

Efecto de la fibra de coco en propiedades mecánicas de suelos A-4

Effect of coir on the mechanical properties of A-4 soils

MIGUEL ÁNGEL BRINDIS TERATOL¹ - EDWIN GIOVANNY HORMAZA GUEVARA²

1. Estudiante del programa de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica de la Selva. México.

2. Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Geotecnia. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9562-0248>

miguebrindis@gmail.com - edwin.hormaza@escuelaing.edu.co

Recibido: 02/02/2025 Aceptado: 15/03/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La estabilización de suelos con fibras naturales representa una alternativa sostenible a los métodos químicos tradicionales, ofrece beneficios ambientales mientras mantiene efectividad técnica (Medina-Martínez et al., 2022). Entre las fibras disponibles, la fibra de coco tiene propiedades mecánicas favorables y se produce abundantemente en regiones tropicales (Asha'ari et al., 2022), aunque en pocas investigaciones se ha abordado su aplicación en suelos A-4.

Se evaluó el efecto de la adición de fibra de coco sin tratar en la resistencia al corte no drenada, así como el módulo de elasticidad de un suelo A-4 mediante ensayos de compresión confinada (ASTM D2166). Se prepararon trece configuraciones con contenidos de fibra de 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % y 2,0 %, y longitudes de 8 mm, 15 mm y 20 mm, en condiciones controladas de humedad óptima (11,4 %) y densidad seca máxima (1,9 g/cm³).

Los resultados muestran incrementos máximos de 300 % en resistencia al corte no drenada (1168 kPa) y 99,6 % en módulo de elasticidad (48,5 MPa) con respecto al suelo natural (292 kPa y 24,3 MPa). Se identificó interacción significativa entre porcentaje y longitud: fibras cortas (8 mm) alcanzan su óptimo al 1,5 %, en tanto que fibras largas (15-20 mm) mantienen mejoras sostenidas hasta 2,0 %. A su vez, la configuración óptima corresponde a 20 mm al 1,5 %.

Estos resultados confirman la viabilidad técnica de la fibra de coco como estabilizante sostenible para suelos limosos de baja plasticidad en aplicaciones de infraestructura vial.

Palabras claves: estabilización de suelos, fibras de coco, fibras naturales, sostenibilidad.

Abstract

Soil stabilization with natural fibers represents a sustainable alternative to traditional chemical methods, offering environmental benefits while maintaining technical effectiveness (Medina-Martínez et al., 2022). Among available fibers, coir exhibits favorable mechanical properties and is abundantly produced in tropical regions (Asha'ari et al., 2022), although few investigations have addressed its application in A-4 soils. The effect of untreated coir addition on undrained shear strength and elastic modulus of an A-4 soil was evaluated through unconfined compression tests (ASTM D2166). Thirteen different configurations were prepared with fiber contents of 0.5 %, 1.0 %, 1.5 %, and 2.0 %, and lengths of 8 mm, 15 mm, and 20 mm, under controlled conditions of optimum moisture content (11.4 %) and maximum dry density (1.9 g/cm³). Results show maximum increases of 300 % in undrained shear strength (1168 kPa) and 99.6 % in elastic modulus (48.5 MPa) compared to

natural soil (292 kPa and 24.3 MPa). A significant interaction between percentage and length was identified: short fibers (8 mm) reach their optimum at 1.5 %, while longer fibers (15-20 mm) maintain sustained improvements up to 2.0 %. The optimal configuration corresponds to 20 mm at 1.5 %.

These results confirm the technical viability of coir as a sustainable stabilizer for low-plasticity silty soils in road infrastructure applications.

Keywords: soil stabilization, coir, natural fibers, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La estabilización de suelos constituye una práctica fundamental en la ingeniería geotécnica moderna, orientada a mejorar las propiedades mecánicas de materiales que presentan limitaciones para su uso directo en obras de infraestructura (Medina-Martínez et al., 2022). Tradicionalmente, esta estabilización se ha hecho mediante la incorporación de aditivos químicos como cemento, cal o asfalto, los cuales, si bien resultan efectivos desde el punto de vista técnico, presentan desventajas significativas en materia de impacto ambiental, consumo energético y costos asociados (Salazar et al., 2023). La producción de cemento, por ejemplo, es intensiva en energía y responsable de emisiones significativas de dióxido de carbono, lo que contribuye al efecto invernadero global (Shukla et al., 2021).

La creciente conciencia sobre la sostenibilidad en la construcción ha impulsado la búsqueda de opciones ambientalmente responsables, como las fibras naturales, que mantienen o mejoran la efectividad técnica de los métodos convencionales (Medina-Martínez et al., 2022). Entre las fibras naturales disponibles, la fibra de coco representa una opción particularmente atractiva debido a su abundancia en regiones tropicales, bajo costo, resistencia tensional adecuada (95-230 MPa) y biodegradabilidad controlada (Sivakumar Babu y Vasudevan, 2008). En investigaciones previas se ha demostrado que la incorporación de fibras de coco en matrices de suelo puede incrementar la resistencia al corte entre 35 y 60 % (Consoli et al., 2005; Anggraini et al., 2015), mejorando además la ductilidad del material compuesto. Comparativamente, fibras sintéticas como el polipropileno han mostrado incrementos similares (50-80 %), aun cuando con un impacto ambiental considerablemente mayor (Tang et al., 2007).

Los suelos clasificados como A-4 según la metodología AASHTO, caracterizados como materiales limosos de baja plasticidad, se encuentran comúnmente en proyectos de infraestructura vial en Colombia y

presentan un comportamiento regular como material de subrasante. Sin embargo, existe un vacío técnico específico respecto al comportamiento de suelos A-4 reforzados con fibra de coco.

La mayoría de las investigaciones se han enfocado en suelos arcillosos de alta plasticidad (A-6, A-7) o suelos arenosos (Ayininuola y Oladotun, 2016; Chauhan et al., 2008), además de que existe información limitada sobre la optimización de parámetros de diseño como el porcentaje de adición y la longitud de fibra para suelos limosos. Esta carencia es particularmente relevante si se considera que en las investigaciones previas se ha evaluado una sola longitud de fibra por estudio o se ha mantenido constante el contenido mientras varía la longitud (Ahmad et al., 2023), impidiendo la identificación de interacciones entre variables.

