

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Montaje experimental para ensayo de suelos reforzados con fibra

Carlos David Vélez Loaiza

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 12 de febrero de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Montaje experimental para ensayo de suelos reforzados con fibra

Carlos David Vélez Loaiza

Nombre del profesor, Título académico

Juan Pablo Villacreses, PhD

Quito, 12 de febrero de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Carlos David Vélez Loaiza

Código: 00215935

Cédula de identidad: 1721494738

Lugar y fecha: Quito, 12 de febrero de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se centra en la implementación de un montaje experimental para analizar el impacto de las fibras en la resistencia de los suelos. Se desarrollaron dos prototipos iniciales utilizando tecnología de impresión 3D y polipropileno. Las dimensiones preliminares se basaron en las especificaciones del profesor (Tang et al., 2016) de la Universidad de Nanjing, según su estudio "Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil". La primera serie del prototipo, compuesto por los moldes de tensión y el pistón compactador, reveló limitaciones de tamaño que dificultaban la observación precisa de la rotura de la muestra.

En respuesta, se ajustaron las dimensiones de los moldes para mantener el mismo ángulo y controlar la falla en una zona específica. El diseño final incorporó el segundo prototipo, al cual se le añadió una cuarta pieza para facilitar el desmolde de la muestra. Los moldes definitivos se fabricaron en acero A36 para garantizar durabilidad, resistencia y facilidad de manejo. Tras la construcción de las piezas, se llevó a cabo el ensamblaje y la prueba de dos muestras de suelo: una sin fibras y otra con fibras, con el fin de obtener las curvas de esfuerzo vs. deformación de las mismas. Los resultados revelaron una mejora en la capacidad de deformación de la muestra con fibras, demostrando un comportamiento superior a tensiones aplicadas.

Palabras clave: Montaje experimental, fibras en los suelos, prototipos, impresión 3D, tensión en los suelos, esfuerzo vs. deformación.

ABSTRACT

The present research work focuses on the implementation of an experimental setup to analyze the impact of fibers on the strength of soils. Two initial prototypes were developed using 3D printing technology and polypropylene. Preliminary dimensions were based on the specifications of Professor (Tang et al., 2016) of Nanjing University, according to their study "Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil". The first series of the prototype, consisting of the tension molds and the compacting piston, revealed size limitations that made it difficult to accurately observe sample breakage.

In response, the dimensions of the molds were adjusted to maintain the same angle and control failure in a specific area. The final design incorporated the second prototype, to which a fourth piece was added to facilitate sample release. The final molds were made of A35 steel to ensure durability, strength and ease of handling. After the construction of the pieces, two soil samples were assembled and tested: one without fibers and the other with fibers, in order to obtain the stress vs. strain curves of the samples. The results revealed an improvement in the deformation capacity of the sample with fibers, demonstrating a superior behavior at applied stresses.

Key words: Experimental setup, fibers in soils, prototypes, 3D printing, stress in soils, stress vs. strain.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	10
Desarrollo del Tema.....	11
Pre- dimensionamiento y fabricado de moldes	11
Calibración anillo de carga.....	13
Preparación de especímenes.....	14
Ensayo sin fibra	16
Ensayo con fibra	18
Discusión de resultados	20
Comparación caso de estudio.....	21
Conclusiones	22
Referencias bibliográficas	24
Anexo A: PROTOTIPO INICIAL	25
Anexo B: PROTOTIPO 2 Y MOLDE FINAL.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Dimensiones dado compactador.....	15
Tabla 2- Dimensiones placa desmolde	16
Tabla 3- Cantidad de suelo y volumen utilizado	16
Tabla 4- Comprobación de densidad ensayo sin fibra	16
Tabla 5- Comprobación de densidad ensayo con fibra.....	18

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura # 1- Escaneo y modelado 3D de la maquina	11
Figura # 2- Prototipo 1	12
Figura # 3- Prototipo 2	12
Figura # 4- Prototipo final.....	13
Figura # 5- Carga vs. deformación a tensión del anillo de carga.....	14
Figura # 6- Densidad seca vs. Humedad suelo"La Cerámica"	15
Figura # 7- Montaje experimental.....	17
Figura # 8- Probeta ensayo sin fibra	18
Figura # 9- Esfuerzo vs. Deformación ensayo sin fibra.....	18
Figura # 10- Fibra sintética utilizada	19
Figura # 11- Preparación y compactación de probeta con fibra	20
Figura # 12- Probeta ensayo con fibra	20
Figura # 13- Esfuerzo vs. Deformación ensayo con fibra	20
Figura # 14- Comparación caso de estudio y montaje experimental ensayo sin fibra.....	21
Figura # 15- Comparación caso de estudio y montaje experimental ensayo con fibra....	Error!

