

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Análisis comparativo del efecto de la morfología de fibras artificiales en el refuerzo de suelo granular bajo la aplicación de cargas.**

**Christopher Luis Andrade Orellana**

**Ingeniería Civil**

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

Quito, 30 de noviembre de 2024

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Análisis comparativo del efecto de la morfología de fibras artificiales en el refuerzo de suelo granular bajo la aplicación de cargas.**

**Christopher Luis Andrade Orellana**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Laura Ibagón, M.Sc.**

Quito, 30 de noviembre 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: Christopher Luis Andrade Orellana

Código: 00206428

Cédula de identidad: 0704780709

Lugar y fecha: Quito, 30 de noviembre 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## **UNPUBLISHED DOCUMENT**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

En el presente proyecto se aborda una alternativa para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de un suelo granular proveniente de un proyecto de construcción en el sector de La Cerámica, en el valle de Tumbaco, mediante la adición de fibras de ácido poliláctico. Se analiza el efecto de la variación de la morfología de las fibras, con un enfoque en cohesión geométrica. Se definen tres formas de fibra, una alargada empleada como base, una variación a la que se agregó 2 ramificaciones en sus extremos y otra con 4 ramificaciones, todas las ramificaciones tienen una inclinación de 45 grados.

La metodología empleada incluye ensayos de laboratorio de compresión inconfiada a muestras cilíndricas de suelo, con ello se obtuvieron curvas de esfuerzo-deformación con refuerzo y sin refuerzo para obtener valores de esfuerzo máximo y módulo de elasticidad. Además, se realizaron ensayos de propagación de ondas longitudinales con el objetivo de medir el módulo dinámico de las muestras.

Se realizó un análisis comparativo de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio a fin de encontrar una forma que permita ahorrar material, aumente la resistencia del suelo, su módulo de elasticidad y módulo dinámico.

En cuanto a resistencia, las fibras de 40 mm y dos ramificaciones destacaron como la combinación más óptima, logrando un incremento de hasta un 54.86% en la resistencia con un 0.3% de fibra. Por otro lado, las longitudes más cortas 20 mm y el porcentaje más bajo ensayado de 0.1%, presentaron los aportes más bajos.

El análisis del módulo de elasticidad revela que las fibras de 40 mm con dos ramificaciones a 0.2% sobresalieron con un incremento del 8.48% en el módulo de elasticidad en comparación con el suelo sin fibras, siendo la configuración más efectiva.

Por otro lado, las longitudes diferentes a 40mm, 20 mm y 30 mm, no lograron incrementos significativos y, en algunos casos, presentaron decrementos en el módulo de elasticidad. Las configuraciones con diferentes porcentajes de fibras a 0.2% como 0.1% y 0.3%, limitaron los incrementos.

El análisis del módulo dinámico evidencia que la incorporación de fibras genera reducciones significativas en comparación con el suelo sin fibras. De las configuraciones destacan las fibras de 40 mm con dos ramificaciones al 0.2% que obtuvieron la menor reducción, con un 23.53%. Para el 0.3% de fibras, las reducciones fueron incluso mayores, llegando hasta un 40.01% con fibras simples.

**Palabras clave:** suelo, propiedades mecánicas, fibras, morfología, compresión inconfiada, cohesión geométrica, módulo de elasticidad, módulo dinámico.

## ABSTRACT

This project addresses an alternative for improving the mechanical properties of granular soil from a construction project in the La Cerámica sector, in the Tumbaco valley, by adding polylactic acid fibers. The effect of the variation in the morphology of the fibers is analyzed, with a focus on geometric cohesion. Three fiber shapes are defined: an elongated one used as a base, a variation to which 2 branches were added at its ends, and another with 4 branches. All branches have an inclination of 45 degrees.

The methodology used includes laboratory tests of unconfined compression on cylindrical soil samples, with stress-strain curves obtained with and without reinforcement to obtain maximum stress and modulus of elasticity values. In addition, longitudinal wave propagation tests were performed to measure the samples' dynamic modulus.

A comparative analysis of the results obtained from the laboratory tests was carried out in order to find an optimal form that allows saving material, increasing the soil's resistance, its modulus of elasticity, and dynamic modulus.

In terms of resistance, the 40 mm and two-branch fibers stood out as the most optimal combination, achieving an increase of up to 54.86% in resistance with 0.3% fiber. On the other hand, the shortest length 20 mm, and the lowest percentage tested of 0.1%, presented the lowest contributions.

The analysis of the modulus of elasticity reveals that the 40 mm fibers with two branches at 0.2% stood out with an increase of 8.48% in the elastic modulus compared to the soil without fibers, being the most effective configuration.

On the other hand, lengths of 20 mm and 30 mm did not achieve significant increases and, in some cases, presented decreases in the elastic modulus. Configurations with different percentages of fibers than 0.2% like 0.1% and 0.3%, limited the increases.

The analysis of the dynamic modulus shows that the incorporation of fibers generates significant reductions compared to the soil without fibers. Of the configurations, the 40 mm fibers with two branches at 0.2% obtained the lowest reduction, with 23.53%. For the 0.3% fibers, the reductions were even greater, reaching up to 40.01% with single fibers.

**Keywords:** soil, mechanical properties, fibers, morphology, unconfined compression, geometric cohesion, modulus of elasticity, dynamic modulus.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
DESARROLLO DEL TEMA .....	15
Suelo y zona de estudio.....	15
Granulometría mecánica.....	16
Humedad óptima.....	17
Fibra sintética.....	18
Material de fibra.....	18
Morfología de fibras .....	19
Fibras de 20 mm de Longitud .....	20
Fibras de 30 mm de Longitud .....	21
Fibras de 40 mm de Longitud .....	22
Metodología .....	23
Molde y muestra .....	23
Compresión Inconfinada.....	25
Propagación de Ondas.....	29
Resultados .....	32
Curvas Efuerzo – Deformación .....	32
Módulo de Elasticidad .....	38
Módulo Dinámico .....	38
CONCLUSIONES .....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

ANEXO A: PLANO REALIZADO EN AUTODESK “AUTOCAD” DE FIBRA SIN RAMAS. ....	49
ANEXO B: PLANO REALIZADO EN AUTODESK “AUTOCAD” DE FIBRA CON 2 RAMAS. ....	50
ANEXO C: PLANO REALIZADO EN AUTODESK “AUTOCAD” DE FIBRA CON 4 RAMAS. ....	51
ANEXO D: GRANULOMETRÍA MECÁNICA EN EL LABORATORIO. ....	52
ANEXO E: ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA. ....	53
ANEXO F: DISEÑO E IMPRESIÓN 3D. ....	54
ANEXO G: ENSAYO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS. ....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 20mm al 0.2% de Fibra. ....	27
Tabla 2. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 30mm al 0.2% de Fibra. ....	27
Tabla 3. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.2% de Fibra. ....	28
Tabla 4. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.1% de Fibra. ....	28
Tabla 5. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.3% de Fibra. ....	28
Tabla 6. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 20mm de Longitud al 0.2% de Cantidad. ....	33
Tabla 7. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 30mm de Longitud al 0.2% de Cantidad. ....	33
Tabla 8. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.2% de Cantidad. ....	34
Tabla 9. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.1% de Cantidad. ....	35
Tabla 10. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.3% de Cantidad. ....	36
Tabla 11. Módulo Dinámico en Fibras de 20mm de Longitud al 0.2% de cantidad. ....	39
Tabla 12. Módulo Dinámico en Fibras de 30mm de Longitud al 0.2% de cantidad. ....	40
Tabla 13. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.2% de cantidad. ....	41
Tabla 14. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.1% de cantidad. ....	42
Tabla 15. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.3% de cantidad. ....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Suelos. Quito. Sector Tumbaco, suelo tipo H10; limoso con presencia de arena muy fina.....	15
Figura 2. Curva Granulométrica. ....	16
Figura 3. Curva de Compactación. ....	18
Figura 4. Rollo de PLA + Marca Sunlu. ....	18
Figura 5. Prototipos Impresos. ....	19
Figura 6. Forma Simple de longitud 20mm. ....	21
Figura 7. Forma Con 4 Ramas de longitud 20mm.....	21
Figura 8. Forma Simple de longitud 30mm. ....	21
Figura 9. Forma Con 2 Ramas de longitud 30mm.....	22
Figura 10. Forma Con 4 Ramas de longitud 30mm.....	22
Figura 11. Forma Simple de Longitud 40mm.....	22
Figura 12. Forma con 2 Ramas de Longitud 40mm. ....	23
Figura 13. Forma con 4 Ramas de Longitud 40mm. ....	23
Figura 14. Molde Cilíndrico de Diámetro 50mm. ....	24
Figura 15. Muestra de Suelo Compactado.....	24
Figura 16. Fibras Simples de 40mm de Longitud en un Medio Continuo tipo Suelo. ....	25
Figura 17. Ensayo de Compresión Inconfinada.....	26
Figura 18. Equipo Pundit Lab de Ultrasonidos.....	29
Figura 19. Osciloscopio Digital de Laboratorio. ....	30
Figura 20. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 20mm al 0.2% en Cantidad.....	32

Figura 21. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 30mm al 0.2% en Cantidad.....	33
Figura 22. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.2% de Cantidad.....	34
Figura 23. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.1% de Cantidad.....	35
Figura 24. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.3% de Cantidad.....	36
Figura 25. Gráfico de Barras Esfuerzo Kg/cm <sup>2</sup> y Longitud de Fibra.....	37
Figura 26. Gráfico de Barras Módulo de Elasticidad KPa y Longitud de Fibra.....	38
Figura 27. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 20mm al 0.2% de Cantidad.....	39
Figura 28. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 30mm al 0.2% de Cantidad.....	40
Figura 29. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.2% de Cantidad.....	41
Figura 30. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.1% de Cantidad.....	42
Figura 31. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.3% de Cantidad.....	43
Figura 32. Gráfico de Barras Comparativo de Módulo Dinámico para Todos los Casos Analizados.....	44

## INTRODUCCIÓN

El suelo es la base de todo proyecto de ingeniería civil, todas las estructuras lo usan de soporte y presenta la problemática de tener una resistencia limitada. Para solventar ese problema, el ser humano ha encontrado diversas maneras de reforzar el suelo a fin de mejorar sus propiedades mecánicas, resistir mayores cargas y disminuir deformaciones.

Entre estas soluciones se encuentran los geosintéticos, anclajes, mezclas suelo-cemento, fibras, entre otros. El presente proyecto responde a la problemática planteada y examina el refuerzo del suelo mediante fibras de ácido poliláctico (PLA) con un enfoque en cohesión geométrica. Betancourt, J (2019) define a la cohesión geométrica como un fenómeno en el que las partículas de un sistema son de formas tal que se entrelazan y estabilizan únicamente por sus propiedades geométricas, sin necesidad de agentes externos o pegantes.

En el contexto ecuatoriano, el país presenta una topografía variada lo que dificulta realizar obras de ingeniería civil y obliga a construir obras de contención como taludes. En este contexto el refuerzo del suelo mediante fibras se muestra como una solución a fin de emplear menores cantidades de material, tener mayor seguridad en obras geotécnicas y tener una mejor adaptación al entorno irregular ecuatoriano.

Diversas investigaciones concuerdan que las fibras mejoran la resistencia del suelo, no obstante, no hay un consenso claro referente al efecto de la variación de la forma de dichas fibras. Este trabajo busca aportar al conocimiento en el campo del refuerzo de suelos, centrándose en la optimización de la cantidad y morfología de las fibras. Se emplean 3 diseños de fibra, una base alargada y dos variaciones con ramificaciones en los extremos empleando longitudes de 40, 30 y 20mm en proporciones de 0.1%, 0.2% y 0.3% respecto al peso total de la muestra.

