2016). Determinación del índice de consumo de petróleo del horno de calcinación de la Empresa comandante Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química*, 36(3). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445546669008>
- Gómez Juya, W. A. (2022). Cenizas cascarilla de arroz frente a otros métodos de mejoramiento geotécnico de suelos arcillosos [Tesis de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de

- Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/ac010d12-d62c-480a-8f2f-ac0a77d705b2/content>
- INVIAS. (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras: INV E-123 – Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.
- INVIAS. (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras: INV E-125 – Determinación del límite líquido de los suelos.
- INVIAS. (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras: INV E-126 – Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
- INVIAS. (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras: INV E-142 – Relación de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación).
- INVIAS. (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras: INV E-152 – Compresión inconfiada en muestras de suelos.
- Martínez, M. L. (2019). ¿Por qué enunciar las limitaciones del estudio? *Medisur*, 17(1), 10–12. <http://scielo.sld.cu/pdf/ms/v17n1/1727-897X-ms-17-01-10.pdf>
- Olaya Castro, L. F. (2021). Revisión teórica del mejoramiento de suelos arcillosos complejos en Colombia mediante el uso de materiales reciclados [Monografía de pregrado, Universidad Santo Tomás]. Facultad de Ingeniería Civil, Villavicencio, Colombia.
- Ortiz Forero, M. A., & Picón Carrascal, L. N. (2021). Revisión bibliográfica de las características mecánicas a tensión de un material compuesto con tejido de fibra de fique como refuerzo en elementos de concreto a compresión [Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander].
- Ortiz Forero, M. de los Á., & Picón Carrascal, L. N. (2021). Revisión bibliográfica de las características mecánicas a tensión de un material compuesto con tejido de fibra de fique

- como refuerzo en elementos de concreto a compresión [Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/5b044b5a-da72-476c-af8e-103a21998f33/content>
- Saini, K., Matsagar, V. A., & Kodur, V. R. (2024). Recent advances in the use of natural fibers in civil engineering structures. *Construction and Building Materials*, 411, 134364. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134364>
- Taype Sánchez, M., & Vega Cahuana, K. G. (2020). Incorporación de óxido de calcio y ceniza de fibra de fique para el mejoramiento de la subrasante en el tramo Unión Leticia – Cóndorcocha, Junín [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/66995>
- Urdanivia Roque, H. A. (2019). Relación entre el tipo de suelo (SUCS y AASHTO) y el asentamiento de suelos para determinar asentamientos diferenciales en cimientos de concreto armado [Tesis de grado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. <https://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2072>

## Apéndices

Los protocolos presentados en los apéndices corresponden a los procedimientos desarrollados en el laboratorio durante la ejecución de esta investigación. Cada protocolo detalla los pasos seguidos, los equipos empleados y las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas.

### Apéndice A. Preparación de los materiales (arcilla y fibra de fique)

#### Procedimiento de preparación del suelo natural

##### Descripción del proceso

Este procedimiento describe el desmenuzado, secado y trituration del suelo, ya que es fundamental realizar estos pasos antes de iniciar los ensayos de laboratorio.

##### Equipo y materiales utilizados

La Tabla 1 presenta una descripción de los materiales utilizados en el laboratorio.

#### Apéndice Tabla 1

*Equipo y materiales utilizados en la preparación del suelo natural*

| Equipo/ Materiales                                | Uso                                                                    |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| Arcilla                                           | Material de estudio para los ensayos                                   |
| Herramientas de excavación (pala, pico o barreno) | Se utilizan para extraer la arcilla del sitio                          |
| Bandejas metálicas                                | Superficie donde se extiende la arcilla para su secado y manipulación. |
| Sacos o bolsas de almacenamiento                  | Se emplean para transportar y almacenar la arcilla                     |

|                                          |                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Horno de secado (opcional)               | Acelera el secado del suelo               |
| Martillo o mazo de goma                  | Facilita el desmenuzamiento de la arcilla |
| Máquina de Los Ángeles                   | Se usa para la tritución                  |
| Guantes, gafas de seguridad y mascarilla | Elementos de protección personal          |

### Proceso

- a. Se recolectó el suelo utilizando herramientas de excavación, eliminando impurezas como raíces, piedras u otros materiales ajenos al suelo. Luego, se almacenó en sacos o bolsas limpias como se muestra en la figura 1.