Bookmark not defined.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio de investigación tiene como objetivo analizar el impacto de la incorporación de fibras sintéticas como refuerzo en probetas de suelo. La literatura existente sugiere que la inclusión de fibras tiene un efecto significativo en la mejora de las propiedades de ingeniería de los suelos. Según Consoli et al. (2003), "la adición de fibras aumenta la resistencia máxima al cizallamiento y la ductilidad de los suelos bajo cargas estáticas".

La falta de maquinaria especializada en el laboratorio ha impulsado la propuesta de un montaje experimental. Inspirados en el modelo propuesto por Tang et al. (2016), buscamos diseñar un sistema que permita evaluar la contribución de estos filamentos al comportamiento del suelo en el laboratorio de la Universidad San Francisco de Quito.

La importancia de este tema, aún poco explorado en el país, radica en que "el objetivo principal del refuerzo de la masa de suelo es mejorar su estabilidad, aumentar su capacidad de carga y reducir los asentamientos y deformaciones laterales" (Hejazi et al., 2012). Estos parámetros son críticos en diversas aplicaciones de ingeniería civil, como la estabilidad de taludes, el refuerzo de terraplenes y la mejora en la capacidad de carga.

A lo largo de este documento, se detallarán los moldes diseñados con el propósito de obtener curvas de esfuerzo vs. deformación de las muestras de suelo sometidas a tensión, comparando dos escenarios: uno sin fibras y otro con un 0.25% de fibras en peso de la muestra. Este enfoque permitirá analizar de manera precisa el impacto de las fibras sintéticas en las propiedades mecánicas del suelo.

DESARROLLO DEL TEMA

Pre- dimensionamiento y fabricado de moldes

Inicialmente, se empleó un escáner 3D para determinar las dimensiones de la máquina destinada al ensamblaje de los moldes para los ensayos de suelo reforzado con fibras. Este análisis buscaba identificar el espacio disponible entre el plato y el anillo de carga, proporcionando así las dimensiones máximas estimadas para los moldes. El modelo tridimensional resultante de la máquina sirvió como base para el diseño posterior de los moldes.



Figura # 1- Escaneo y modelado 3D de la maquina

Para el primer prototipo, se optó por utilizar los moldes descritos en el estudio del profesor Tang et al., detallado en el paper "Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil," que sirve como base para nuestro montaje experimental. Sin embargo, las dimensiones propuestas resultaron pequeñas en comparación con el espacio disponible entre el plato y el anillo de carga de la máquina. La figura adjunta muestra un juego de tres piezas, indicando que la muestra no encajaría adecuadamente en el molde, ya que carece de una placa de retención del suelo. Por lo tanto, se realizaron ajustes para lograr un montaje funcional y dimensiones más acordes con las características de la máquina.



Figura # 2- Prototipo 1

Para el segundo prototipo, se ampliaron las dimensiones de los moldes y se introdujo una cuarta pieza, una placa adicional, con el objetivo de facilitar el proceso de desmolde. La incorporación de esta placa resuelve el problema observado en el primer prototipo, permitiendo que el suelo quede retenido en el molde de manera efectiva. Además, el aumento en las dimensiones proporciona una mayor trabajabilidad y mejora la visualización de la zona de falla. La figura adjunta ilustra los ajustes realizados. Es crucial destacar que se mantuvo constante el ángulo de falla entre los moldes superior e inferior en ambos prototipos, asegurando así un control preciso de la falla. Este enfoque se basa en el estudio presentado por el profesor Tang et al.



Figura # 3- Prototipo 2

Tras la validación efectiva del segundo prototipo, se procedió a fabricar los moldes en acero A36, reemplazando el material inicial de polipropileno. Esta elección se basó en la necesidad de otorgar durabilidad, resistencia a la carga a tensión y precisión en el corte, aspectos mejor logrados con el acero en comparación con el polipropileno. El diseño final, ilustrado en la figura adjunta, incluye acoples en la parte superior e inferior de los moldes para sujeción al anillo de carga y la placa base, permitiendo así la realización de ensayos de suelo. Las dimensiones detalladas de ambos prototipos se encuentran en la sección de anexos.