Para esto, se implementó un diseño experimental factorial que permitió analizar sistemáticamente el efecto combinado de ambas variables sobre el comportamiento mecánico del suelo mediante ensayos de compresión confinada normalizados.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La adición de fibra de coco puede mejorar la resistencia y rigidez de suelos limosos de baja plasticidad (A-4), pero su efectividad técnica depende de la proporción y la longitud del refuerzo. Sin información específica sobre la interacción simultánea de estas variables, no es posible desarrollar especificaciones técnicas que permitan la implementación práctica de esta tecnología en proyectos de infraestructura vial.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar cuantitativamente el efecto de la adición de fibra de coco natural sobre la resistencia al corte no drenada y el módulo de elasticidad de un suelo de subrasante clasificado como A-4.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto individual del porcentaje de fibra (0,5 %, 1,0 %, 1,5 % y 2,0 %) sobre las propiedades mecánicas del suelo A-4.
- Evaluar la influencia de la longitud de fibra (8 mm, 15 mm y 20 mm) en el comportamiento mecánico del suelo estabilizado.

- Identificar la combinación óptima de contenido y longitud de fibra que maximice la resistencia al corte no drenada y el módulo de elasticidad.
- Analizar los patrones de interacción entre porcentaje y longitud de fibra para cada parámetro mecánico evaluado.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE

El refuerzo de suelos con fibras naturales: de la tradición a la innovación

El uso de fibras como elemento de refuerzo en materiales de construcción tiene raíces ancestrales. Civilizaciones antiguas empleaban paja, crin de caballo y fibras vegetales para mejorar las propiedades de adobes y morteros (Medina-Martínez et al., 2022). Vidal (1969) formalizó esta práctica empírica en la ingeniería geotécnica moderna con su técnica de tierra armada, mientras que Gray y Ohashi (1983) establecieron los fundamentos teóricos del comportamiento de materiales compuestos suelo-fibra con distribución aleatoria.

Desde entonces, la investigación ha demostrado consistentemente que la incorporación de fibras discretas en matrices de suelo puede incrementar en forma significativa la resistencia al corte y mejorar el comportamiento posfalla del material. Los mecanismos de transferencia de esfuerzos en la interfaz suelo-fibra, modelados inicialmente por Maher y Gray (1990), revelaron incrementos de hasta 200 % en la resistencia al corte para contenidos óptimos de fibra. En estudios más recientes se han confirmado y expandido estos hallazgos: las fibras mejoran las propiedades de deformación del suelo al retardar la propagación de grietas (Majid y Baba, 2023), y su uso en refuerzo de pavimentos puede reducir el espesor del pavimento y los costos de construcción (Kaushik y Singh, 2021; Shukla et al., 2022).

La fibra de coco: un refuerzo natural con propiedades destacables

La fibra de coco (coir) ha emergido como un material de refuerzo particularmente prometedor debido a su abundancia, bajo costo, biodegradabilidad y propiedades mecánicas favorables. Con resistencias a la tracción entre 95-230 MPa y módulos de elasticidad de 3-6 GPa (Sen y Reddy, 2011; Asha'ari et al., 2022), esta fibra se posiciona como viable para aplicaciones geotécnicas.

Su alta concentración de lignina (cerca del 46 %) la convierte en una de las fibras naturales más resistentes disponibles (Hima Bindu y Mallikarjuna, 2022).

Diversos estudios coinciden en rangos óptimos de aplicación consistentes. Para suelos expansivos, la investigación reporta reducciones significativas en el potencial de expansión y mejoras en la resistencia al corte no confinado de hasta 40-60 %, con contenidos de fibra entre 0,5 % y 1,5 % (Chauhan et al., 2008; Sivakumar y Vasudevan, 2008; Widiyanti et al., 2022). En suelos residuales y limosos, porcentajes de 0,75-1,25 % han demostrado maximizar las mejoras en resistencia y ductilidad, con incrementos en la resistencia al corte no drenado entre 35 y 45 % (Consoli et al., 2005; Anggraini et al., 2015; Hima Bindu y Mallikarjuna, 2022).

Un hallazgo notable es que la fibra de coco presenta ventajas significativas en cuanto a durabilidad y resistencia al deterioro en condiciones de humedad variable, superando a otras fibras naturales en estas condiciones (Anggraini et al., 2015). En investigaciones recientes se ha profundizado en el comportamiento mecánico del sistema suelo-fibra, desarrollando modelos como el Duncan-Chang modificado para predecir con mayor precisión las leyes de resistencia en suelos reforzados (Li et al., 2023).

Parámetros críticos de diseño

La efectividad del refuerzo depende de múltiples factores interrelacionados. Respecto al contenido de fibra, en estudios experimentales exhaustivos se ha identificado que los parámetros geotécnicos (densidad seca máxima, cohesión, ángulo de fricción interna y CBR) alcanzan valores máximos con contenidos entre 0,75 % y 1,2 % (Ayininuola y Oladotun, 2016). Contenidos superiores al 1,5 % pueden resultar contraproducentes debido a dificultades de mezcla y distribución no uniforme.

La longitud de fibra emerge como otro parámetro fundamental. En la bibliografía se identifica una longitud crítica entre 12-20 mm para maximizar el refuerzo (Li et al., 2023; Sivakumar y Vasudevan, 2008), aunque rangos entre 8-40 mm han mostrado efectividad, dependiendo del tipo de suelo y aplicación específica. Es preferible la distribución aleatoria de las fibras, ya que evita la creación de planos de debilidad específicos que podrían comprometer la integridad estructural del suelo reforzado (Jeludin y Suffri, 2019; Maher y Gray, 1990).

En recientes investigaciones se ha explorado además el efecto de la colocación estratégica de capas de geotextiles de coco, demostrando que la ubicación cerca de la superficie de carga resulta más efectiva, con incrementos en CBR de hasta 36 % cuando se posicionan en la interfaz subrasante-subbase (Bhole et al., 2023). El tiempo de curado también desempeña un papel importante: estudios con combinaciones de fibra de coco y estabilizadores químicos reportan que periodos de curado de 21 días producen mejoras significativamente superiores en cohesión, ángulo de fricción interna y resistencia al corte, en comparación con periodos de siete días (Gomes et al., 2023).

¿Qué faltaba por estudiar?

A pesar de los avances significativos en la comprensión del comportamiento de suelos reforzados con fibra de coco, persisten enormes vacíos en el conocimiento actual. El sesgo hacia suelos arcillosos y arenosos es evidente: la mayoría de los estudios se han enfocado en suelos arcillosos de alta plasticidad o en suelos arenosos (Ayininuola y Oladotun, 2016; Hima Bindu y Mallikarjuna, 2022). Además, existe investigación limitada específicamente a suelos limosos de baja plasticidad, clasificados como A-4. Esta carencia es bastante relevante, dado que dichos suelos son comunes en muchas regiones y presentan desafíos geotécnicos específicos que difieren de los suelos arcillosos o arenosos.