## DESARROLLO DEL TEMA

### Suelo y zona de estudio

El suelo ocupado en el proyecto proviene del sector La Cerámica, ubicado en el Valle de Tumbaco en el Distrito Metropolitano de Quito. Tal y como se observa en la Figura 1, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (1983) clasifica el suelo de Tumbaco como tipo “H10”, suelo limoso con presencia de arena muy fina y con incremento de arcilla a profundidad en áreas con estación seca.

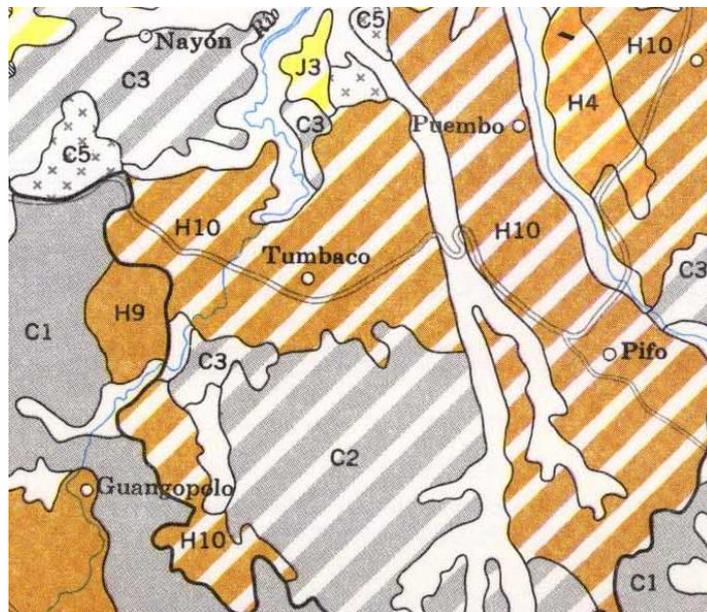


Figura 1. Mapa de Suelos. Quito. Sector Tumbaco, suelo tipo H10; limoso con presencia de arena muy fina.

Nota. La figura cubre un extracto del mapa de suelos del Distrito Metropolitano de Quito. Adaptado de Mapa de Suelos. Quito, del Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1983. European Soil Data Centre (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/mapa-de-suelos-quito-soil-map>).

A fin de clasificar el suelo obtenido del proyecto, se realizó un ensayo de granulometría según ASTM D-422 con el que se obtienen porcentajes pasantes de cada tamiz según el tamaño de partícula. Ver anexo D.

### Granulometría mecánica.

Tras el procesamiento de los resultados del ensayo de granulometría mecánica, se obtuvo la curva granulométrica del suelo presentada en la siguiente figura.

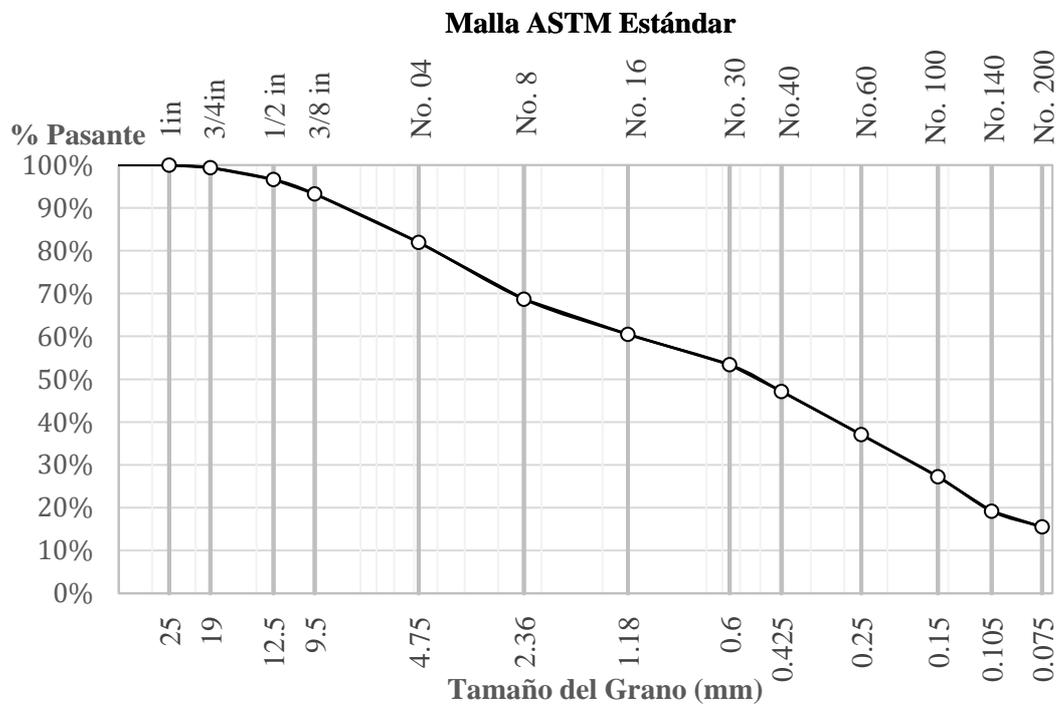


Figura 2. Curva Granulométrica.

En la figura 2, al trazar una línea horizontal en el porcentaje pasante de 50%, se obtiene el diámetro para el cual el 50% de las partículas es más fino que en este caso es 0.49mm, lo que clasifica a este suelo como un suelo granular.

Con esta información no es posible calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura de manera exacta ya que el  $D_{10}$ , diámetro para el cual el 10% de las partículas es más fino, se encuentra en un tamaño menor a 0.075mm de manera que se requeriría realizar un ensayo de granulometría por hidrómetro para completar la curva granulométrica.

Para obtener el coeficiente de uniformidad:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

$Cu$ : Coeficiente de uniformidad.

$D_{60}$ : Diámetro para el cual el 60% de las partículas es más fino.

$D_{10}$ : Diámetro para el cual el 10% de las partículas es más fino.

Sin embargo, el  $D_{60}$  si es conocido por la gráfica, es 1.18mm y si el valor de  $D_{10}$  es menor a 0.075mm. El resultado del  $Cu$  será 15 como mínimo, lo que explica que la curva presente una forma tipo “S” característica de curvas bien gradadas, mismas que presentan varios tamaños de partículas o con un  $Cu$  mayor a 5. Por tanto, al suelo empleado se lo puede clasificar como SM (Sand, silt), un suelo arenoso limoso y bien gradado.

### **Humedad óptima.**

Para hallar la cantidad de humedad óptima a emplear en los ensayos del suelo, se ocupó un ensayo de Proctor Modificado realizado en 5 capas con 25 golpes cada capa. Los datos obtenidos con el ensayo permitieron obtener la curva de compactación mostrada en la figura 3, misma que presenta un resultado de máxima densidad seca de  $1.661 \frac{g}{cm^3}$  a una humedad del 11.5%. Esta cantidad de humedad y densidad se ocuparán durante todo el proyecto para la compactación de las muestras a ensayar.

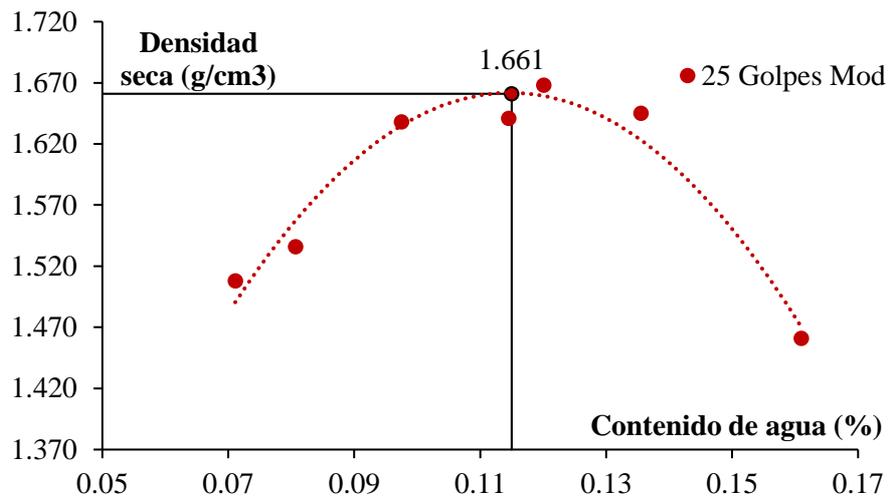


Figura 3. Curva de Compactación.

## Fibra sintética

### Material de fibra.

El material de la fibra es PLA (ácido poliláctico), material común para su uso en impresiones 3D. Para el presente proyecto se utilizó un rollo de PLA + de la marca Sunlu. Éste material fue elegido por la facilidad que se tiene al imprimir en 3D de poder diseñar la fibra y sea continua en toda su longitud.



Figura 4. Rollo de PLA + Marca Sunlu.

Según la ficha técnica presentada por Sunlu (2021), este material presenta como parte de su rendimiento insolubilidad al agua y presenta una velocidad de impresión de hasta 100 milímetros por segundo. Entre sus propiedades mecánicas tiene una resistencia a la tensión de 58 MPa y módulo de Young de 3570MPa según método ASTM D638. Además, posee una resistencia a flexión de 73MPa según ASTM D790.

### Morfología de fibras

El enfoque del proyecto está en evaluar el efecto de la cohesión geométrica en el comportamiento mecánico del suelo mediante fibras. En base a esta premisa, lo principal a modificar en cuanto a morfología es la forma de la fibra y para ello se definen inicialmente 4 formas, mostradas en la figura 5. A su vez, las limitaciones de la impresión 3D resultaron en que la sección transversal mínima sea de 0.5x0.5mm misma que fue empleada para todas las impresiones.



Figura 5. Prototipos Impresos.

Nota. De izquierda a derecha, sección circular de diámetro 2.5mm, sección cuadrada de 1x1mm, sección cuadrada de 0.7x0.7mm y sección cuadrada de 0.5x0.5mm. Los diseños se

realizaron en Autodesk “Inventor” y la configuración de la impresora 3D a través “Ultimaker Cura”. Revisar Anexo F.

De todas las figuras impresas, la figura en tres dimensiones fue la más compleja de todas y la más tardada en imprimir. Para imprimir dicha figura se emplearon soportes de impresión, las fibras se rompían antes de llegar a su forma final por lo que se descartó este diseño resultando en 3 formas finales: alargada, con 2 ramificaciones y con 4 ramificaciones.

Se decide utilizar inicialmente una longitud de 40mm que es la máxima posible de las fibras dado el radio del molde de 50mm y considerando que las ramificaciones deben ingresar. Además, se evaluará el efecto de reducir la longitud a 30mm y 20mm.

En cuanto a la cantidad, Fresneda et al (2014) realizó ensayos de compresión simple a un suelo reforzado con fibras, evaluó porcentajes de fibra al 0.1%, 0.2% y 0.3% del peso del suelo, obteniendo un resultado máximo de resistencia empleando 0.2%. En el presente proyecto se evalúan los 3 porcentajes a fin de definir si el efecto que tiene modificar la forma es independiente de la longitud y porcentaje.

### **Fibras de 20 mm de Longitud**

En el caso de las fibras de 20mm de longitud, se establece que las ramificaciones tengan un ángulo de  $45^\circ$  y un espacio desde su eje longitudinal de 10mm lo que ocasiona que la forma con 2 ramificaciones desaparezca ya que se vuelve una recta y la figura con 4 ramas adquiere una forma de “X”.