### Apéndice Figura 1

*Arcilla como material de estudio.*



- b. En una bandeja limpia, la arcilla se desmenuzó manualmente en fragmentos más pequeños con ayuda de una pala y un martillo. Se recomienda realizar este paso antes de que el suelo se seque por completo, ya que la humedad facilita su desmenuzamiento y reduce el esfuerzo necesario. La figura 2 muestra el desmenuzamiento del suelo.

### Apéndice Figura 2

*Desmenuzamiento del suelo*



- c. El suelo desmenuzado fue extendido en bandejas y secado al aire libre, volteando ocasionalmente los fragmentos de suelo para un secado uniforme como se observa en la figura 3.

### **Apéndice Figura 3**

*Secado del suelo al aire libre*



- d. Antes de la trituración, se verifica que el suelo esté completamente seco. Luego, se introduce en el tambor de la Máquina de Los Ángeles junto con 10 esferas de acero y se somete a una velocidad de 33 rpm durante 45 minutos. Al terminar la trituración se almacenó el material en los sacos o bolsas y se guardó en un lugar seco. La Figura 4 muestra el proceso de trituración del suelo.

### **Apéndice Figura 4**

*Trituración del suelo en la Máquina de los ángeles*



### Procedimiento de la calcinación de la fibra de fique

#### Descripción del proceso

Para obtener la ceniza de fibra de fique utilizada en el mejoramiento del suelo, se realizó un proceso experimental en el que se evaluaron diferentes condiciones de calcinación, visualizando el color y la textura obtenidos en cada prueba. Con esto, se determinó la temperatura y el tiempo óptimos para generar una ceniza con las características deseadas.

#### Equipo y materiales utilizados

La Tabla 2 presenta una descripción de los materiales utilizados en la calcinación.

#### Apéndice Tabla 2

*Equipo y materiales utilizados en la calcinación de la ceniza*

| Equipo/ Materiales    | Uso                                      |
|-----------------------|------------------------------------------|
| Fibra de fique        | Material a calcinar                      |
| Recipientes metálicos | Contener la fibra durante la calcinación |
| Tijeras               | Cortar la fibra                          |
| Bolsas herméticas     | Usadas para guardar la ceniza            |
| Horno                 | Realizar la calcinación de la fibra      |



|                      |                                                        |
|----------------------|--------------------------------------------------------|
| Estufa eléctrica     | Inicio del proceso de calcinación                      |
| Ollas de aluminio    | Contener el material durante el proceso de calcinación |
| Espátula             | Manipular la fibra de fique                            |
| Guantes y mascarilla | Elementos de protección personal                       |

### Proceso de calcinación (prueba elegida N° 6)

- a. Se realizó la recolección de la fibra de fique y se verificó que esté seca (Si la fibra no está seca, se deja secar a temperatura ambiente). Posteriormente, la fibra se cortó a una longitud de 7 cm para asegurar una calcinación uniforme. La Figura 5 muestra el proceso inicial de la fibra de fique.

#### Apéndice Figura 5

*Fibra de fique seca y cortada*



- b. Se realizó un pretratamiento térmico de la fibra de fique en una estufa eléctrica a 200°C durante 2 horas para reducir la materia orgánica. En la figura 6 se muestra este proceso.

#### Apéndice Figura 6

*Pretratamiento térmico de la fibra de fique*



- c. Posteriormente, el material fue calcinado en el horno a  $400^{\circ}\text{C}$  durante 6 horas hasta obtener una ceniza de color gris claro y textura homogénea. La ceniza obtenida se almacenó en bolsas herméticas para conservar sus propiedades. La figura 7 muestra la calcinación de la fibra de fique.

#### **Apéndice Figura 7**

##### *Calcinación en el horno*



- d. Recomendación: Antes de iniciar los ensayos, se recomienda colocar la ceniza en el horno a  $110^{\circ}\text{C}$  durante 10 o 15 minutos para eliminar cualquier humedad presente y garantizar resultados más precisos.

**Apéndice B.** Ensayos realizados en el laboratorio (granulometría, límites de Atterberg, proctor modificado y compresión inconfiada)

### **Protocolo del ensayo de granulometría por tamizado en suelos con adición de ceniza de fibra de fique**

#### **Descripción del proceso**

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma INV E-123, con el objetivo de determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo.