La interacción simultánea entre variables permanece poco explorada. En la mayoría de las investigaciones se evalúa una sola longitud de fibra, manteniendo constante el contenido (Ahmad et al., 2023) o viceversa, lo que impide establecer criterios de optimización integral. Si bien en algunos estudios recientes se han comenzado a explorar variaciones conjuntas de longitud y contenido (Li et al., 2023), la evaluación sistemática mediante diseños factoriales completos que permitan identificar interacciones y efectos sinérgicos sigue siendo un desafío pendiente.

Los rangos de contenido investigados son insuficientes. En varios estudios sobre el contenido óptimo de fibra, su análisis se limitó a porcentajes máximos del 1,0 % o 1,25 % (Anggraini et al., 2015), dejando sin explorar rangos potencialmente más efectivos, en particular para suelos con características específicas, como los A-4.

La estandarización metodológica es una asignatura pendiente. En los estudios existentes se puede apreciar una alta variabilidad en los métodos de preparación de muestras y acondicionamiento de fibras, lo que dificulta tanto la comparación directa de resultados como el establecimiento de especificaciones técnicas estandarizadas. Esta variabilidad se manifiesta en factores como la utilización de distintas relaciones de aspecto (L/D), la dependencia de las propiedades de la fibra con respecto a su origen geográfico, y el empleo de diversos tratamientos químicos o físicos para mejorar la durabilidad (Medina-Martínez et al., 2022).

Contribución de esta investigación

La presente investigación contribuye a llenar estas brechas mediante un estudio sistemático del efecto combinado del porcentaje (0,5 %, 1,0 %, 1,5 % y 2,0 %) y longitud de fibra (8 mm, 15 mm y 20 mm) de coco en suelos clasificados como A-4. Este enfoque factorial permitió caracterizar específicamente suelos limosos de baja plasticidad (A-4), una categoría subrepresentada en la bibliografía existente, pero común en aplicaciones de infraestructura vial, así como también evaluar la interacción simultánea entre porcentaje y longitud de fibra, identificando no solo valores óptimos individuales sino también efectos sinérgicos.

Igualmente, ayudó a explorar rangos extendidos de contenido de fibra (hasta 2,0 %), superando las limitaciones de estudios previos, y permitió proporcionar información técnica específica para la combinación suelo A-4 y fibra de coco, particularmente relevante en regiones donde estos materiales son abundantes y su uso conjunto representa una solución técnica, económica y ambientalmente sostenible para mejoramiento de suelos en proyectos de infraestructura vial.

METODOLOGÍA

La metodología de investigación se estructuró siguiendo un enfoque experimental cuantitativo, dividido en cuatro etapas: caracterización de los materiales, diseño experimental, preparación de muestras y evaluación del desempeño mecánico de suelos estabilizados con fibra de coco. Gracias a esta aproximación metodológica, se pudieron establecer relaciones causa-efecto entre las variables independientes (porcentaje y longitud de



Figura 1. Curva de distribución granulométrica.

fibra) y las variables dependientes (resistencia al corte no drenada y módulo de elasticidad), por medio de un diseño experimental factorial completo.

El objetivo principal fue hacer una evaluación cuantitativa del incremento en la resistencia mecánica de un suelo de subrasante clasificado como A-4, mediante la adición controlada de fibra de coco natural. Para garantizar la validez, reproducibilidad y confiabilidad de los resultados, se implementaron procesos estandarizados basados en normas técnicas ASTM (American Society for Testing and Materials) e INV (Instituto Nacional de Vías de Colombia), con control riguroso de variables experimentales y replicación de ensayos.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo metodológico que sintetiza la secuencia de actividades ejecutadas durante la investigación, desde la caracterización inicial de materiales hasta el análisis estadístico final de los resultados obtenidos (figura 1).

Caracterización de los materiales

El suelo utilizado para esta investigación corresponde a un material de subrasante clasificado como A-4 según el método AASHTO, lo que indica que es un suelo limoso de baja plasticidad con comportamiento aceptable a regular como material de subrasante. Por otro lado, de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material se clasifica como arena arcillosa (SC), evidenciando una matriz granular con presencia significativa de finos arcillosos que representan el 41 % del peso total de la muestra.

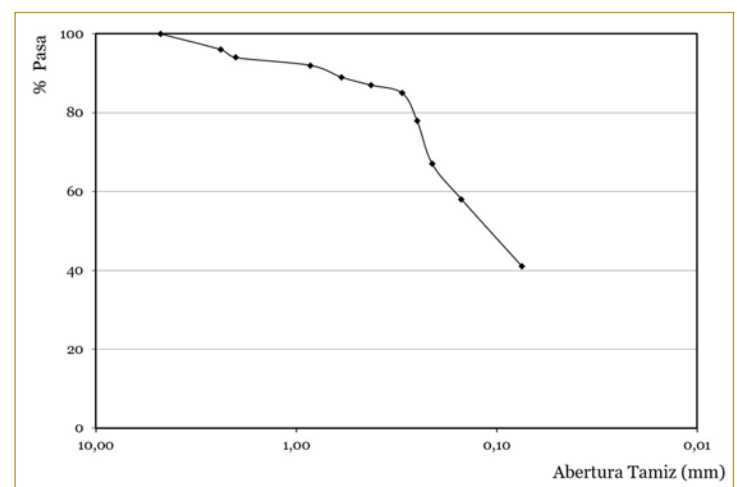


Figura 2. Curva de distribución granulométrica.

La caracterización completa del suelo se realizó mediante una serie de ensayos normalizados que incluyen distribución granulométrica por el método de tamizado, determinación de límites de consistencia que comprenden límite líquido (22 %), límite plástico (15 %) e índice de plasticidad (7 %), gravedad específica de sólidos y ensayos de compactación mediante el método Proctor modificado, a través del cual se obtuvieron un peso unitario seco máximo de 18,9 kN/m³ y un contenido de humedad óptimo del 11,4 %. Adicionalmente, se determinaron las propiedades mecánicas por medio del ensayo de compresión inconfina, del cual se obtuvieron la resistencia al corte no drenada (S_u) y el módulo de elasticidad (E).

A renglón seguido, se muestra la curva de distribución granulométrica del suelo de estudio (figura 2), y se presenta un resumen de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de análisis (tabla 1).