Figura # 4- Prototipo final

Calibración anillo de carga

Para llevar a cabo el ensayo, el primer paso consistió en verificar la calibración a tensión del anillo de carga de la máquina. Para realizar esta comprobación, se construyó una bandeja que actuará como soporte para los pesos que se añadirán, generando así la curva de carga vs. deformación del anillo. Obteniendo:

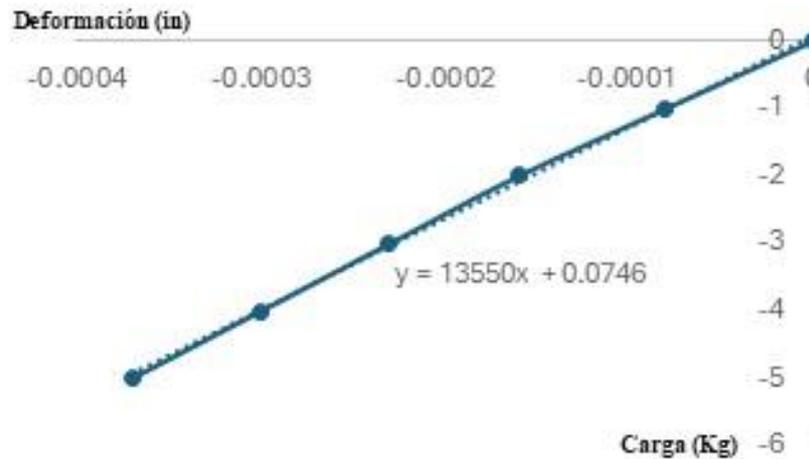


Figura # 5- Carga vs. deformación a tensión del anillo de carga

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos, al incrementar la carga, se observa un aumento proporcional en la deformación, evidenciando una relación lineal entre ambos parámetros. Esta tendencia sugiere que la máquina se encuentra correctamente calibrada para realizar pruebas de tensión de manera precisa. La linealidad en la relación entre la carga y la deformación es un indicador clave de la confiabilidad y precisión de la máquina, proporcionando una base sólida para los siguientes pasos del ensayo.

Preparación de especímenes

Se seleccionó inicialmente un suelo previamente estudiado en el laboratorio universitario, al cual se le ha realizado pruebas como el ensayo Proctor que permitieron establecer la campana de compactación de la muestra, obteniendo que su densidad máxima es de 1.77 gr/cm³ a una humedad óptima de 14%:

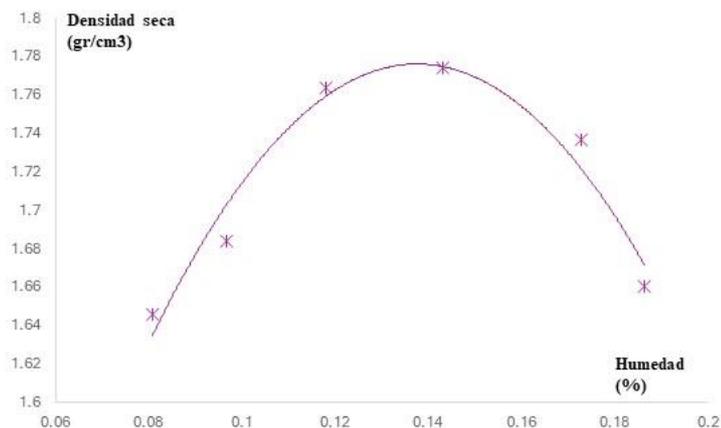


Figura # 6- Densidad seca vs. Humedad suelo "La Cerámica"

Para la preparación de las probetas de suelo, se estableció una densidad objetivo de 1.7 gr/cm³. A partir de los resultados del gráfico, se llevó a cabo una interpolación de los valores, determinando que para alcanzar nuestra densidad objetivo se requeriría trabajar con un contenido de humedad del 10.39%. Esto se traduce en la adición de 124.7 mL de agua a nuestra muestra. La muestra fue dividida en dos partes iguales para realizar dos ensayos: el primero sin fibras y el segundo con fibras.

Previo a la colocación del suelo en los moldes, se procedió a determinar el volumen de los mismos con el fin de calcular la cantidad exacta de suelo necesaria. Este proceso garantizó que la densidad objetivo se mantuviera constante durante el proceso de compactación. Los valores obtenidos se detallan a continuación: [proporcionar los valores obtenidos]. Este enfoque meticuloso en la preparación asegura la consistencia en las condiciones de ensayo, permitiendo una comparación precisa entre las probetas sin fibras y aquellas reforzadas con fibras sintéticas.