### **Equipo y materiales utilizados**

La Tabla 3 presenta una descripción de los materiales utilizados en el ensayo de granulometría.

### **Apéndice Tabla 3**

*Equipo y materiales utilizados en el ensayo de Granulometría*

| <b>Equipo/ Materiales</b>             | <b>Uso</b>                                                 |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Arcilla CH                            | Suelo natural.                                             |
| Ceniza de fibra de fique              | Material adicional para mejorar el suelo.                  |
| Tamiz de lavado (N° 200)              | Usado para lavar el material                               |
| Balanza                               | Usada para pesar el suelo y la ceniza                      |
| Recipientes                           | Utilizados para lavar el material y almacenar las muestras |
| Horno ( $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) | Para secar las muestras                                    |
| Cepillo                               | Para facilitar el paso del material en los tamices         |
| Tamices                               | Para realizar el tamizado                                  |

### **Proceso**

- Se pesó la cantidad de arcilla a utilizar en el ensayo y se realizó el lavado del material. La muestra se coloca sobre el tamiz No. 200 y se lava con un chorro suave de agua, agitando ligeramente, hasta que el agua que pasa por el tamiz salga clara. El material retenido se

seca en horno a  $110 \pm 5$  °C (INVIAS, 2012). La figura 8 muestra el proceso de lavado del material.

### Apéndice Figura 8

#### *Lavado del material de granulometría*



- b. Después del secado, el material se pesó para registrar el peso seco total y se mezcló con el porcentaje correspondiente de ceniza de fibra de fique. Luego, se realizó el montaje de tamices utilizando los siguientes: 3/8", N°4, N°10, N°20, N°40, N°60, N°140 y N°200 (INVIAS, 2012). En la figura 9 se observa la mezcla de los materiales y el montaje de los tamices.

### Apéndice Figura 9

#### *Montaje de los tamices*



- c. El material mezclado y seco se vierte sobre el tamiz superior y se inicia a tamizar de forma manual. Si es necesario, se utiliza un cepillo para facilitar el paso del material. Luego, se pesa el suelo retenido en cada tamiz y se registra para realizar los respectivos cálculos.
- d. **Cálculos:** Los cálculos están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1QXB1OxYMwa6JVjvzJzw4l7kBmfKn53nf/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true>

### **Protocolo del ensayo de límites de consistencia en suelos con adición de ceniza de fibra de fique.**

#### **Descripción del proceso**

Se describe la metodología para la determinación del límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) en suelos con adición de ceniza de fibra de fique, siguiendo la norma INV E-126 e INV E-125.

#### **Equipo y materiales utilizados**

La Tabla 4 presenta una descripción de los materiales utilizados en el ensayo de límites de Atterberg.

#### **Apéndice Tabla 4**

*Equipo y materiales utilizados en el ensayo de límites de Atterberg*

| <b>Equipo/ Materiales</b> | <b>Uso</b>                                |
|---------------------------|-------------------------------------------|
| Arcilla CH                | Suelo natural.                            |
| Ceniza de fibra de fique  | Material adicional para mejorar el suelo. |
| Pipeta o frasco de lavado | Para adicionar agua a la muestra.         |

|                                     |                                                                |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Tamiz N° 40 (425 $\mu\text{m}$ )    | Para separar la fracción fina del suelo.                       |
| Balanza de precisión (0.01 g)       | Usada para pesar el suelo, la ceniza y recipientes.            |
| Cazuela de Casagrande               | Equipo para determinar el Límite Líquido.                      |
| Ranurador estándar                  | Divide la muestra en la cuchara de Casagrande.                 |
| Espátula metálica                   | Para mezclar y nivelar la muestra en la cuchara de Casagrande. |
| Recipientes de almacenamiento       | Utilizados para almacenar las muestras.                        |
| Horno ( $110 \pm 5^\circ\text{C}$ ) | Para secar las muestras y determinar el contenido de humedad.  |
| Recipiente para mezclar             | Para mezclar las muestras                                      |
| Superficie de vidrio o acrílico     | Para realizar el ensayo del Límite Plástico.                   |

### Determinación del Límite Líquido (LL)

- Se tamizó el suelo natural seco a través del tamiz N° 40 (425  $\mu\text{m}$ ) y el suelo pasante es el utilizado en el ensayo. Luego, se pesó el suelo natural (150 gr) y la ceniza de fibra de fique según el porcentaje de adición (ejemplo: 1% respecto al peso del suelo) (INVIAS, 2012).
- En un recipiente se mezcló el suelo natural con la ceniza de fibra de fique hasta obtener una distribución homogénea como se observa en la figura 10.