Tabla 1
Propiedades físicas y mecánicas del suelo de análisis

Característica	Procedimiento de Referencia	Valor
Coefficiente de Uniformidad (C_u)	-	8,9
Coefficiente de Curvatura (C_c)	-	1,0
Límite Líquido (%)	ASTM D4318	22
Límite Plástico (%)	ASTM D4318	15,0
Límite de Contracción (%)	ASTM D4943	13,0
Índice de Plasticidad (%)	ASTM D4318	7,0
Gravedad Específica	ASTM D854	2,6
Humedad óptima (%)	ASTM D1557	11.4
Densidad seca máxima (g/cm^3)	ASTM D1557	1,9
Peso Unitario Seco máximo (kN/m^3)	ASTM D1557	18,9
Resistencia al corte no Drenada (kPa)	ASTM D2166	292,5
Módulo de Elasticidad (Mpa)	ASTM D2166	24,3

Con respecto a la fibra de coco, se determinaron propiedades físicas como el diámetro, la densidad y la gravedad específica. Para el caso de estudio se utilizó fibra de coco natural, sin tratamiento químico previo, con el objetivo de evaluar las propiedades inherentes del material en su estado original.

A continuación, se presenta el resumen de los parámetros físicos obtenidos para la fibra empleada en la estabilización (tabla 2).

Diseño experimental

Con el propósito de evaluar el incremento de la resistencia al corte no drenada (S_u) y el módulo elástico (E)

de un suelo de subrasante clasificado como A-4 según la AASHTO, se diseñó un programa experimental para analizar el efecto de dos variables independientes: el porcentaje de adición de fibra de coco y la longitud de las fibras. Esto permite evaluar tanto los efectos individuales como las posibles interacciones entre ambas variables sobre las propiedades mecánicas del suelo estabilizado.

La selección de los rangos de estudio se fundamentó en investigaciones previas reportadas en la bibliografía. Autores como Ahmad et al. (2023) y Ayininuola y Olatodun (2016) determinaron que el porcentaje óptimo de fibra de coco oscila entre 1,0 % y 1,5 % con respecto a la masa seca del suelo, valores que maximizan el incre-

Tabla 2
Propiedades físicas de la fibra de coco

Característica	Procedimiento de Referencia	Valor
Diámetro (mm)	-	0,32
Densidad (g/cm^3)	-	1,15
Gravedad específica	-	1,15

mento en la resistencia sin comprometer la trabajabilidad de la mezcla. Con base en estos antecedentes, se establecieron porcentajes de fibra de 0,5 %, 1,0 %, 1,5 % y 2,0 %, para cubrir un rango de valores que estén por debajo o por encima de un valor óptimo potencial.

En cuanto a la longitud de las fibras, se seleccionaron tres dimensiones: 8 mm, 15 mm y 20 mm, considerando que en la bibliografía se sugiere que longitudes muy cortas pueden ser inefectivas para el refuerzo, mientras que fibras excesivamente largas pueden generar problemas de distribución homogénea y trabajabilidad durante la mezcla.

El diseño experimental comprende doce combinaciones de porcentaje y longitud de fibra, más una muestra de control sin adición de fibra, totalizando trece condiciones de ensayo. Para cada combinación se prepararon dos réplicas, con el objetivo de verificar la reproducibilidad de los resultados, totalizando veintiséis especímenes de ensayo. En todas las muestras se evaluaron la resistencia al corte no drenada (S_u) y el módulo de elasticidad (E) mediante ensayos de compresión confinada.

En la tabla siguiente se presenta la nomenclatura adoptada para identificar las combinaciones consideradas en la estabilización (tabla 3).

Preparación de las muestras

Todas las muestras se prepararon siguiendo un procedimiento estandarizado, con el objetivo de lograr condiciones homogéneas y reproducibles. Las muestras se acondicionaron a los valores de humedad óptima (11,4 %) y densidad seca máxima ($1,9 \text{ g/cm}^3$), determinados mediante el ensayo modificado de compactación, garantizando así condiciones de máxima densificación y resistencia del suelo base. La preparación se realizó en cuatro pasos:

- **Paso 1. Acondicionamiento de humedad:** Inicialmente, el suelo se secó en horno a 110°C , hasta alcanzar masa constante, eliminando por completo la humedad natural. Después se adicionó agua de manera gradual mediante aspersión, mezclando continuamente hasta alcanzar el contenido de humedad óptimo del 11,4 %. Este proceso garantizó una distribución uniforme de la humedad en toda la masa del suelo.
- **Paso 2. Incorporación de fibra de coco:** Una vez acondicionado el suelo a la humedad óptima, se procedió a la adición de la fibra de coco según los porcentajes establecidos en el diseño experimental. Previamente, las fibras se separaron de manera

Tabla 3
Nomenclatura y codificación de las mezclas suelo-fibra de coco según porcentaje de adición y longitud de fibra

No. Modelo	Nomenclatura	% Adición de fibra	Longitud de fibra (mm)
1	SN	-	-
2	L8 - 0.5	0.5	8
3	L8 - 1.0	1.0	8
4	L8 - 1.5	1.5	8
5	L8 - 2.0	2.0	8
6	L15 - 0.5	0.5	15
7	L15 - 1.0	1.0	15
8	L15 - 1.5	1.5	15
9	L15 - 2.0	2.0	15
10	L20 - 0.5	0.5	20
11	L20 - 1.0	1.0	20
12	L20 - 1.5	1.5	20
13	L20 - 2.0	2.0	20

manual, cortadas a las longitudes especificadas (8 mm, 15 mm y 20 mm) y distribuidas uniformemente para evitar la formación de aglomeraciones. La fibra se incorporó mediante mezclado manual durante aproximadamente diez minutos, asegurando una distribución homogénea de las fibras en toda la matriz del suelo.

- **Paso 3. Homogeneización:** Después de la incorporación de las fibras, se permitió un periodo de homogeneización del contenido de humedad de 24 horas en ambiente controlado, manteniendo las muestras completamente selladas para prevenir pérdidas de humedad y permitir la migración uniforme del agua a través de la matriz suelo-fibra.
- **Paso 4. Compactación:** Finalmente, el material acondicionado se compactó en moldes cilíndricos para obtener probetas de 50 mm de diámetro y 105 mm de altura, garantizando la densidad seca de ensayo ($1,9 \text{ g/cm}^3$) y manteniendo una relación altura/diámetro de 2:1, dentro del rango recomendado de 2,0 a 2,5 para ensayos de compresión inconfiada. El proceso de compactación se realizó en cinco capas, con 56 golpes por capa para asegurar uniformidad en la densidad.

A continuación, se puede apreciar un registro fotográfico del proceso de preparación de las muestras (figura 3).

Evaluación del desempeño mecánico de suelos reforzados con fibra de coco

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de compresión in-

confinada realizados sobre las combinaciones de suelo estabilizado con fibra de coco, así como la muestra de control sin adición de fibra. Los resultados comprenden las curvas esfuerzo-deformación, los valores de resistencia al corte no drenada (S_u) y el módulo de elasticidad (E) determinados para cada configuración del diseño experimental.