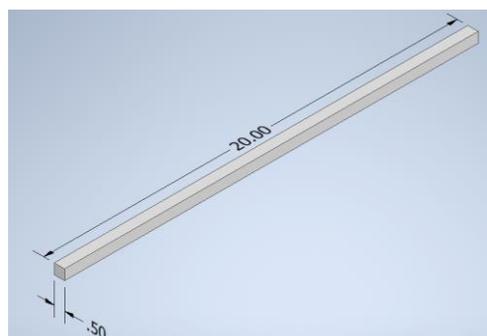


Figura 6. Forma Simple de longitud 20mm.

Nota. Diseño realizado en el programa Autodesk “Inventor” con las unidades en milímetros y una sección transversal cuadrada de 0.5x0.5 mm.

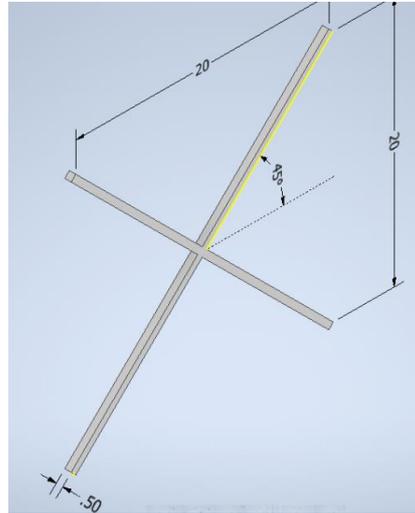


Figura 7. Forma Con 4 Ramas de longitud 20mm.

Nota. El ángulo de 45° de las ramificaciones es en base al eje longitudinal de la fibra.

### Fibras de 30 mm de Longitud

En el caso de las fibras de 30mm de longitud, al mantener las dimensiones de las ramificaciones, se tiene una distancia en la parte media de la fibra recta de 10mm en el caso de 2 y 4 ramas.



Figura 8. Forma Simple de longitud 30mm.

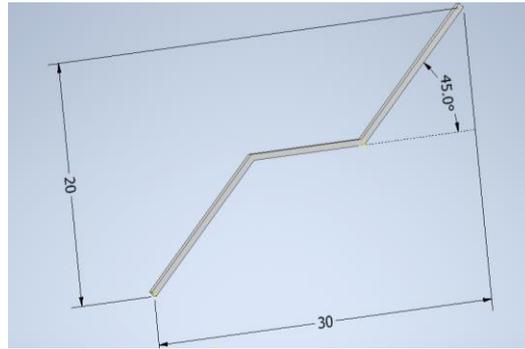


Figura 9. Forma Con 2 Ramas de longitud 30mm.

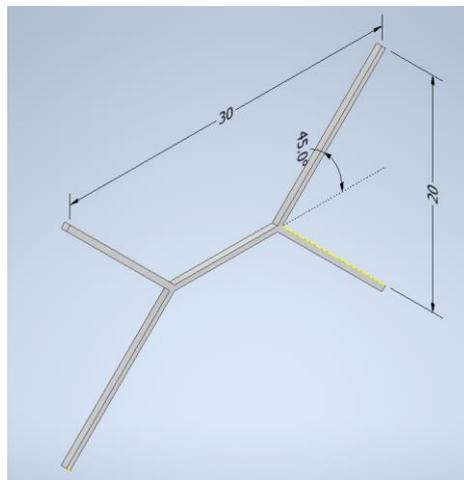


Figura 10. Forma Con 4 Ramas de longitud 30mm.

### Fibras de 40 mm de Longitud

Las fibras de 40mm de longitud corresponden a las figuras 11, 12 y 13, con forma longitudinal, con 2 ramificaciones y con 4 ramificaciones respectivamente. En este caso se tiene una distancia en la parte media de la fibra recta de 20mm para 2 y 4 ramas.



Figura 11. Forma Simple de Longitud 40mm.

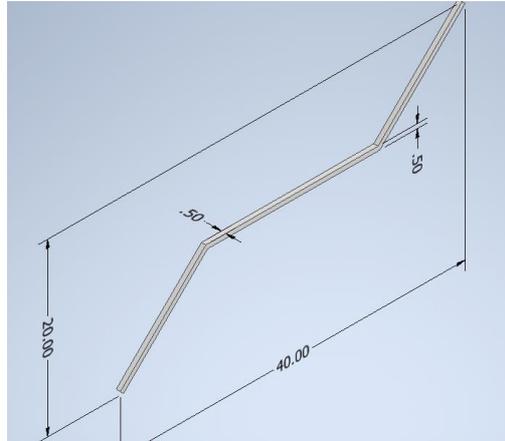


Figura 12. Forma con 2 Ramas de Longitud 40mm.

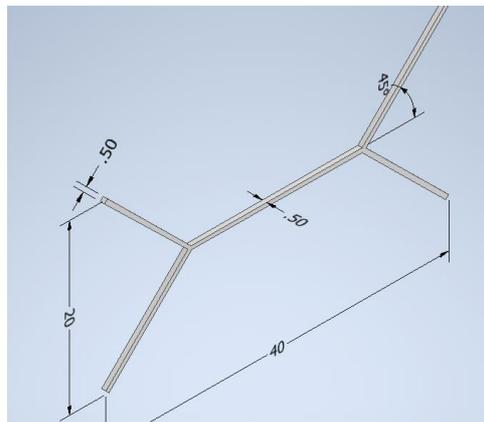


Figura 13. Forma con 4 Ramas de Longitud 40mm.

## Metodología

### Molde y muestra

El molde para compresión inconfiada es un molde metálico de 5cm de diámetro y 10cm de alto como se ve en la Figura 14.



Figura 14. Molde Cilíndrico de Diámetro 50mm.

Nota. Las placas laterales del cilindro se usaron para el proceso de desmoldado de la muestra.

La muestra es el resultado de un proceso de mezclado de suelo seco con agua a humedad óptima y una compactación en 5 capas de 2cm cada una.



Figura 15. Muestra de Suelo Compactado.

Para tener una referencia más visual en el ensayo de compresión, se empleó el programa “MatLab” para dibujar fibras dentro de un medio continuo tipo suelo como se muestra en la figura 8 con una proporción de fibra del 0.2%.

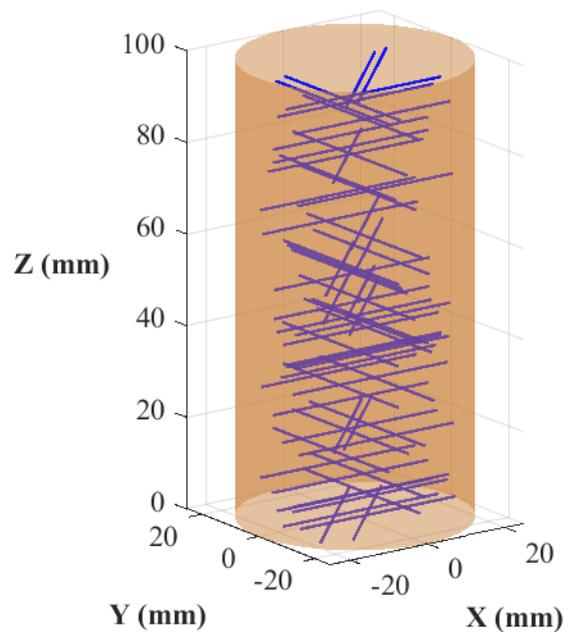


Figura 16. Fibras Simples de 40mm de Longitud en un Medio Continuo tipo Suelo.

Nota. La representación es en base de las fibras longitudinales de 40mm rotadas alrededor del eje “Z” de la figura a 45°, 135°, 225° y 315°. Figura realizada en “MatLab” con una equivalencia de cantidad de fibra al 0.2% del peso de la muestra.

### **Compresión Inconfinada**

El primer ensayo realizado a las muestras fue compresión inconfinada según la norma ASTM D2166, misma que define una relación alto-diámetro mínimo de 2:1 que se cumple con el diámetro de 50mm y altura 100mm de las muestras. El ensayo fue realizado a una velocidad del 1% de la deformación unitaria por minuto.

Se realizó el ensayo inicialmente para un porcentaje de 0.2% para longitudes de 20, 30 y 40mm. Estos ensayos permitieron definir a la fibra de 2 ramificaciones como la más óptima. Debido a esto, se realizó compresión inconfinada para muestras de 2 ramificaciones y longitud de 40mm a porcentajes de 0.1% y 0.3%.

El proceso para obtener las muestras inicia con el mezclado de suelo seco con agua según la humedad óptima del ensayo de próctor modificado, se coloca una masa calculada por capa y se compacta usando una prensa hidráulica. En el caso de muestras con fibras se las colocó espaciadas verticalmente unas de otras y rotadas para asegurar que no exista una orientación única.



Figura 17. Ensayo de Compresión Inconfinada

Nota. En el ensayo de suelo a compresión, se graba el valor de un deformímetro junto con el valor de deformación de un anillo de carga. Ver anexo E.

El procesamiento de datos empieza con calibrar el anillo de carga empleando pesas de diferente masa, luego se registra la deformación del anillo a compresión de dichas pesas y mediante una gráfica Carga vs. Deformación se crea una regresión lineal, el resultado de la misma es:

$$F(Kg) = 13430 x - 0.018$$

Siendo:

F: Fuerza (kg-f).

x: Deformación (in).

Utilizando el área transversal del cilindro,  $19.63\text{cm}^2$ , se divide la fuerza con el área y se obtiene un resultado de esfuerzo en  $\frac{kg}{\text{cm}^2}$ .

Para asegurar que todas las muestras sean ensayadas bajo las mismas condiciones, se calculó la densidad de cada muestra, su humedad y densidad seca. Los resultados para las muestras con fibras de longitud 20mm y 0.2% se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 20mm al 0.2% de Fibra.

Tipo de Muestra	Densidad ( $\frac{g}{\text{cm}^3}$ )	Humedad (%)	Densidad Seca ( $\frac{g}{\text{cm}^3}$ )
Sin Fibras	1.853	11.13	1.667
Fibra Simple	1.857	11.11	1.671
Fibra 4 Ramas	1.870	11.05	1.684

Los resultados para las muestras con fibras de longitud 30mm y 0.2% se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 30mm al 0.2% de Fibra.

Tipo de Muestra	Densidad ( $\frac{g}{\text{cm}^3}$ )	Humedad (%)	Densidad Seca ( $\frac{g}{\text{cm}^3}$ )
Sin Fibras	1.853	11.13	1.667
Fibra Simple	1.853	11.25	1.665
Fibra 2 Ramas	1.869	11.13	1.682
Fibra 4 Ramas	1.840	11.41	1.651

Se obtuvo a su vez la densidad de cada muestra, humedad y densidad seca para las muestras de 40mm de longitud. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.2% de Fibra.

Tipo de Muestra	Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Humedad (%)	Densidad Seca ( $\frac{g}{cm^3}$ )
Sin Fibras	1.853	11.13	1.667
Fibra Simple	1.846	11.28	1.658
Fibra 2 Ramas	1.841	11.34	1.653
Fibra 4 Ramas	1.857	11.32	1.668

Los resultados para las muestras con fibras de longitud 40mm y 0.1% se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.1% de Fibra.

Tipo de Muestra	Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Humedad (%)	Densidad Seca ( $\frac{g}{cm^3}$ )
Sin Fibras	1.853	11.13	1.667
Fibra Simple	1.852	11.38	1.662
Fibra 2 Ramas	1.854	11.34	1.665

Los resultados para las muestras con fibras de longitud 40mm y 0.3% se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Tabla Resumen de las Muestras con Longitud 40mm y 0.3% de Fibra.

Tipo de Muestra	Densidad ( $\frac{g}{cm^3}$ )	Humedad (%)	Densidad Seca ( $\frac{g}{cm^3}$ )
Sin Fibras	1.853	11.13	1.667
Fibra Simple	1.844	11.20	1.658
Fibra 2 Ramas	1.847	11.42	1.657

La humedad llega a ser menor a la estimada de 11.5% debido a temas de evaporación en el transcurso de la compactación, desmoldado y ensayo de la muestra. Aún así, la densidad seca es muy cercana a la densidad óptima obtenida con próctor modificado cuyo valor es  $1.661 \frac{g}{cm^3}$ .