### Apéndice Figura 10

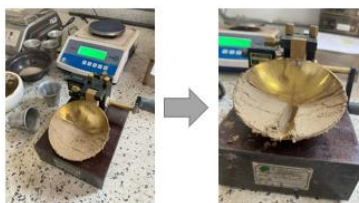
*Arcilla y ceniza de fibra de fique mezclados para determinar límite líquido*



- c. Luego de tener la mezcla de suelo y ceniza, se adiciono agua hasta obtener una pasta uniforme y se colocó una porción de la muestra en la cazuela de Casagrande, nivelándola con la espátula (INVIAS, 2012).
- d. Se usó el ranurador para dividir la muestra en dos mitades, se levantó y golpeó la cazuela girando la manija a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la ranura se cierre a 13 [mm] (INVIAS, 2012).

### Apéndice Figura 11

*Mezcla en la cazuela de Casagrande*



- e. Se extrajo una muestra de la pasta tomando una porción del material a lo ancho de la espátula, de la zona donde la ranura se cerró. Luego, se colocó en un recipiente y se pesó (INVIAS, 2012). La figura 12 muestra este proceso.

### Apéndice Figura 12

*Muestra tomada después de cerrada la ranura*



Nota. Se recomienda: 1. Pesar el recipiente y anotar el dato, 2. Colocar la muestra en el recipiente, 3. Pesar el recipiente con la muestra y anotar el dato. Fuente: elaboración propia.

- f. El material sobrante de la cuchara de Casagrande puede colocarse en el recipiente de mezclado para las siguientes determinaciones. En este ensayo, se realizó tres pruebas

considerando que la ranura se cierre dentro de uno de los siguientes intervalos: 25-35, 20-30 y 15 (INVIAS, 2012).

- g. La muestra tomada se secó en el horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se pesó al sacarla del horno. Se obtiene el límite líquido a partir de la humedad correspondiente a 25 golpes (INVIAS, 2012).

### **Determinación del Límite Plástico (LP)**

- a. Se tomó una porción de suelo (1.5-2.0 g) del ensayo de límite líquido y se dejó secar hasta que sea moldeable sin adherirse a los dedos como se observa en la figura 13 (INVIAS, 2012).

### **Apéndice Figura 13**

*Material para determinar límite plástico*



- b. Se moldeó la muestra formando un rollo uniforme de 3.2 mm de diámetro, utilizando las palmas o los dedos de las manos. Cuando el rollo se rompió o presentó fisuras al alcanzar los 3.2 mm de diámetro, se tomó una muestra y se pesó en un recipiente (INVIAS, 2012).

La figura 14 muestra los rollos de este límite.

### **Apéndice Figura 14**

*Rollos del límite plástico*





- c. Este procedimiento se repitió hasta obtener dos recipientes con muestra, donde, cada uno tenga al menos 6 g. Las muestras tomadas se secaron en el horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y se pesaron al sacarlas del horno para determinar el contenido de humedad (INVIAS, 2012).
- d. **Cálculos:** Los cálculos están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1QXB1OxYMwa6JVjvzJzw4l7kBmfKn53nf/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true>

### **Protocolo del ensayo de Proctor modificado con ceniza de fibra de fique**

#### **Descripción del ensayo**

El proceso de este ensayo determina la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad de un suelo con ceniza de fibra de fique, según la norma INV E-142.

#### **Materiales y equipos utilizados**

La Tabla 5 presenta una descripción de los materiales utilizados en el ensayo de Proctor modificado.