A renglón seguido, se presentan las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para todas las combinaciones evaluadas. Las curvas muestran el comportamiento mecánico del suelo natural y de las mezclas estabilizadas con fibra de coco, registrando la respuesta del material desde el inicio de la carga hasta la falla (figuras 4, 5 y 6).

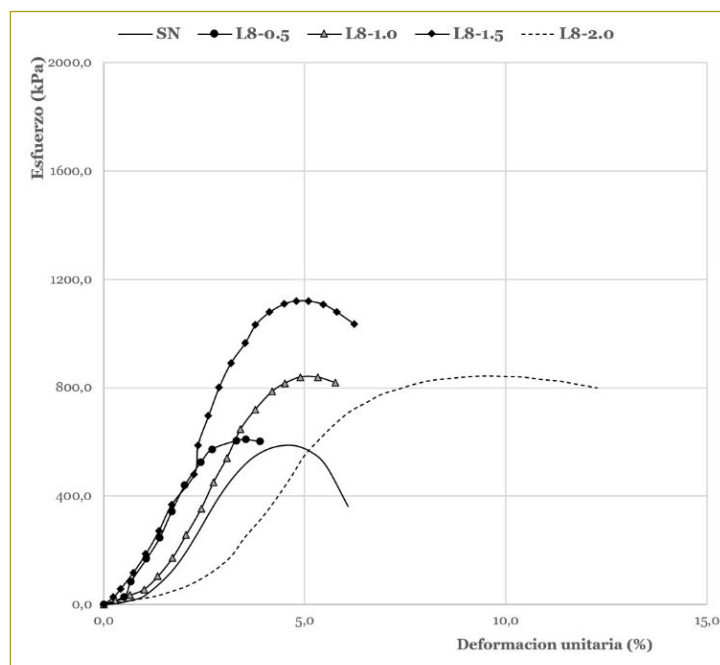


Figura 4. Curvas esfuerzo-deformación para el suelo natural y suelo con adición de fibra de coco de longitud 8 mm.

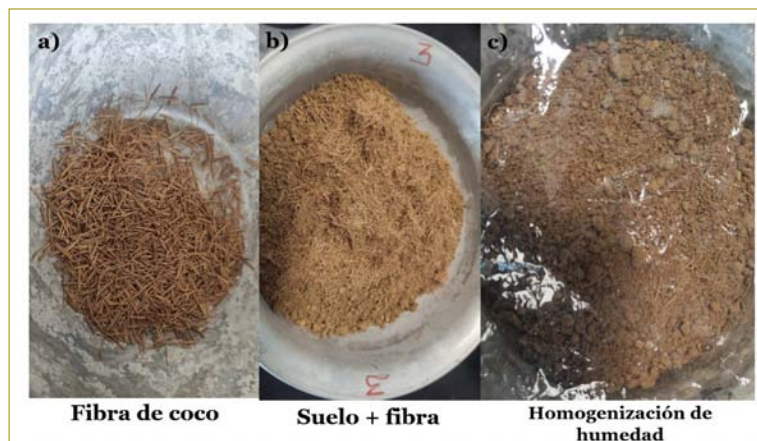


Figura 3. Preparación de muestras.

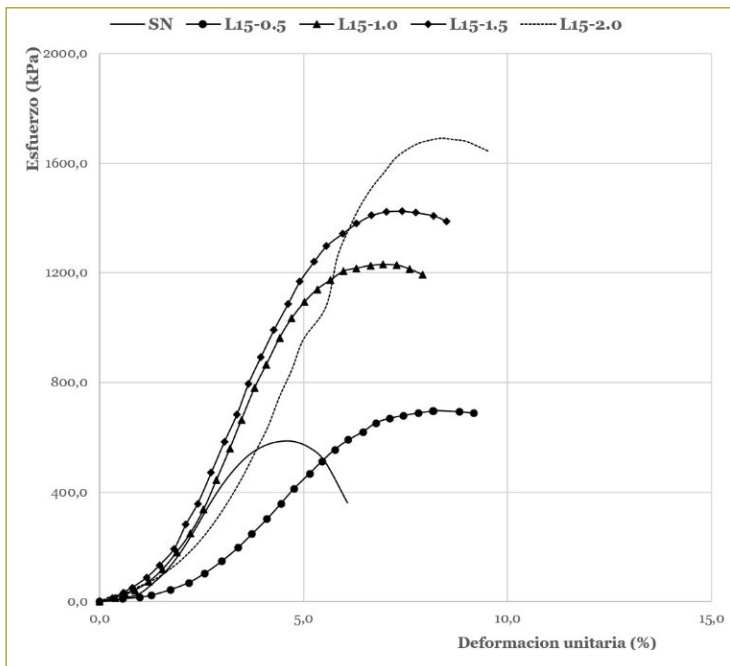


Figura 5. Curvas esfuerzo-deformación para el suelo natural y suelo con adición de fibra de coco de 15 mm de longitud.

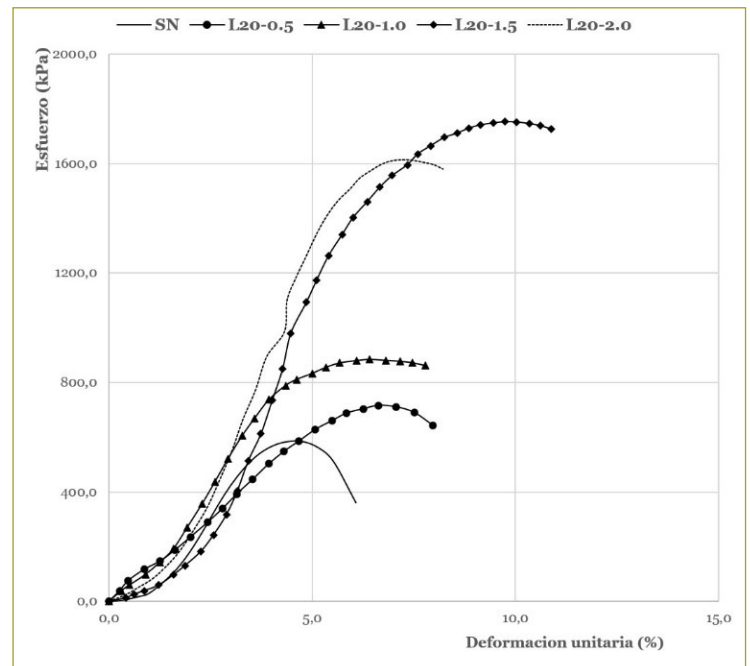


Figura 6. Curvas esfuerzo-deformación para el suelo natural y suelo con adición de fibra de coco de 20 mm de longitud.