Tabla 1- Dimensiones dado compactador

Dado		
Area rect	50	cm ²
Area trap	37.5	cm ²
Espesor dado	4	cm
Volumen dado	700	cm ³

Tabla 2- Dimensiones placa desmolde

Placa desmolde		
Area rect	50	cm ²
Area trap	37.5	cm ²
Espesor	2	cm
Volumen desmolde	350	cm ³

Tabla 3- Cantidad de suelo y volumen utilizado

Masa total	1200	g
Volumen Molde	350	cm ³

Ensayo sin fibra

Con la muestra preparada, se introdujo el suelo en el molde para verificar la conservación de la densidad durante la compactación. Se pesaron los moldes con todas las piezas del ensamble, tanto sin suelo como con suelo, evidenciando una leve reducción de densidad al compactar. No obstante, esta disminución fue mínima y se considera permisible. Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

Tabla 4- Comprobación de densidad ensayo sin fibra

ENSAYO SIN FIBRA			Comprobacion de densidad		
Masa molde	595	g	Peso sin suelo	6238	g
Volumen Molde	350	cm ³	Peso con suelo	6832	g
Densidad	1.70	g/cm ³	Diferencia	594	g
			Densidad	1.697	g/cm ³

Con la muestra ya lista, se procedió a hacer el ensamble, el cual se indica en la siguiente figura:



Figura # 7- Montaje experimental

El montaje experimental se compone de varios elementos, incluyendo los moldes superior e inferior, la placa de desmolde, el anillo de carga, la pinza sujetadora y el deformímetro. Durante la ejecución del ensayo, se realizaron ajustes tanto en el deformímetro como en el anillo de carga.

En el siguiente paso del procedimiento, con la muestra de suelo debidamente ubicada en los moldes, se procedió a descender el plato manteniendo una carga constante, registrando simultáneamente los valores de deformación y carga. Posteriormente, se llevó a cabo la conversión de las cargas en esfuerzos, dividiendo por el área correspondiente a la zona de falla. Los resultados obtenidos se presentan a continuación: [Incluir datos específicos]. Este enfoque meticuloso en la instrumentación y ejecución del ensayo garantiza la obtención de datos confiables y precisos sobre el comportamiento de las probetas de suelo, tanto aquellas sin fibras como las reforzadas con fibras sintéticas.



Figura # 8- Probeta ensayo sin fibra

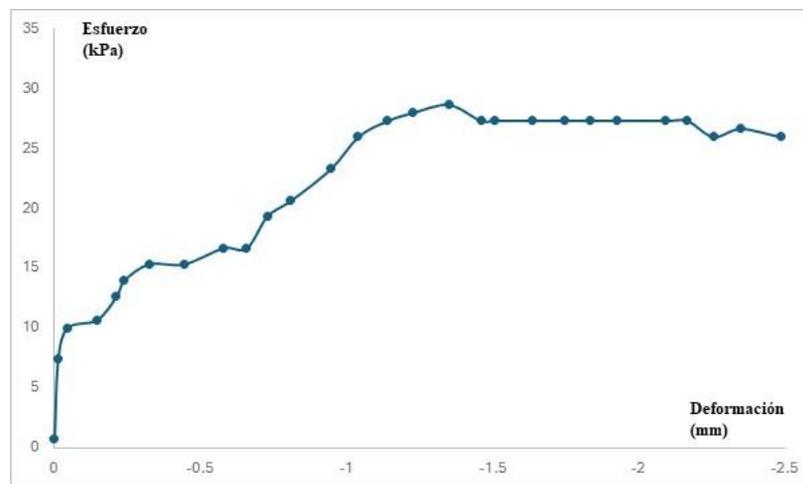


Figura # 9- Esfuerzo vs. Deformación ensayo sin fibra

Ensayo con fibra

Para el ensayo con fibra, se repite el mismo procedimiento anterior, solo que ahora se coloca fibra al 0.25% del peso del suelo, dando como resultado:

Tabla 5- Comprobación de densidad ensayo con fibra

ENSAYO CON FIBRA			Comprobacion de densidad		
Masa molde	595	g	Peso sin suelo	6238	g
Volumen Molde	350	cm ³	Peso con suelo	6828	g
Densidad	1.70	g/cm ³	Diferencia	590	g
			Densidad	1.686	g/cm ³

Es importante destacar que, en el ensayo con fibra, de la masa total, únicamente 593.5 gramos corresponden al suelo, mientras que 1.5 gramos corresponden a la fibra. Esta proporción explica la reducción en la densidad del ensayo con fibra. Al utilizar fibra sintética, su peso es

prácticamente imperceptible, por lo que se empleó una gramera de precisión para obtener la cantidad de fibra deseada.