### Propagación de Ondas

El ensayo de propagación de ondas consiste en tomar el tiempo en el que un pulso atraviesa la muestra. Para ello se utilizó un probador de indicación digital no destructivo ultrasonido portátil (PUNDIT), mismo que emite un pulso y utiliza dos sensores que se colocan en cada extremo de la muestra. Ver anexo G.



Figura 18. Equipo Pundit Lab de Ultrasonidos.

Para poder obtener el tiempo de propagación, se conecta el Pundit Lab a un osciloscopio digital mostrado en la figura 11 en el que se puede mostrar el pulso generado y la onda de respuesta en un tiempo determinado. El osciloscopio permite exportar la información para ser procesada.

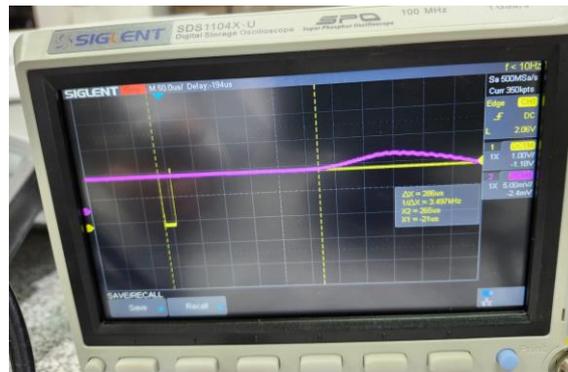


Figura 19. Osciloscopio Digital de Laboratorio.

Nota. En amarillo se grafica el pulso en un extremo de la muestra y en morado la respuesta en el otro extremo. El eje horizontal es el tiempo en microsegundos y el eje vertical es la amplitud en voltaje.

Para obtener el valor del módulo dinámico se emplea la fórmula de velocidad de onda longitudinal u onda P.

$$V_p = \left[ \frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$V_p$ : Velocidad de Onda P.

$K$ : Compresibilidad

$\mu$ : Módulo de Rigidez

$\rho$ : Densidad del medio en el que se progaga la onda.

Además,

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

Donde:

$E$ : Módulo dinámico.

$\nu$ : Coeficiente de Poisson.

Y,

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Al despejar  $E$ :

$$Vp = \left[ \frac{\frac{E}{3(1 - 2\nu)} + \frac{4}{3} \left( \frac{E}{2(1 + \nu)} \right)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Vp = \left[ \frac{E * \left( \frac{1}{1 - 2\nu} + \frac{2}{1 + \nu} \right)}{3\rho} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Vp^2 = \frac{E * \left( \frac{1}{1 - 2\nu} + \frac{2}{1 + \nu} \right)}{3\rho}$$

$$E = \frac{3Vp^2(\rho)}{\frac{1}{1 - 2\nu} + \frac{2}{1 + \nu}}$$

Con ello se pueden ingresar los datos obtenidos de las muestras y sacar la velocidad con el tiempo de propagación de la onda que viene del osciloscopio y la altura total de la muestra.

## Resultados

Los resultados del ensayo de compresión inconfiada fueron: curva esfuerzo-deformación unitaria y el módulo de elasticidad secante ocupando la pendiente de la parte lineal de la curva.

### Curvas Efuerzo – Deformación

Con los datos procesados, se realizaron curvas efuerzo-deformación para todos los casos de muestra: con fibra al 0.2% de peso de muestra con longitud 20, 30 y 40mm y fibra 40mm al 0.1% y 0.3%.

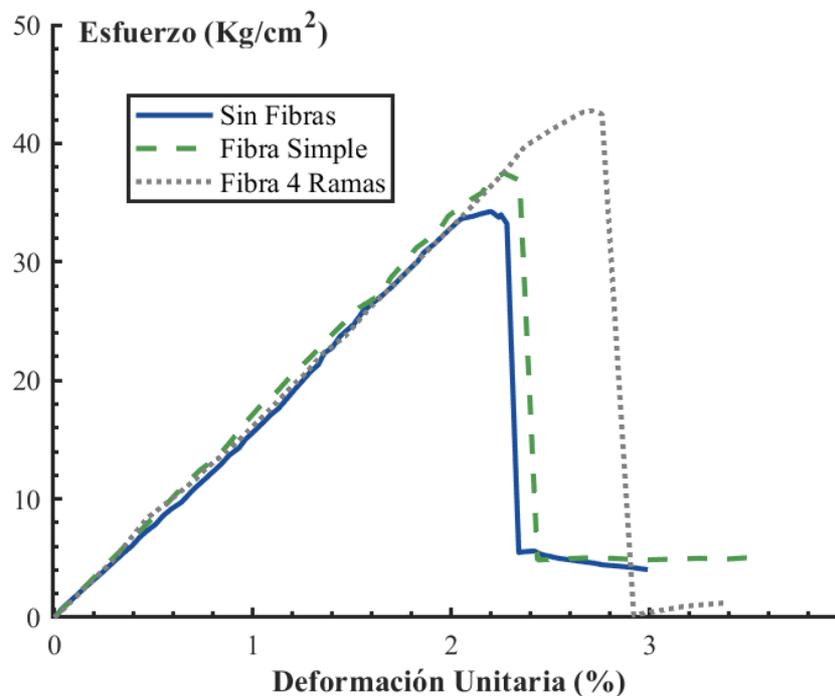


Figura 20. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 20mm al 0.2% en Cantidad.

Con esta información, se presenta una tabla comparativa para el valor de esfuerzo máximo a compresión logrado por cada muestra.

Tabla 6. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 20mm de Longitud al 0.2% de Cantidad.

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Sin Fibras	32.90
Fibra Simple	37.48
Fibra 4 Ramas	42.75

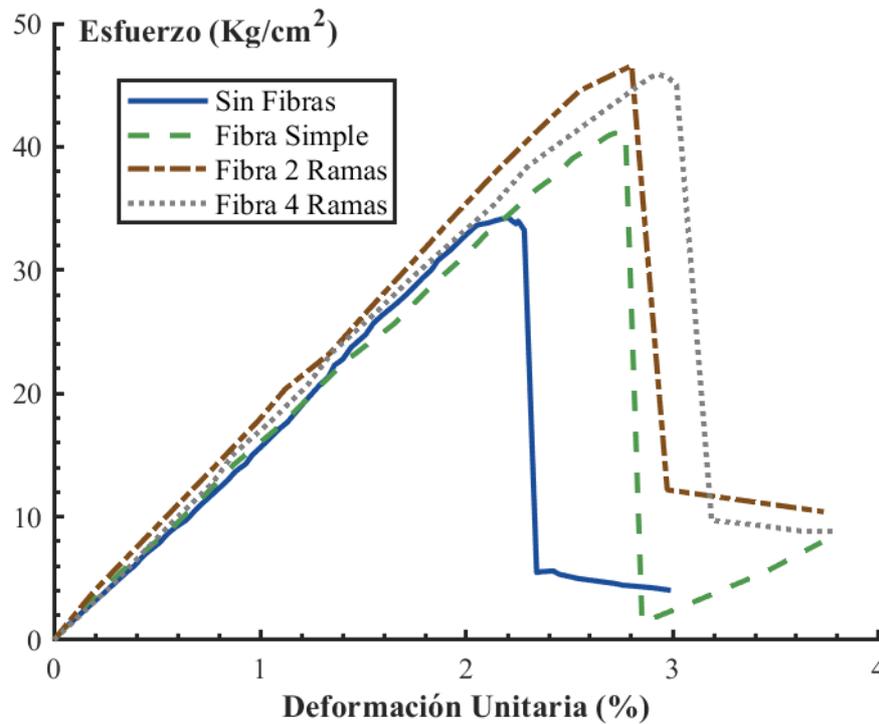


Figura 21. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 30mm al 0.2% en Cantidad.

Tabla 7. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 30mm de Longitud al 0.2% de Cantidad.

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Sin Fibras	32.90
Fibra Simple	41.29
Fibra 2 Ramas	46.58
Fibra 4 Ramas	45.89

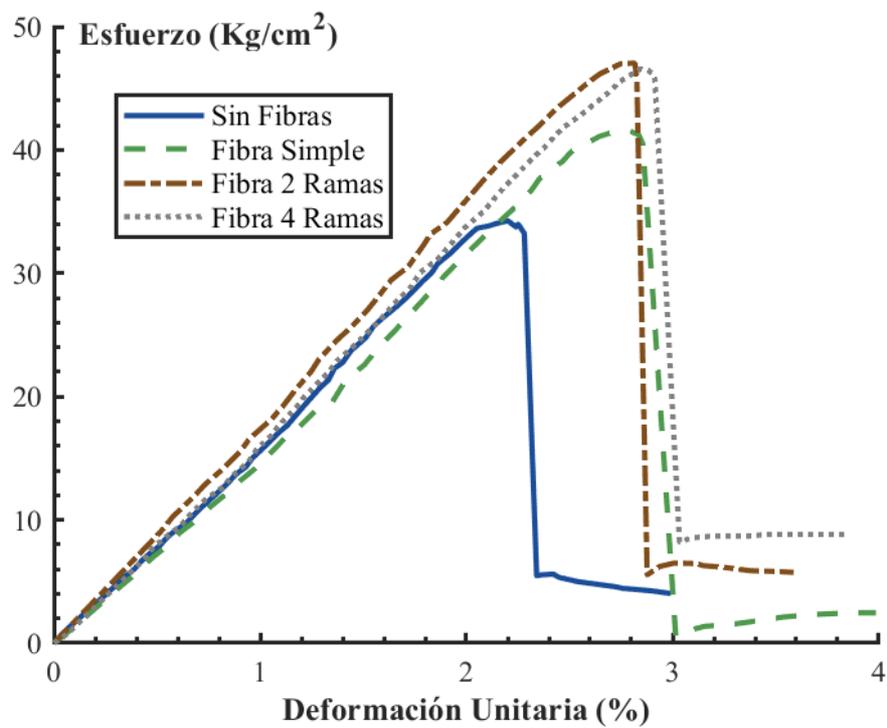


Figura 22. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.2% de Cantidad.

Tabla 8. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.2% de Cantidad.

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Sin Fibras	32.90
Fibra Simple	41.52
Fibra 2 Ramas	47.06
Fibra 4 Ramas	46.58

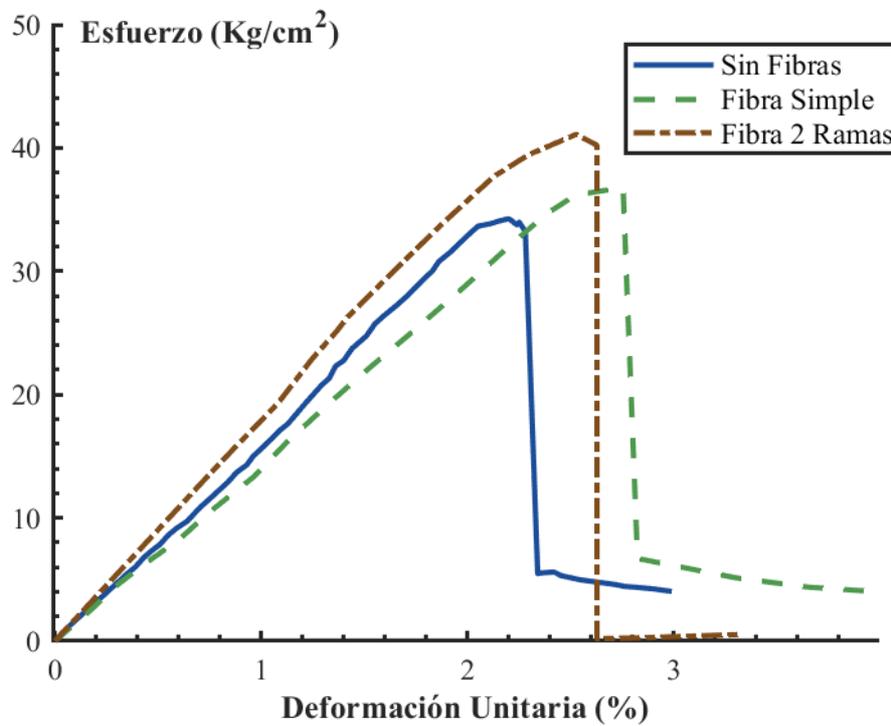


Figura 23. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.1% de Cantidad.