Igualmente, se presentan los resultados promedio de los ensayos de compresión inconfiada (ASTM D2166) para las trece configuraciones evaluadas. Cada valor reportado es el promedio aritmético de dos especímenes, los cuales exhibieron comportamiento consistente durante los ensayos (coeficiente de variación $<6\%$ para resistencia y $<8\%$ para módulo de elasticidad). Se determinaron tres parámetros: la resistencia a la compresión inconfiada (q_u), definida como el esfuerzo máximo axial; la resistencia al corte no drenada ($S_u = q_u/2$), y el módulo de elasticidad (E), calculado como la pendiente en la región elástica lineal ($0,1-0,5\%$ de deformación) de las curvas esfuerzo-deformación (tabla 4).

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Análisis del comportamiento esfuerzo-deformación

El análisis comparativo de las curvas esfuerzo-deformación (figuras 4, 5 y 6) revela transformaciones fundamentales en la respuesta mecánica del suelo A-4 debido a la incorporación de fibra de coco. El suelo natural presenta una curva típica de materiales frágiles, caracterizada por una fase elástica inicial relativamente corta, seguida de una falla súbita con pérdida repentina de resistencia pospico.

La incorporación de fibras introduce cambios progresivos en este comportamiento. Se observa que las fibras de 8 mm generan un incremento modesto en la resistencia máxima, pero mantienen un comportamiento relativamente frágil, similar al suelo natural. En contraste, las fibras de 15 mm y 20 mm modifican significativamente la forma de las curvas, introduciendo una fase de endurecimiento por deformación más pronunciada y un comportamiento pospico más dúctil.

Este fenómeno se explica por el mecanismo de movilización gradual de las fibras durante la carga. Inicialmente, la matriz de suelo soporta la mayor parte de la carga aplicada. A medida que se desarrollan las primeras microgrietas, las fibras se empiezan a activar, proporcionando resistencia y redistribuyendo los esfuerzos (Medina-Martínez et al., 2022). Las fibras más largas generan un efecto de adherencia que mantiene la integridad estructural del material compuesto más allá del punto de falla. La deformación en la falla también se incrementa con la adición de fibras, particularmente para longitudes de 20 mm, donde se observan deformaciones hasta 2,5 veces mayores que el suelo natural.

Tabla 4
Parámetros mecánicos obtenidos del ensayo de compresión inconfínada para diferentes combinaciones de fibra de coco

No. Modelo	Nomenclatura	qu (Kpa)	CV (%)	Su (Kpa)	CV (%)	E (Mpa)	CV (%)
1	SN	585	4,3	292	4,3	24,3	6,2
2	L8 - 0.5	811	3,1	406	3,1	25,3	7,1
3	L8 - 1.0	840	3,5	420	3,5	28,1	5,0
4	L8 - 1.5	1495	2,8	747	2,8	38,2	7,8
5	L8 - 2.0	1124	2,9	562	2,9	44,5	6,1
6	L15 - 0.5	929	4,0	464	4,0	25,4	5,5
7	L15 - 1.0	1640	4,6	820	4,6	39,0	4,2
8	L15 - 1.5	1899	5,1	950	5,1	42,2	4,3
9	L15 - 2.0	2253	5,5	1127	5,5	48,5	4,4
10	L20 - 0.5	954	4,6	477	4,6	27,5	4,9
11	L20 - 1.0	1179	4,2	589	4,2	30,9	5,1
12	L20 - 1.5	2337	4,3	1168	4,3	43,4	7,5
13	L20 - 2.0	2153	5,0	1076	5,0	48,4	6,8

Efecto del porcentaje de fibra en la resistencia al corte no drenado (Su)

A continuación, se presenta el efecto del porcentaje de fibra de coco en la resistencia al corte no drenado (figura 7), al tiempo que se revela una relación no lineal entre el porcentaje de fibra de coco y el Su; además, se puede ver el incremento porcentual de resistencia al corte con respecto al suelo natural para todos los modelos analizados (figura 8).

Para fibras de 8 mm, se observa un incremento progresivo de hasta el 1,5 %, alcanzando mejoras del 156 % respecto al suelo natural. Para porcentajes superiores al 1,5 %, se ve una reducción en el incremento de Su, disminuyendo a valores del 93 %, lo que sugiere que la adición de fibra de coco en un porcentaje del 1,5 % es óptima para alcanzar los mayores valores de resistencia con esta longitud específica.

Para fibras de 15 mm, la tendencia es similar pero desplazada hacia porcentajes ligeramente mayores, con el óptimo ubicándose alrededor del 1,5 y 2,0 %, logrando un incremento de resistencia del 286 %. Las fibras de 20 mm presentan el comportamiento más interesante, manteniendo incrementos sostenidos hasta

el 1,5 %, donde alcanzan un incremento de la resistencia al corte del 300 %, lo que indica una mayor eficiencia de refuerzo para longitudes mayores (figura 8).

Esta variabilidad en el comportamiento según la longitud de fibra se puede explicar por la teoría de longitud crítica de refuerzo (Ahmad et al., 2023). Es posible que las fibras cortas (8 mm) no desarrollen completamente su capacidad de transferencia de esfuerzos debido a limitaciones en la longitud de anclaje, mientras que las fibras largas (20 mm) tienen mayor superficie de contacto con la matriz, lo que permite una mejor movilización de su resistencia tensional.

La reducción en la efectividad para porcentajes elevados (superiores al 2,0 %) se asocia con problemas de distribución espacial de las fibras. Concentraciones excesivas pueden generar aglomeraciones que actúan como puntos débiles que crean planos de falla y disminuyen la eficiencia del refuerzo (Lone y Bawa, 2018).

El mecanismo de refuerzo se sustenta en la eficiente transferencia de esfuerzos mediante adherencia y fricción entre la superficie de la fibra y la matriz de suelo. Esta interacción, maximizada por la mayor superficie