#### **Apéndice Tabla 5**

*Equipo y materiales utilizados en Proctor modificado*

| <b>Equipo/ Materiales</b> | <b>Uso</b> |
|---------------------------|------------|
|---------------------------|------------|

|                                         |                                                                          |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Arcilla, ceniza de fibra de fique, agua | Materiales para realizar la mezcla                                       |
| Molde                                   | Recipiente metálico cilíndrico donde se compacta la muestra de suelo.    |
| Tamiz N°4                               | Para seleccionar la fracción de suelo a ensayar                          |
| Recipientes                             | Para mezcla y almacenar muestras                                         |
| Bandeja metálica                        | Se utilizan para esparcir y dividir la mezcla                            |
| Balanza                                 | Utilizada para pesar el molde con o sin mezcla y las muestras            |
| Horno ( $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ )   | para determinar contenido de humedad                                     |
| Espátula                                | Para enraizar                                                            |
| Pala metálica                           | Facilita la adición del material al molde de compactación y para mezclar |
| Pisón metálico                          | Aplicar energía de compactación al suelo mediante golpes repetidos.      |
| Gato con marco                          | Extraer la muestra compactada del molde sin alterar su estructura.       |

### Proceso

Inicialmente, se verificó que el suelo natural esté seco. Posteriormente, se eligió el método de compactación descrito en la Tabla 142-1 de la norma INV E-142. De acuerdo con esto, el ensayo se realizó siguiendo el Método A, con las condiciones presentadas en la tabla 6.

**Apéndice Tabla 6**

*Condiciones para el ensayo de Proctor modificado descrito en la Tabla 142-1 de la norma INV*

*E-142*

| Método             | A                        |
|--------------------|--------------------------|
| Diámetro del molde | 101.6 mm (4")            |
| Material           | Pasa tamiz N°4 (4.75 mm) |
| Capas              | 5                        |
| Golpe/Capa         | 25                       |

**Preparación de la mezcla**

- Se tamizó el suelo natural a través del tamiz N° 4 (4.75  $\mu$ m) y el suelo pasante es el utilizado en el ensayo. Se pesó el suelo natural (2500 gr) y la ceniza de fibra de fique según el porcentaje de adición (ejemplo: 1% respecto al peso del suelo).
- En un recipiente se mezcló el suelo natural con la ceniza de fibra de fique hasta obtener una distribución homogénea, Luego, se adiciono agua (ejemplo: 5% respecto al peso del suelo) y se mezcla (INVIAS, 2012). En la figura 15 se muestra el suelo y la fibra de fique mezclados.

**Apéndice Figura 15**

*Mezcla del suelo natural con la ceniza de fibra de fique para Proctor modificado*



- c. La mezcla se esparce uniformemente en una bandeja y se dividió en cinco partes, cada una de las cuales correspondió a una capa.

### **Compactación**

- a. Se pesó el molde (también se puede pesar el molde más placa) en una balanza y se ensambló el collar de extensión. Luego, se colocó el molde en el suelo en una superficie firme para iniciar la compactación como se muestra en la figura 16 (INVIAS, 2012).

### **Apéndice Figura 16**

*Ensamblaje del molde para iniciar la compactación*



- b. Se inició la compactación colocando una quinta parte de la mezcla en el molde y aplicando 25 golpes con el pisón. Este procedimiento se repite para cada una de las cinco capas (INVIAS, 2012). En la figura 17 se observa el proceso de compactación.

### **Apéndice Figura 17**

*Compactación de cada una de las capas (25 golpes)*



- c. Al terminar la compactación de la última capa, se quitó el collar de extensión cuidadosamente y se enrazo la muestra compactada. Luego, se pesó el molde con el material como se observa en la figura 18 (INVIAS, 2012).

#### **Apéndice Figura 18**

*Enrazado y peso del molde con la muestra compactada*



- d. Con ayuda de un gato con marco, se extrajo la muestra compactada del molde y se tomó una porción de esta para llevarla al horno a  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  y determinar su contenido de humedad (INVIAS, 2012). La figura 19 muestra la extracción de la probeta.