Tabla 9. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.1% de Cantidad.

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Sin Fibras	32.90
Fibra Simple	36.79
Fibra 2 Ramas	39.46

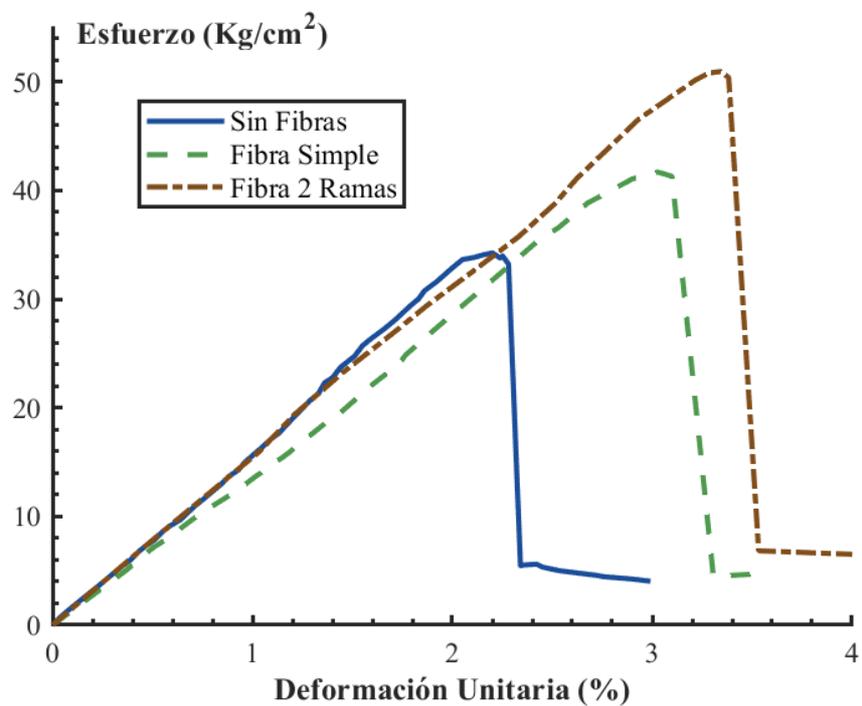


Figura 24. Curva Comparativa de Esfuerzo - Deformación en Fibras de Longitud 40mm al 0.3% de Cantidad.

Tabla 10. Tabla Resumen Compresión Máxima en Fibras de 40mm de Longitud al 0.3% de Cantidad.

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Sin Fibras	32.90

Tipo de Muestra	Esfuerzo Máximo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ )
Fibra Simple	41.71
Fibra 2 Ramas	50.95

Como comparativa de resultados finales, se tiene la Figura 25, un gráfico de barras que reúne todos los casos de longitud y porcentajes en grupos divididos por colores comparando todos los valores de esfuerzos máximos.

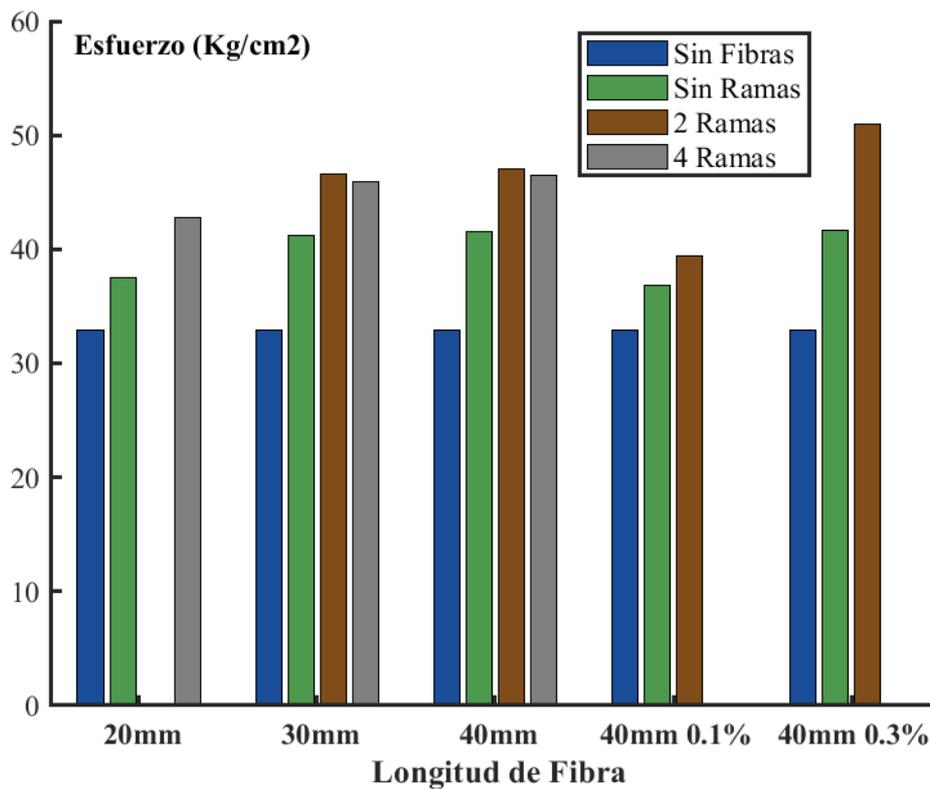


Figura 25. Gráfico de Barras Esfuerzo ( $\frac{Kg}{cm^2}$ ) y Longitud de Fibra.

### Módulo de Elasticidad

El gráfico esfuerzo-deformación a su vez, permite obtener la pendiente de la parte lineal de la curva a modo de obtener el módulo de elasticidad, siendo los resultados los mostrados en la figura 26.

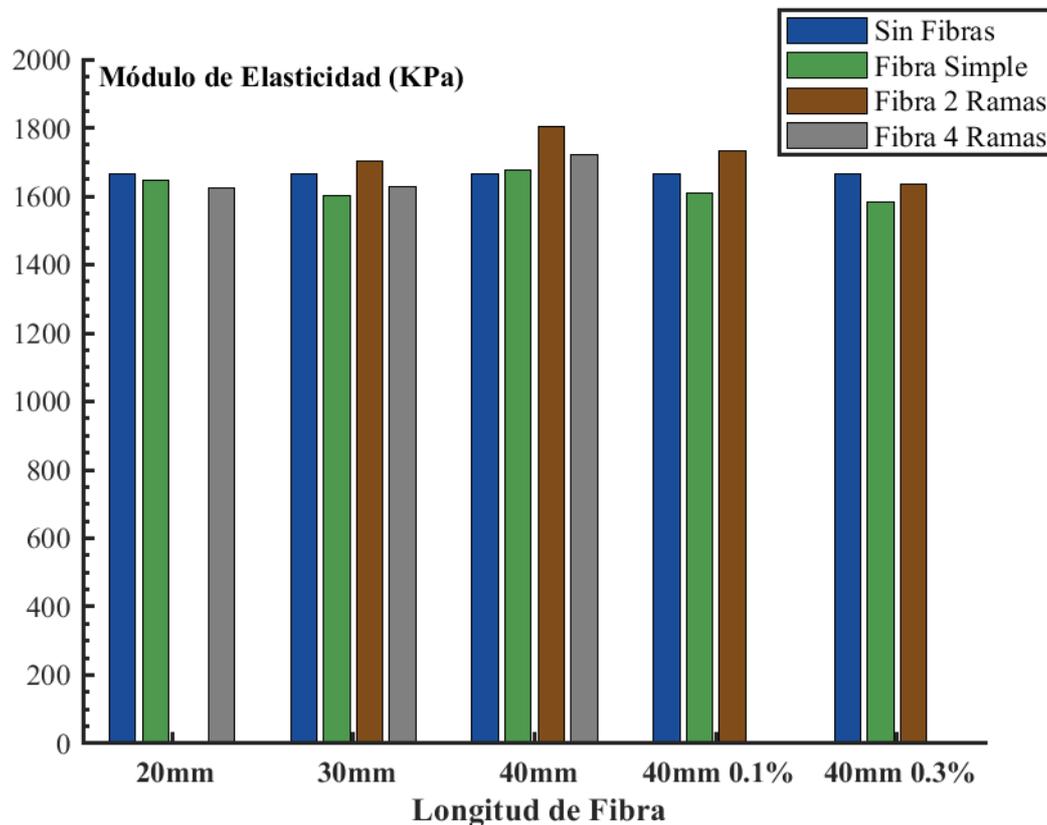


Figura 26. Gráfico de Barras Módulo de Elasticidad (KPa) y Longitud de Fibra.

### Módulo Dinámico

En cuanto a propagación de ondas, al ser un ensayo no destructivo puede usarse antes de ensayar la muestra a compresión, los resultados fueron recopilados por un osciloscopio y procesados en las figuras siguientes para obtener el módulo dinámico:

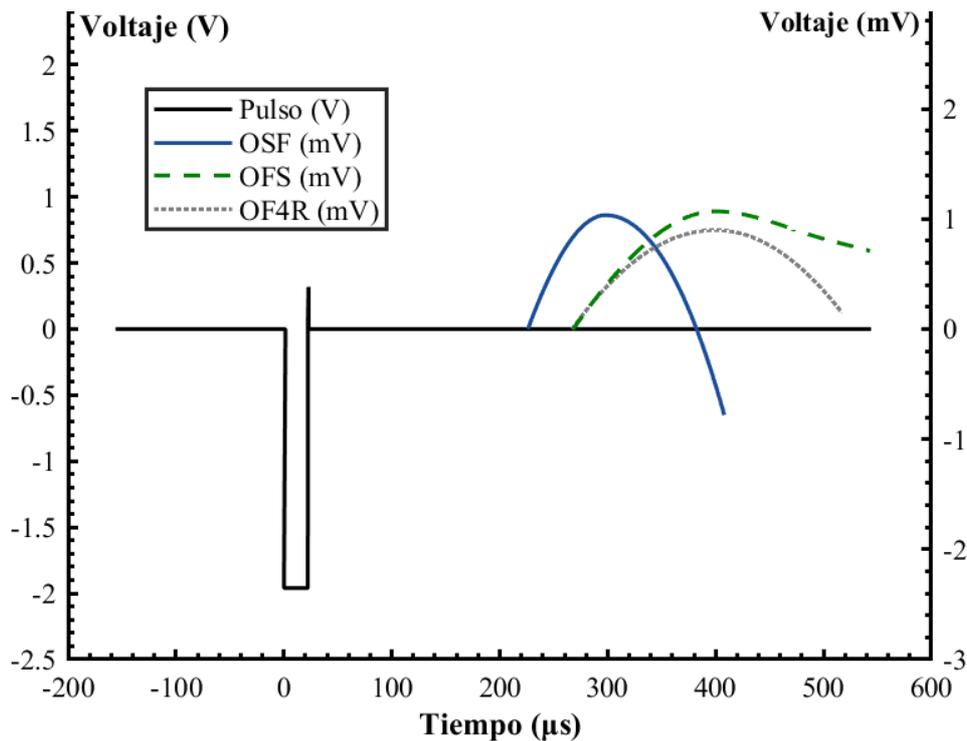


Figura 27. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 20mm al 0.2% de Cantidad.