Figura # 10- Fibra sintética utilizada

La fibra utilizada en este estudio fue fabricada mediante impresión 3D, constituyendo así una fibra sintética. En el proceso experimental, dicha fibra se incorporó al suelo de manera aleatoria. Posteriormente, la muestra se compactó utilizando un dado, tal como se ilustra en la figura adjunta. Este método de mezcla y compactación asegura una distribución homogénea de las fibras en el suelo, lo que es esencial para evaluar de manera precisa su impacto en las propiedades mecánicas de la muestra durante el ensayo. La figura proporciona una visualización clara del procedimiento llevado a cabo en la preparación de las probetas con fibras sintéticas.



Figura # 11- Preparación y compactación de probeta con fibra

Los resultados del ensayo con fibra se muestran a continuación:



Figura # 12- Probeta ensayo con fibra

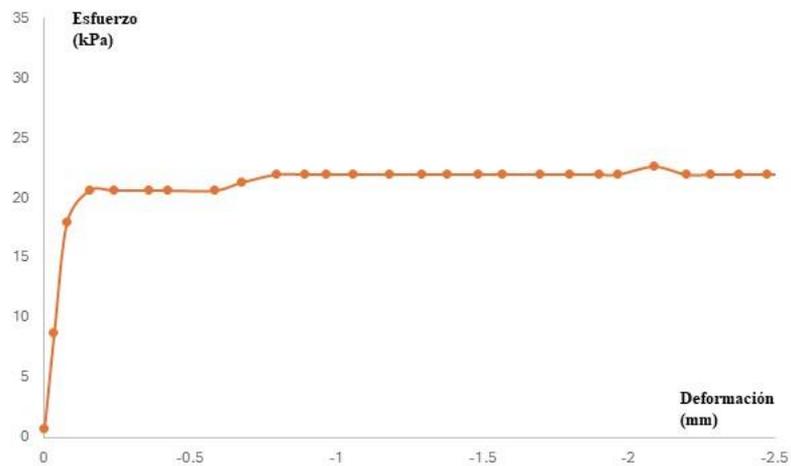


Figura # 13- Esfuerzo vs. Deformación ensayo con fibra

Discusión de resultados

Las gráficas obtenidas revelan una significativa influencia de la densidad en los resultados. Aunque la muestra sin fibra resistió más esfuerzo, la ligera diferencia de densidad entre ambas probetas, con la muestra sin fibra siendo menos densa, explica la variación de 6 kPa en el esfuerzo entre ambos resultados.

Por otro lado, se destaca la mejora evidente en la deformación al introducir fibras. La muestra con fibra experimentó una deformación mucho mayor que la muestra sin fibra, indicando una

mejora positiva en la deformabilidad. Esta mejora se traduce en una deformación más controlada, como se evidencia en la gráfica con fibra, donde la deformación es más lineal y gradual en comparación con la mayor volatilidad observada en el ensayo sin fibra.

Es importante señalar que ambos ensayos consideraron el punto de falla al observar una grieta significativa entre los moldes superior e inferior. Se recomienda asegurar la verticalidad del montaje asegurando el anillo en la parte superior de la máquina. Además, la pinza naranja desempeña un papel crucial, garantizando que al descender el plato, el anillo solo cargue la muestra de suelo, evitando mediciones incorrectas.