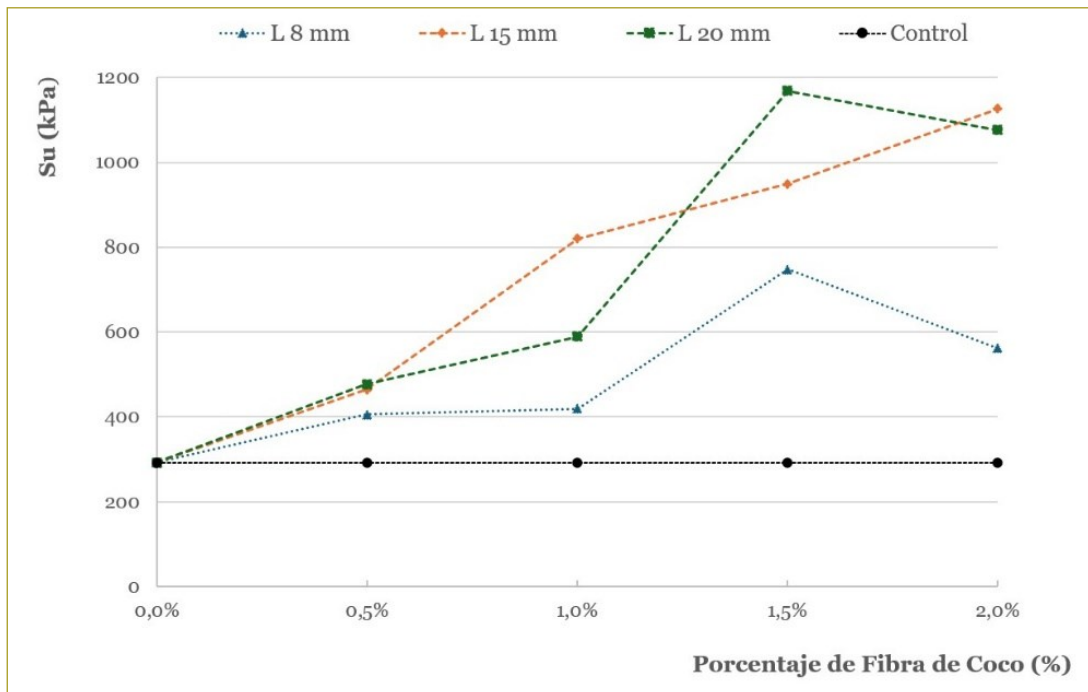


Figura 7. Efecto del porcentaje de fibra en la resistencia al corte no drenada.

de contacto de las fibras de 20 mm, permite un mejor anclaje y activación de la resistencia a la tracción del refuerzo. No obstante, la efectividad del refuerzo se deteriora para concentraciones superiores al 1,5 %, donde la aglomeración de las fibras se convierte en el

mecanismo de falla dominante. Las concentraciones excesivas impiden una distribución homogénea, creando planos débiles que reducen la eficiencia global del refuerzo y, por ende, establecen el límite superior del porcentaje de adición óptimo.

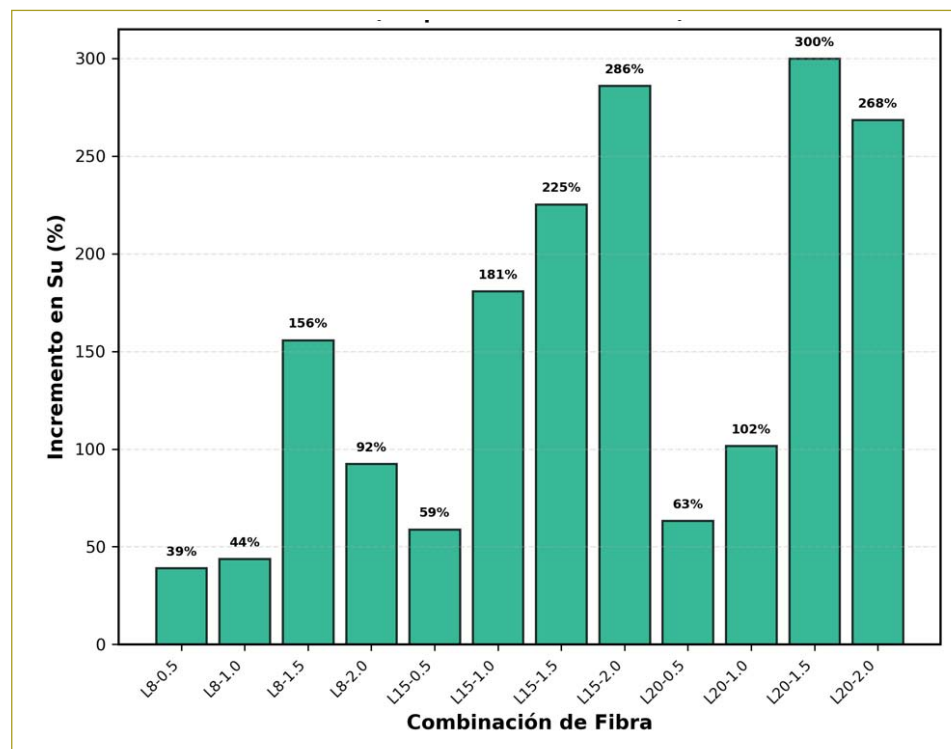


Figura 8. Incremento de la resistencia al corte para todas las configuraciones.

Influencia de la longitud de fibra en el módulo de elasticidad (E)

A renglón seguido se presenta el efecto del porcentaje de fibra de coco en el módulo de elasticidad (figura 9), al igual que el porcentaje de incremento del módulo de elasticidad para todas las configuraciones (figura 10).

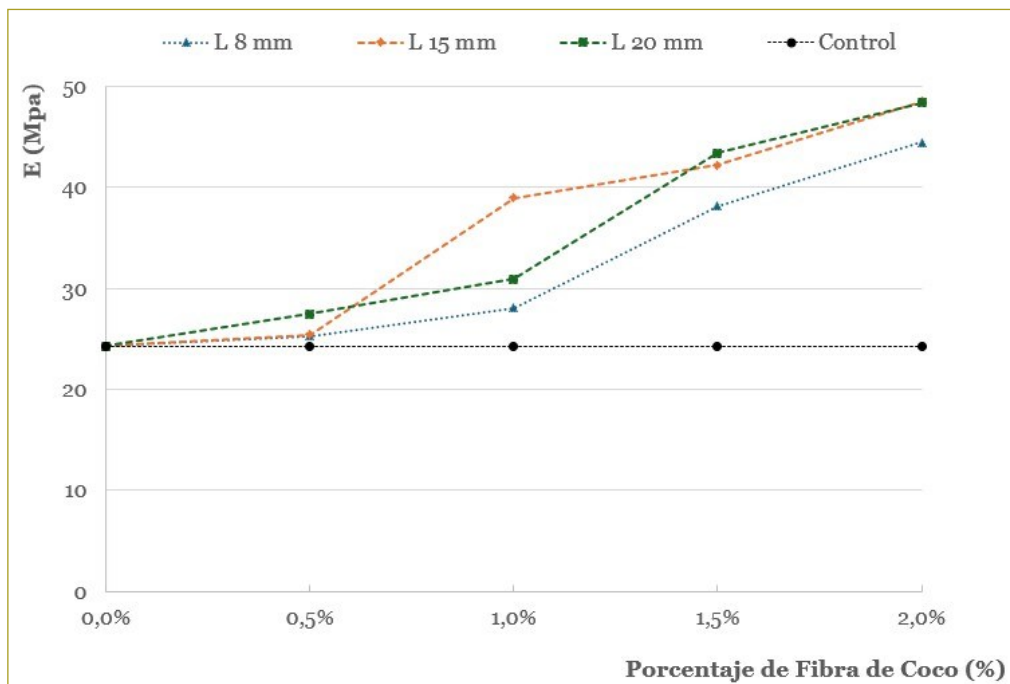


Figura 9. Efecto del porcentaje de fibra en el módulo de elasticidad.