Nota. El gráfico tiene dos ejes verticales, uno principal a la izquierda en el que se encuentra el pulso en voltios (V) y un eje secundario a la derecha en milivoltios (mV) para todas las ondas generadas. En la leyenda, OSF significa Onda Sin Fibras, OFS Onda Fibra Simple y OF4R Onda Fibra 4 Ramificaciones. Se tomaron en total 5 curvas de cada muestra.

Tabla 11. Módulo Dinámico en Fibras de 20mm de Longitud al 0.2% de cantidad.

Tipo de Muestra	Tiempo Promedio Entre Pulso y Onda ( $\mu\text{s}$ )	Módulo Dinámico (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Sin Fibras	235	287.37	12.63
Fibra Simple	286	201.55	6.17
Fibra 4 Ramas	284	207.66	22.39

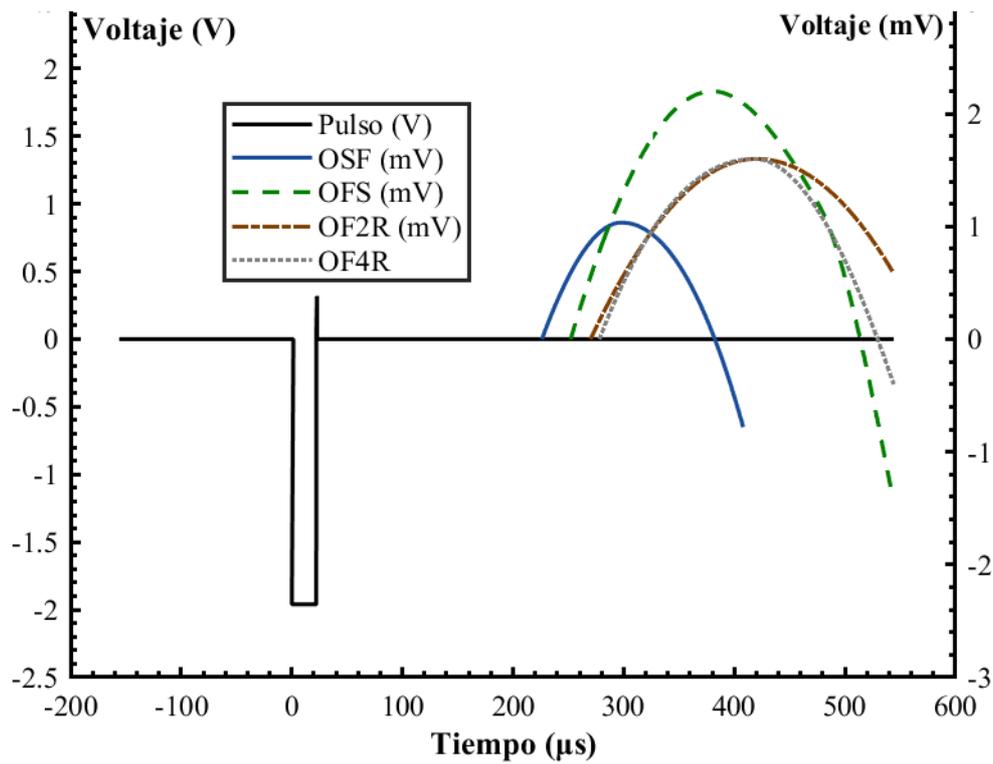


Figura 28. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 30mm al 0.2% de Cantidad.

Los resultados cuatificados de módulo dinámico se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Módulo Dinámico en Fibras de 30mm de Longitud al 0.2% de cantidad.

Tipo de Muestra	Tiempo Promedio Entre Pulso y Onda ( $\mu\text{s}$ )	Módulo Dinámico (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Sin Fibras	235	287.37	12.63
Fibra Simple	280	213.25	9.18
Fibra 2 Ramas	305	179.45	12.53
Fibra 4 Ramas	314	169.32	14.54

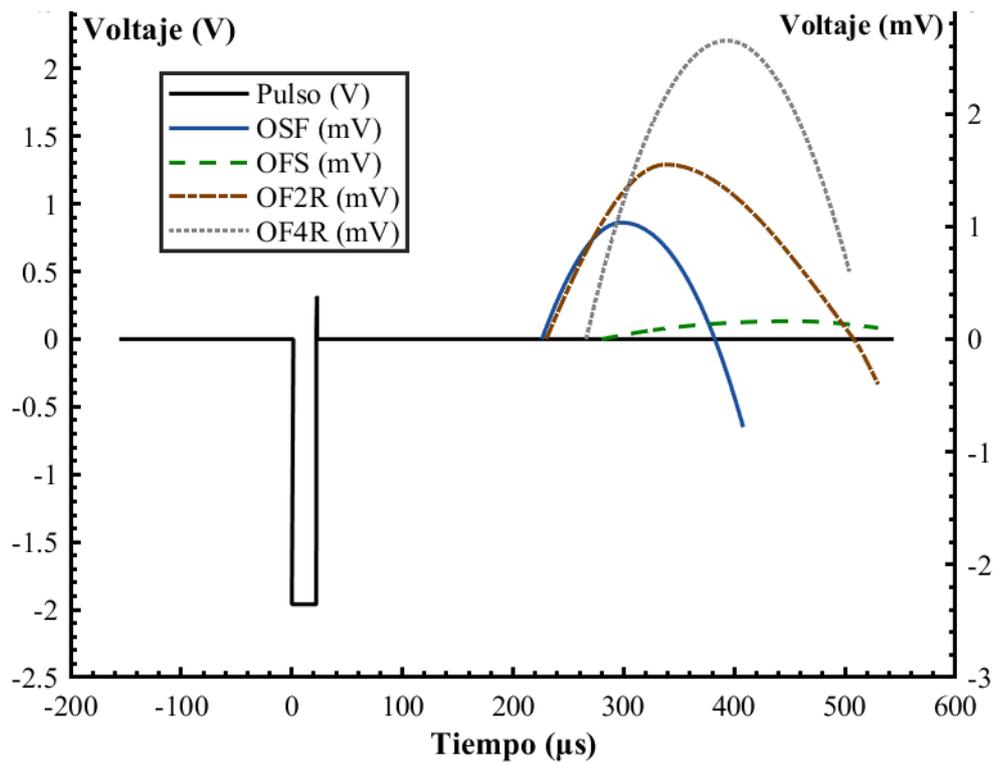


Figura 29. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.2% de Cantidad.

Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la tabla 13.

Tabla 13. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.2% de cantidad.

Tipo de Muestra	Tiempo Promedio Entre Pulso y Onda ( $\mu$ s)	Módulo Dinámico (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Sin Fibras	235	287.37	12.63
Fibra Simple	308	175.75	3.17
Fibra 2 Ramas	275	219.74	14.31
Fibra 4 Ramas	297	188.64	15.78

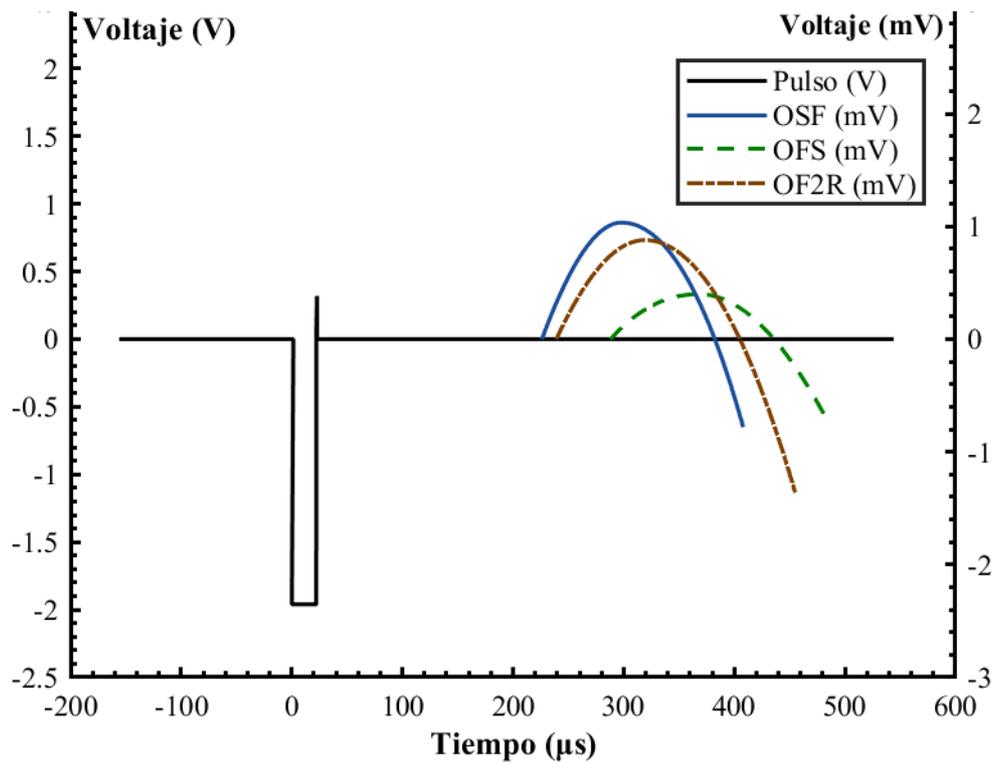


Figura 30. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.1% de Cantidad.

Tabla 14. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.1% de cantidad.

Tipo de Muestra	Tiempo Promedio Entre Pulso y Onda ( $\mu$ s)	Módulo Dinámico (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Sin Fibras	235	287.37	12.63
Fibra Simple	300	185.52	7.38
Fibra 2 Ramas	274	222.76	9.57

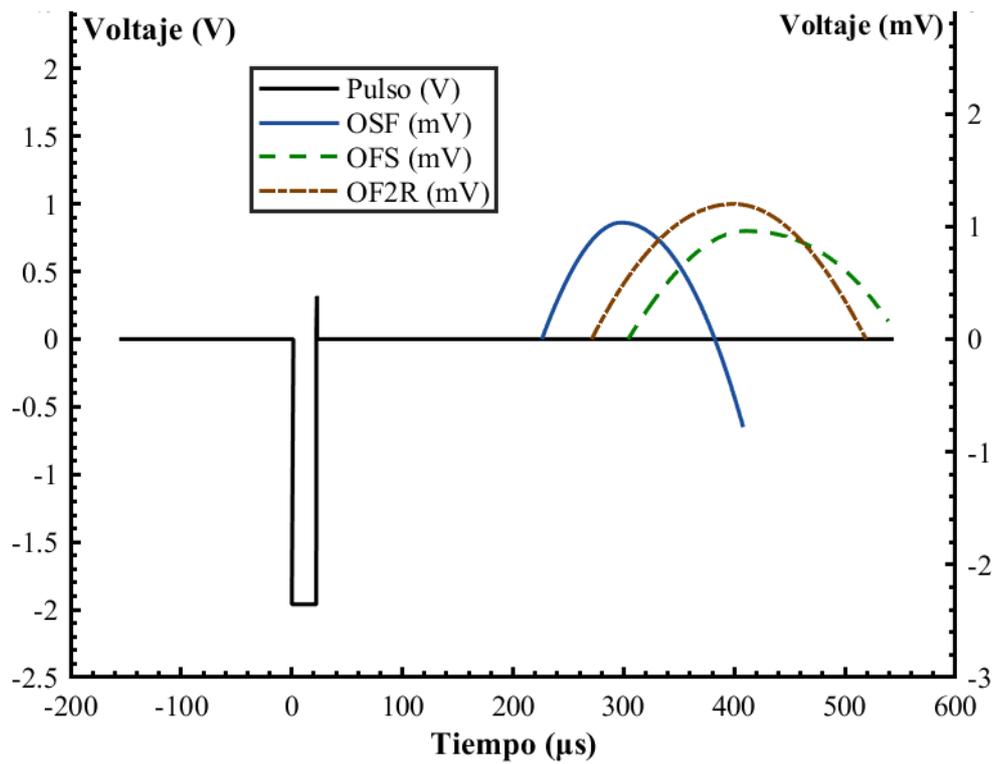


Figura 31. Curva Comparativa del Desfase Entre el Pulso Inicial y la Onda Generada para Fibra de 40mm al 0.3% de Cantidad.