Comparación caso de estudio

Al concluir, se compararon los resultados obtenidos con los casos de estudio mediante la representación gráfica de los datos del escrito frente a los resultados del montaje experimental. Los resultados se detallan a continuación:

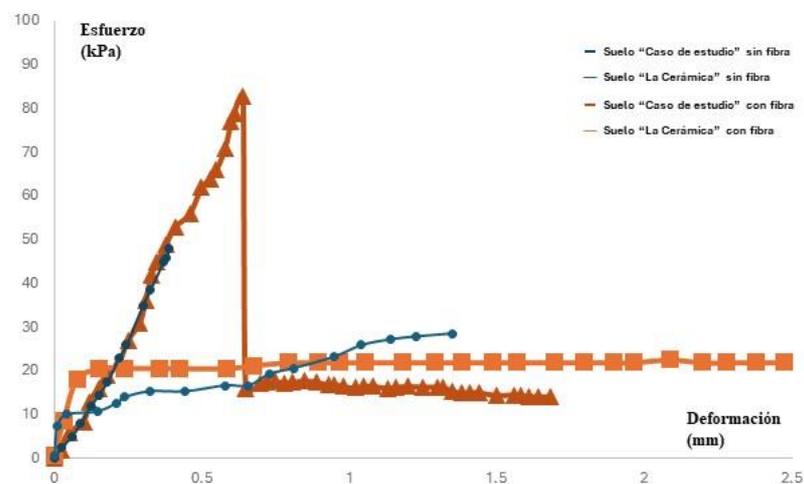


Figura # 14- Comparación resultados sin y con fibra

Al comparar los resultados obtenidos en nuestro montaje experimental con el caso de estudio, se observa inicialmente que el suelo utilizado por el profesor Tang et al. presenta propiedades superiores, ya que logra soportar mayores cargas. Esta disparidad podría indicar que el suelo en el caso de estudio se asemeja más a una roca, lo que le confiere mayor resistencia a los esfuerzos.

Al analizar los resultados por separado, en el ensayo sin fibra, se nota que en el caso de estudio no se evidencia la disminución de la deformación con la carga. Esto podría deberse al criterio de falla empleado, ya que los resultados se reportan solo hasta el valor máximo antes de la fisuración del suelo. En nuestro montaje experimental, consideramos el criterio de falla cuando la muestra mostraba una grieta visible, lo que puede explicar las diferencias. Sin embargo, ambas tendencias coinciden, ya que la deformación tiende a aumentar con el esfuerzo.

En el ensayo con fibra, el caso de estudio empleó una concentración del 0.5% de fibra en comparación con el 0.25% en nuestro montaje experimental. Esto puede explicar por qué la muestra con fibra en el caso de estudio resistió más esfuerzo que la muestra sin fibra, a diferencia de nuestro montaje, donde la cantidad de fibra puede haber sido insuficiente para mejorar significativamente la resistencia del suelo.

En conclusión, ambos casos de ensayo con fibra demuestran la mejora en la deformación controlada después de superar el esfuerzo máximo, indicando que la fibra contribuye positivamente a la resistencia del suelo en ambas situaciones.

CONCLUSIONES

En conclusión, el montaje experimental ha alcanzado con éxito el objetivo propuesto al proporcionar un sistema que permite analizar el impacto de las fibras en las muestras de suelo.

Los resultados obtenidos respaldan la idea de que las fibras contribuyen positivamente a la capacidad a tensión de los suelos, mejorando su deformabilidad durante los ensayos.