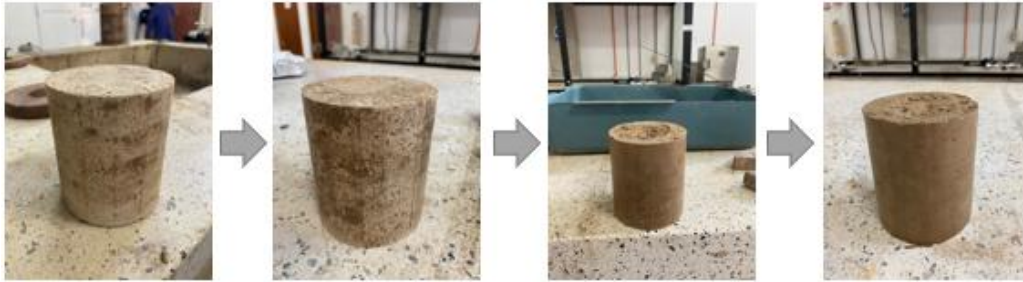
#### **Apéndice Figura 19**

*Extracción de la probeta*



- e. Este proceso se repitió para cuatro puntos, variando el porcentaje de adición de agua a la mezcla, con el fin de realizar la curva de compactación para determinar la humedad óptima y densidad seca, las cuales se utilizan en el ensayo de compresión inconfiada (INVIAS, 2012). La figura 20 muestra algunas probetas realizadas en este ensayo.

#### **Apéndice Figura 20**

*Probetas de los 4 puntos de Proctor modificado*

- f. Cálculos:** Los cálculos están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YqQ7fnqpLwIg3Skf\\_9X\\_bSR-WZuSohr/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YqQ7fnqpLwIg3Skf_9X_bSR-WZuSohr/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true)

**Protocolo del ensayo de compresión inconfiada con adición de ceniza de fibra de fique**

**Descripción del ensayo**

Se describe el proceso para determinar la resistencia a la compresión simple de un suelo CH con adición de ceniza de fibra de fique, según la norma INV E-152.

**Equipo y materiales utilizados**

La Tabla 5 presenta una descripción de los materiales utilizados en el ensayo de Proctor modificado.

**Apéndice Tabla 7***Equipo y materiales utilizados en compresión inconfiada*

| Equipo/ Materiales | Uso |
|--------------------|-----|
|--------------------|-----|

|                                         |            |          |                                                                                              |
|-----------------------------------------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arcilla, ceniza de fibra de fique, agua |            |          | Materiales para realizar la mezcla.                                                          |
| Moldes                                  |            |          | Recipiente metálico cilíndrico donde se compacta la muestra de suelo.                        |
| Tamiz N°4                               |            |          | Para seleccionar la fracción de suelo a ensayar                                              |
| Recipientes                             |            |          | Para mezclar, dividir el material por capa y almacenar muestras                              |
| Bolsas herméticas                       |            |          | Utilizadas para guardar la mezcla y conservar su humedad                                     |
| Balanza                                 |            |          | Utilizada para pesar las muestras                                                            |
| Horno (105± 5°C)                        |            |          | Para determinar contenido de humedad                                                         |
| Mezcladora mecánica                     |            |          | Para mezclar uniformemente los materiales                                                    |
| Papel vinipel transparente              |            |          | Utilizado para envolver la probeta                                                           |
| Prensa                                  | hidráulica | Controls | Para realizar la compactación se aplica la carga sobre la muestra para medir su resistencia. |
| Multiloader®                            |            |          |                                                                                              |
| Gato con marco                          |            |          | Extraer la muestra compactada del molde sin alterar su estructura                            |
| Pisón                                   |            |          | Para acomodar el material de cada capa                                                       |
| Calibrador digital                      |            |          | Medir alturas y diámetros                                                                    |

## Proceso

Inicialmente, se verificó que el suelo natural esté seco y tener en cuenta los aspectos presentados en la tabla 8.

#### Apéndice Tabla 8

##### *Condiciones para el ensayo de Compresión inconfiada*

|                    |                          |
|--------------------|--------------------------|
| Diámetro del molde | 5 cm                     |
| Altura del molde   | 10 cm                    |
| Material           | Pasa tamiz N°4 (4.75 mm) |
| Capas              | 3                        |
| Compactación/capa  | Prensa hidráulica        |

#### **Preparación de la mezcla**

- Se tamizó el suelo natural a través del tamiz N° 4 (4.75  $\mu\text{m}$ ) y el suelo pasante es el utilizado en el ensayo. Luego, se pesó el suelo natural (Masa de sólidos), la ceniza de fibra de fique según el porcentaje de adición (ejemplo: 1% respecto al peso del suelo) y el agua de acuerdo a la humedad óptima obtenida en el ensayo de Proctor modificado.
- En un recipiente se mezcló el suelo natural con la ceniza de fibra de fique hasta obtener una distribución homogénea, luego, se introdujo en la mezcladora mecánica del laboratorio y se procedió a mezclar el suelo agregando gradualmente la cantidad de agua requerida. La figura 21 muestra el proceso de mezclado de los materiales.