Tabla 15. Módulo Dinámico en Fibras de 40mm de Longitud al 0.3% de cantidad.

Tipo de Muestra	Tiempo Promedio Entre Pulso y Onda ( $\mu$ s)	Módulo Dinámico (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
Sin Fibras	235	287.37	12.63
Fibra Simple	312	172.40	11.41
Fibra 2 Ramas	296	192.52	11.48

Se recopilaron los resultados de módulo dinámico en la Figura 32.

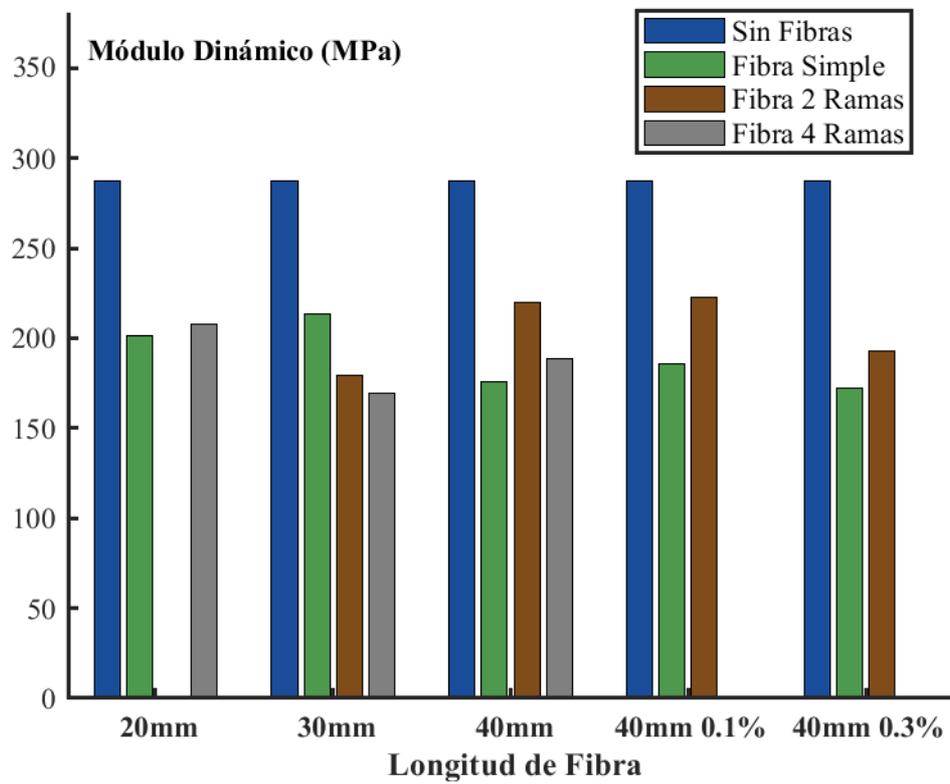


Figura 32. Gráfico de Barras Comparativo de Módulo Dinámico para Todos los Casos Analizados.

## CONCLUSIONES

El proyecto abordó el análisis comparativo experimental del impacto de fibras en las propiedades mecánicas de un suelo granular. A través de ensayos de compresión inconfiada y propagación de ondas, se evaluaron configuraciones de fibras con distintas longitudes, morfologías y proporciones en el suelo, permitiendo identificar mejoras significativas en resistencia y elasticidad, así como desafíos relacionados con el módulo dinámico.

En términos de resistencia, las fibras de 40 mm con dos ramificaciones al 0.3% alcanzaron el mayor incremento, con un esfuerzo máximo de 50.95 Kg/cm<sup>2</sup>, un aporte del 54.86% en comparación con la muestra base, que registró 32.9 Kg/cm<sup>2</sup>. Las fibras simples de la misma longitud lograron 41.71 Kg/cm<sup>2</sup>, representando un aumento del 26.77%. Para configuraciones con menor porcentaje, como el 0.1%, las fibras con dos ramificaciones alcanzaron 39.46 Kg/cm<sup>2</sup>, lo que aportó un 19.9%, mientras que las fibras simples lograron 36.79 Kg/cm<sup>2</sup>, con un incremento del 11.82%. Estos resultados confirmaron que las fibras de 40 mm con dos ramificaciones fueron las más eficientes en el refuerzo del suelo.

La longitud también demostró ser un factor crucial. Las fibras de 30 mm con dos ramificaciones alcanzaron 46.58 Kg/cm<sup>2</sup>, representando un aumento del 41.6%, mientras que las de 20 mm con cuatro ramificaciones lograron 42.75 Kg/cm<sup>2</sup>, con un aporte del 30%. Las fibras simples de 20 mm fueron las que presentaron el menor incremento, con un valor de resistencia de 37.48 Kg/cm<sup>2</sup>, lo que representó un aporte del 13.92%. Estos resultados evidenciaron que las fibras más cortas redujeron la capacidad de llegar a esfuerzos mayores, mientras que las fibras de mayor longitud permitieron un mejor entrelazado y aportaron cohesión geométrica al suelo.

En cuanto al módulo de elasticidad, las fibras de 40 mm con dos ramificaciones al 0.2% lograron un incremento del 8.48% en comparación con el suelo sin fibras. Este aumento,

aunque más modesto en comparación con los valores de resistencia, destacó la eficiencia de esta configuración en términos de elasticidad. Por otro lado, las configuraciones de menor longitud o porcentaje no presentaron incrementos significativos.

El análisis del módulo dinámico mostró que la inclusión de fibras, aunque mejora la resistencia, tiende a reducir la rigidez dinámica del suelo. Las fibras de 40 mm con dos ramificaciones al 0.2% presentaron la menor reducción, con un módulo dinámico de 219.74 MPa frente a los 287.37 MPa de la muestra sin fibras, representando una disminución del 23.53%. Mientras tanto, las fibras simples al 0.3% tuvieron el menor módulo dinámico con 172.40 MPa, lo que representó una disminución del 40.01%. Este comportamiento destacó la importancia de considerar cuidadosamente las aplicaciones de las fibras en condiciones donde la rigidez dinámica sea crítica.

Los resultados obtenidos ofrecen una base para abordar desafíos geotécnicos en Ecuador, como la estabilización de taludes o la mejora de suelos de baja resistencia, reduciendo costos y promoviendo soluciones sostenibles. El desarrollo de los ensayos presentó retos como desmoldar la muestra ya que el molde cilíndrico no había sido usado antes, lo que retrasó el proceso experimental. Futuras investigaciones pueden utilizar otras formas de fibra, otros materiales o incluso abordar producciones a gran escala pues, la impresión 3D se utilizó solo como un medio para poder dar forma a las fibras.

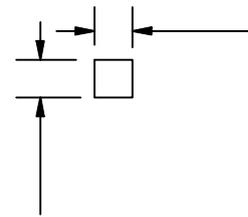
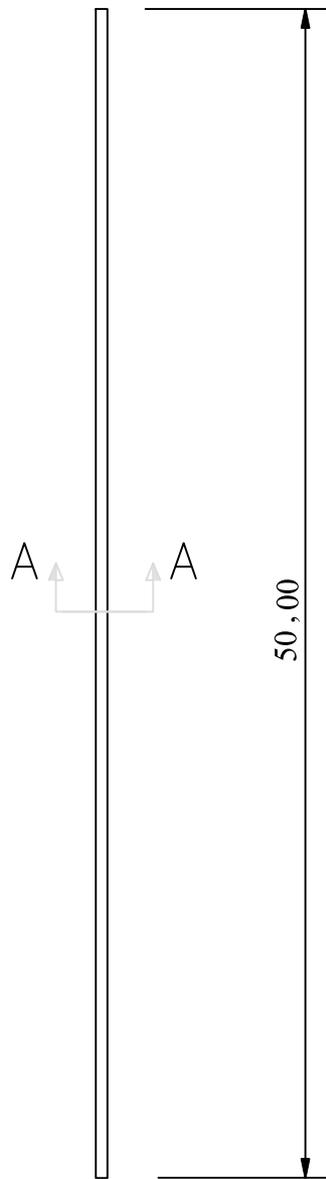
Finalmente, este proyecto demostró que la variación de la morfología de las fibras permite mejorar las propiedades mecánicas del suelo a una misma cantidad de material y, con configuraciones específicas, se maximizan los beneficios. Esto refuerza la necesidad de seguir experimentando en optimización de material de refuerzo enfocado a las condiciones del Ecuador, alineándose con los objetivos de sostenibilidad e innovación en la ingeniería civil.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D2166. (2000). Standard test methods for Unconfined Compressive Strength. Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM D698. (2000). Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual Book of ASTM Standards.
- Carbonell, B. G., Robinson, E., Quintana, B. N., Karolina, I., Velarde, M. C., & Carlos, R. (2018). Influencia de la adición de fibras de pet reciclado sobre la resistencia, cohesión y ángulo de fricción interna de suelos arcillosos aplicado a la estabilidad de taludes. Universidad Nacional de Trujillo,. Universidad Nacional de Trujillo.  
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/11114>.
- Castillo Betancourt, J. (2019). Estudio experimental de la cohesión geométrica en polípodos platónicos. Uniandes. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/44065>.
- Clariá, J. J., & Vettorelo, P. (2014). Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones. Revista Facultad De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales; Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina, 1.
- Das, B. M. (2011). Principles of geotechnical engineering/Braja M. Das, Cengage Learning, Stamford, CT.
- Diambra, A., Ibraim, E., Wood, D. M., & Russell, A. R. (2010). Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. Geotextiles and geomembranes, 28(3), 238-250.