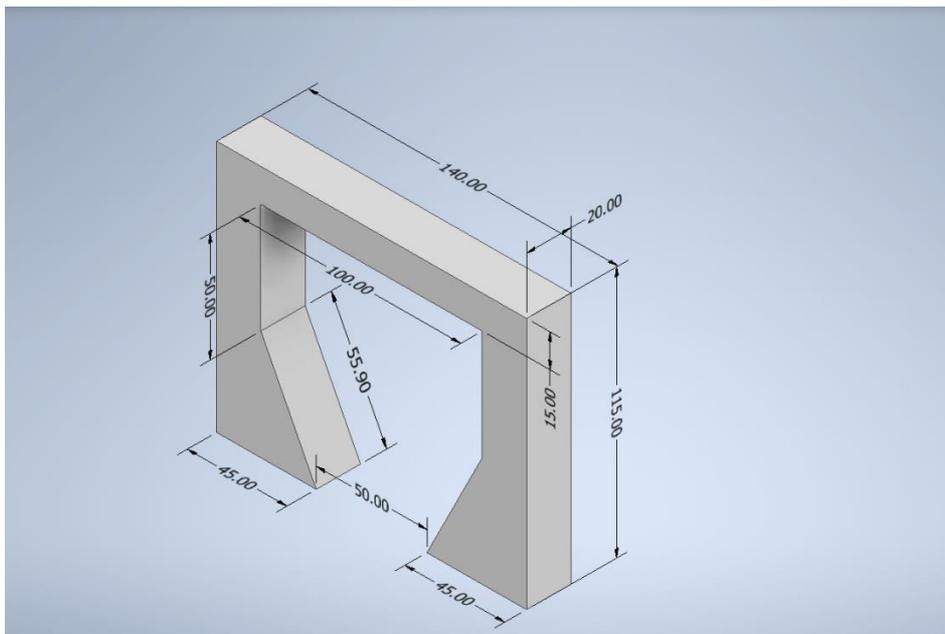
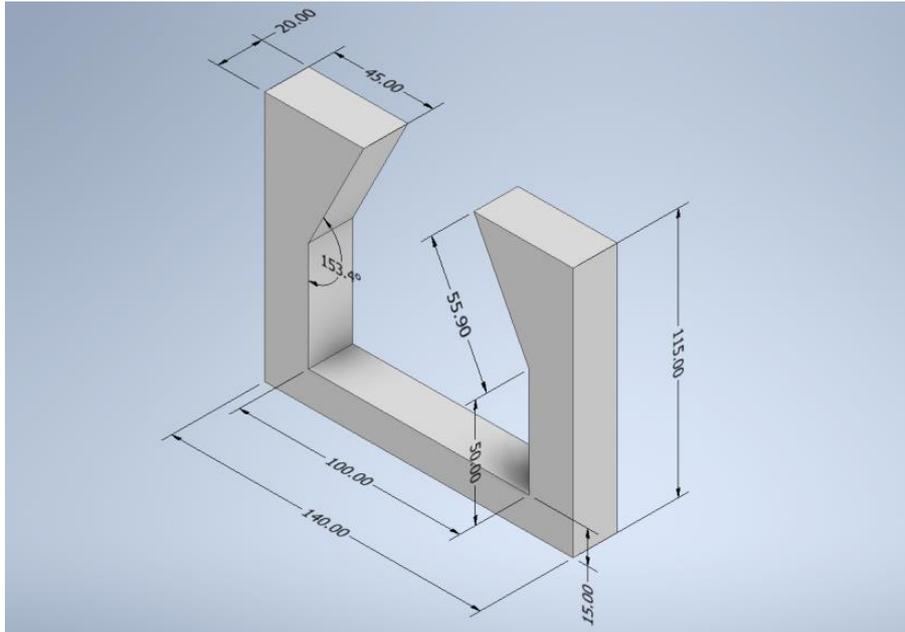
Desde una perspectiva laboral, este tema, aún poco explorado en el país, posee diversas aplicaciones prácticas. La literatura existente respalda la noción de que el uso de fibras puede mejorar significativamente la capacidad a tensión de los suelos, lo que tiene implicaciones importantes para la estabilización de taludes, el fortalecimiento de terraplenes y otras aplicaciones geotécnicas.

Considerando la topografía montañosa de Ecuador y su fase de desarrollo, continuar investigando el impacto de las fibras en el suelo es una alternativa valiosa. La posibilidad de idear un sistema clasificatorio para los suelos del país, así como determinar el porcentaje óptimo de uso de fibras en diferentes aplicaciones, puede tener un impacto significativo en proyectos de ingeniería civil y geotécnica.

Como proyección futura, se sugiere contrastar el impacto de fibras naturales y sintéticas, evaluando el porcentaje más eficiente para cada tipo de fibra. Con el diseño de los moldes y la confirmación de la viabilidad de realizar ensayos a tensión con y sin fibras, este trabajo sienta las bases para investigaciones más avanzadas en este campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chowdary, B., Ramanamurty, V. & Pillai, R. (2020). *Fiber reinforced geopolymer treated soft clay – An innovative and sustainable alternative for soil stabilization*. ELSEVIER. Volumen 32, Parte 4, Páginas 777- 781. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.574>
- Consoli, N., Casagrande, M., Prietto, P. & Thomé, A. (2003). *Plate Load Test on Fiber-Reinforced Soil*. ASCE Library. Volumen 129, No. 10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:10\(951\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:10(951))
- Hejazi, S., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. & Zadhoush, A. (2011). *A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers*. ELSEVIER. Volumen 30, Páginas 100- 116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Tang, C., Wang, D., Cui, Y., Shi, B. & Li, J. (2016). *Tensile Strength of Fiber-Reinforced Soil*. Volumen 28, No. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001546](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001546)



ANEXO B: PROTOTIPO 2 Y MOLDE FINAL