#### **Apéndice Figura 21**

##### *Preparación de la mezcla de compresión inconfiada*





- c. La mezcla se guardó en una bolsa hermética para conservar su humedad. Posteriormente, se pesó la muestra total y se dividió la masa correspondiente a cada capa para iniciar la compactación como se observa en la figura 22.

#### **Apéndice Figura 22**

*Mezcla lista para iniciar la compactación de cada capa del ensayo de compresión inconfiada*



#### **Compactación en prensa hidráulica Controls Multiloader®**

- a. Se ensambló el molde con su collarín y se colocó papel filtro en la base. Luego, se aplicó aceite desmoldante en el molde utilizando una brocha. Posteriormente, se introdujo la mezcla correspondiente a la primera capa y se acomodó con un pisón. Se midieron cuatro alturas libres (se promedian y se determina el desplazamiento necesario de la capa) desde el borde superior del collarín utilizando un calibrador digital. Para la segunda y tercera capa, se repite el mismo procedimiento descrito anteriormente.
- b. Se realizó el ensamblaje de la prensa hidráulica Controls Multiloader® y se ajustó el molde como se observa en la figura 23.

#### **Apéndice Figura 23**

*Ensamblaje de la máquina para iniciar la compactación*

- c. Se accedió a la pantalla digital “canal 1”, luego al ensayo “Compactación estática” y se inició a hacer la compactación de cada una de las capas.

**Apéndice Figura 24***Configuración de compactación estática en la prensa hidráulica Controls Multiloader®*

- d. La mezcla que sobró se pesó y se llevó al horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  para determinar su contenido de humedad.
- e. Al terminar la compactación de todas las capas, se dejó en curado durante aproximadamente 5 horas a temperatura ambiente. Luego, se extrajo cuidadosamente la muestra compactada del molde.
- f. La probeta se envolvió cuidadosamente en papel vinipel para hacer la toma de medidas. Se realizaron 6 mediciones de altura y 12 de diámetro (4 diámetros de la parte superior, media

e inferior), Luego, se pesó la probeta. La figura 25 muestra la probeta de compresión confinada.

#### **Apéndice Figura 25**

*Probeta de compresión confinada envuelta en papel vinipel*

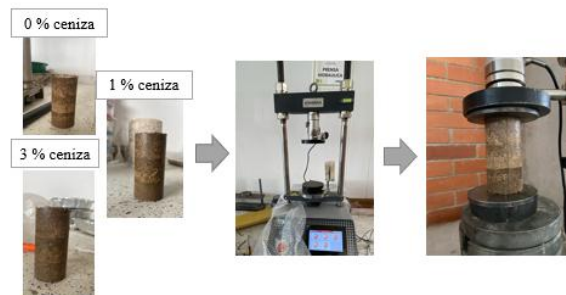


#### **Ensayo en prensa hidráulica Controls Multiloader®**

- Antes de iniciar el ensayo, se retiró el papel vinipel de la probeta. Luego, se realizó el ensamble de la prensa hidráulica Controls Multiloader® y se colocó la probeta en la máquina como se muestra en la figura 26.

#### **Apéndice Figura 26**

*Probetas del ensayo de compresión confinada y ensamble de la máquina*



- b. Se accedió a la pantalla digital “canal 1” y luego, al ensayo “UCS”
- c. Se ejecutó el ensayo y se registró la carga y deformación hasta que la muestra fallo (se agrieta, colapse o la carga disminuya). La figura 27 muestra el ensayo de compresión inconfiada.

#### Apéndice Figura 27

*Ensayo de compresión inconfiada en la prensa hidráulica Controls Multiloader®*



- d. **Cálculos:** Los cálculos están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS.

[https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YqQ7fnqpLwIg3Skf\\_9X\\_bSR-](https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YqQ7fnqpLwIg3Skf_9X_bSR-WZuSohr/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true)

[WZuSohr/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/spreadsheets/d/12YqQ7fnqpLwIg3Skf_9X_bSR-WZuSohr/edit?usp=sharing&ouid=113467239697860495144&rtpof=true&sd=true)