- Fresneda, C. A., Rojas, K. R. C., Quintero, Y. M. G., Ramírez, O. E., & González, Y. V.  
Efecto en las propiedades mecánicas del suelo mediante el uso de fibras artificiales  
Effect on the mechanical properties of soil through the use of using of artificial fibers.
- Jiménez López, K. S., & Pozo Galárraga, L. E. (2023). Evaluación de la resistencia a la  
compresión simple de suelos orgánicos remoldeados y mejorados con fibra de abacá  
recubierta con hidróxido de sodio (Doctoral dissertation, PUCE-Quito).
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. Programa Nacional de Regionalización Agraria  
PRONAREG, Quito. Mejía, L. (1983). Mapa de suelos. Quito. European Soil Data  
Centre. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/mapa-de-suelos-quito-soil-map>
- Tang, C. S., Wang, D. Y., Cui, Y. J., Shi, B., & Li, J. (2016). Tensile strength of fiber-  
reinforced soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016031.
- Technical Data Sheet SUNLU PLA+ Filament. (2021). Zhuhai SUNLU Industrial Co., Ltd.  
PLA + SUNLU. Disponible en: <https://3dsunlu.com/en/PLA-PG7435765>

**ANEXO A: PLANO REALIZADO EN AUTODESK "AUTOCAD" DE FIBRA SIN RAMAS.**

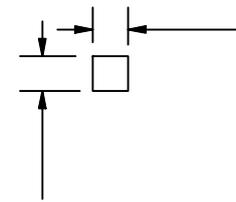
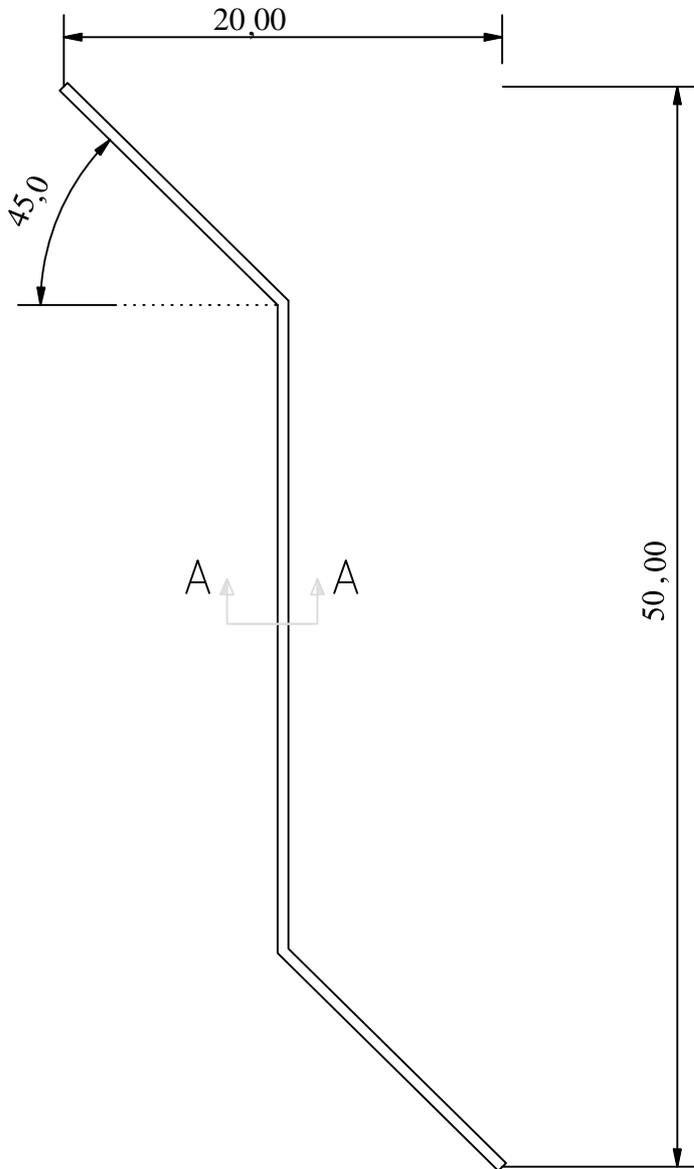


ELEVACION  
CORTE A-A  
ESC: 10:1

ELEVACION  
FIBRA 1  
ESC: 3:1

**ANEXO B: PLANO REALIZADO EN AUTODESK "AUTOCAD" DE FIBRA CON 2**

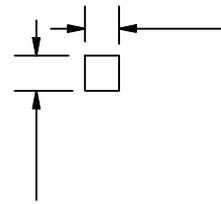
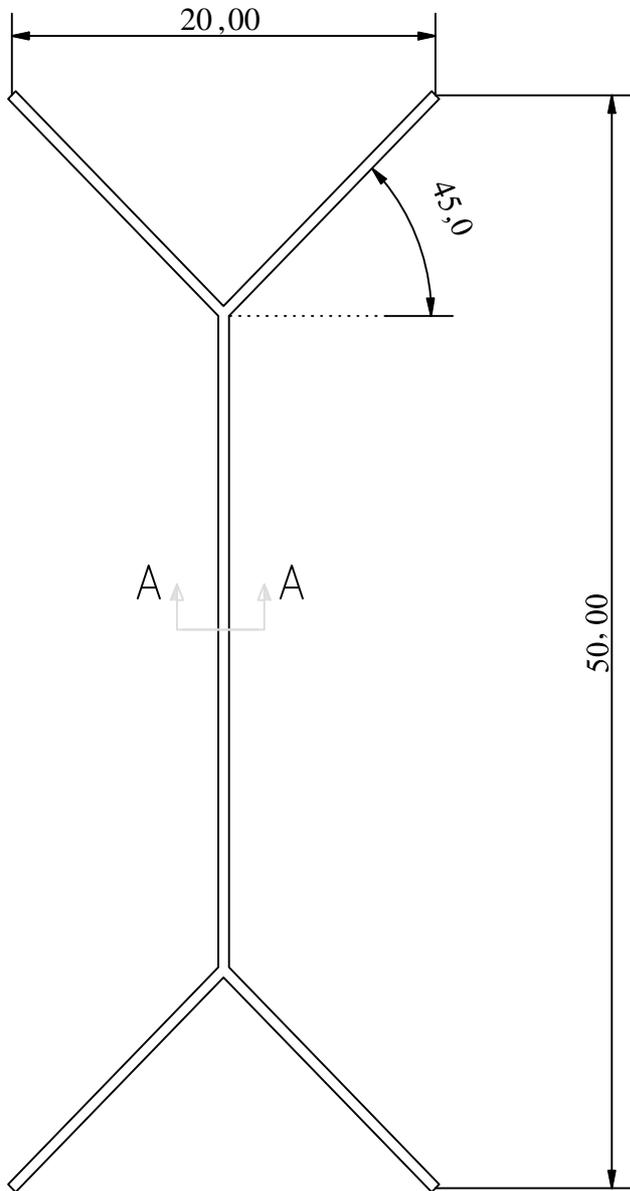
**RAMAS.**



ELEVACION  
CORTE A-A  
ESC: 10:1

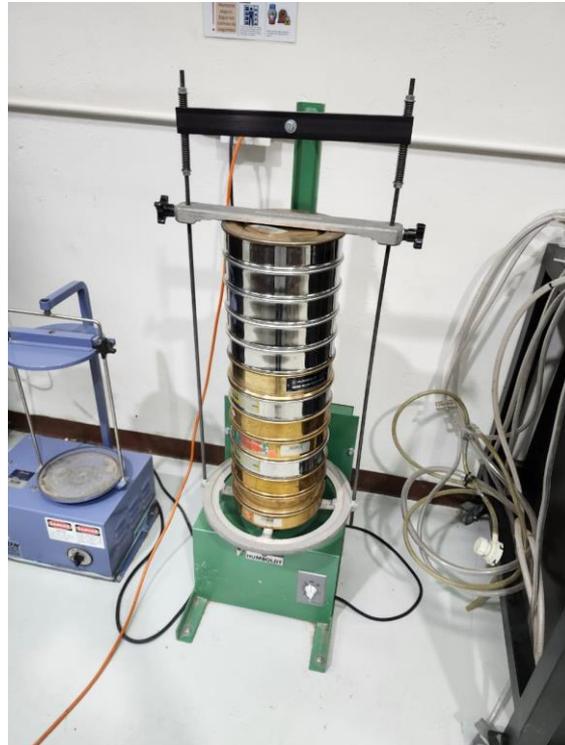
ELEVACION  
FIBRA 2  
ESC: 3:1

**ANEXO C: PLANO REALIZADO EN AUTODESK "AUTOCAD" DE FIBRA CON 4  
RAMAS.**

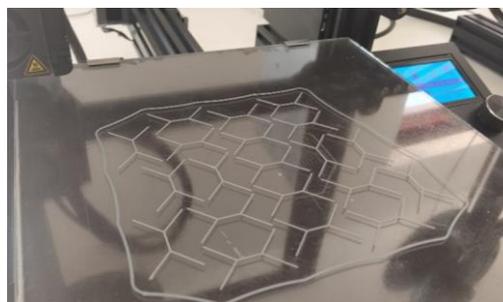
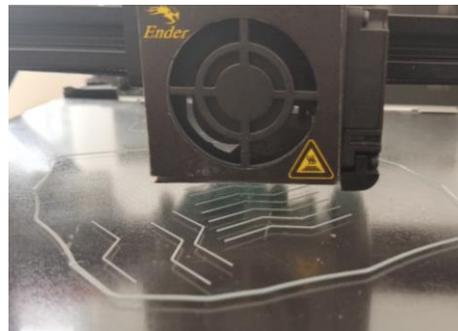
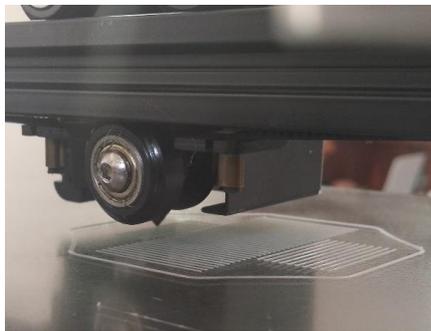
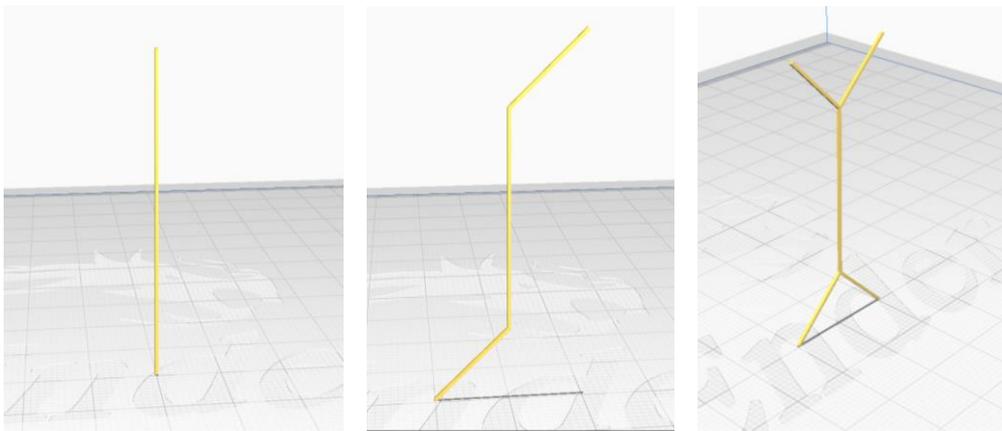
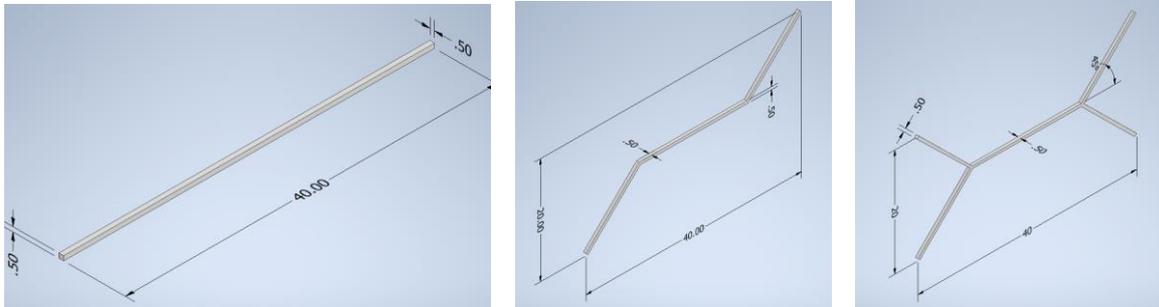


ELEVACION  
CORTE A-A  
ESC: 10:1

ELEVACION  
FIBRA 3  
ESC: 3:1

**ANEXO D: GRANULOMETRÍA MECÁNICA EN EL LABORATORIO.**

**ANEXO E: ENSAYO COMPRESIÓN INCONFINADA.**

**ANEXO F: DISEÑO E IMPRESIÓN 3D.**

## ANEXO G: ENSAYO DE PROPAGACIÓN DE ONDAS.