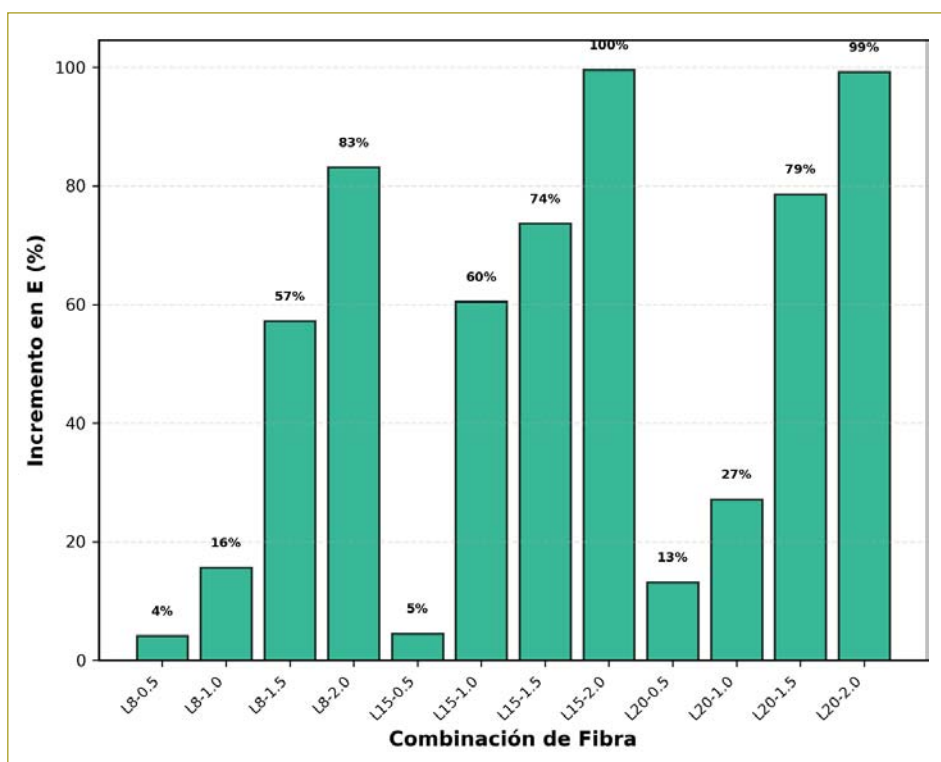


Figura 10. Porcentaje de incremento del módulo de elasticidad para todas las configuraciones.

Para fibras de 8 mm, se observa un incremento con una mejora inicial de 4,1 % para una adición de fibra del 0,5 %, seguida de aumentos graduales de 16 % para el 1,0 % y de 57 % para el 1,5 %, hasta alcanzar un incremento del 83 % con respecto al suelo natural. Este comportamiento progresivo indica que las fibras cortas requieren porcentajes crecientes para desarrollar su efectividad, alcanzando su máximo desempeño en concentraciones elevadas.

Para fibras de 15 mm, este comportamiento presenta dos fases claramente diferenciadas. Se observa un aumento inicial del 5 % para un porcentaje de adición de fibra de coco del 0,5 %, seguido de un salto significativo al incorporar el 1,0 % de fibra, donde el módulo alcanza un 60 %. A partir de este punto, el módulo se incrementa de manera sostenida pero gradual, hasta un valor máximo del 100 %.

Las fibras de 20 mm presentan el comportamiento más uniforme y predecible de las tres longitudes evaluadas. Se observa un incremento inicial del 13 % para incorporaciones de fibra del 0,5 %, seguido de aumentos progresivos hasta alcanzar un incremento del 99 % para adiciones de fibra del 2,0 %. Los valores finales de las fibras de 15 mm y 20 mm son prácticamente equivalentes, lo que indica que ambas longitudes alcanzan un límite superior de efectividad similar en las mismas condiciones de compactación.

El comportamiento progresivo y no lineal observado es consistente con los hallazgos reportados por Tang et al. (2007), quienes investigaron el comportamiento mecánico de suelos arcillosos reforzados con fibras cortas de polipropileno y estabilizados con cemento. Estos autores documentaron incrementos graduales del módulo de elasticidad que alcanzaban valores del 80-100 % con porcentajes de adición de fibra entre 1,5-2,0 %, rango similar al de la presente investigación, donde se obtuvieron incrementos del 83,1 % para fibras de 8 mm y cercanos al 100 % para fibras de 15 mm y 20 mm, para una adición de fibra del 2 %.

Interacción porcentaje-longitud de fibra

El análisis conjunto del efecto de la longitud de fibra y el porcentaje de adición revela patrones de interacción que varían significativamente según el parámetro mecánico evaluado. Para la resistencia al corte no drenada (S_u) se observa una interacción creciente, donde el efecto

de la longitud de fibra se amplifica dramáticamente a medida que aumenta el porcentaje de adición. A porcentajes bajos de fibra de coco (0,5 %), la diferencia en S_u entre fibras de 8 mm y 20 mm es pequeña, lo que indica que la longitud de fibra tiene impacto limitado cuando la concentración es insuficiente para formar una red de refuerzo efectiva. Sin embargo, a porcentajes elevados de incorporación de fibra de coco (2,0 %) esta diferencia se aumenta, evidenciando que las fibras largas desarrollan su capacidad de refuerzo completa solamente cuando existe suficiente densidad de fibras para formar una red.

Por otro lado, el módulo de elasticidad exhibe un patrón de interacción diferente. A porcentajes bajos (0,5 %), las tres longitudes de fibra producen módulos similares con variaciones dentro de un 9 %, convergencia que se intensifica a porcentajes elevados (adición del 2,0 % de fibra), donde los valores del módulo de elasticidad se encuentran en un rango entre 44,5 y 48,5 MPa.

Implicaciones prácticas

Los hallazgos tienen implicaciones prácticas directas y significativas para el contexto colombiano, en el que la producción de coco es alta y las vías terciarias de afirmado son predominantes; la fibra de coco emerge, entonces, como una solución de ingeniería verde, local y económicamente ventajosa. El incremento del 300 % en el S_u se traduce directamente en una mejora sustancial de la capacidad portante y la resistencia a la deformación de la subrasante. Al estabilizar estos suelos, se eleva el módulo de resiliencia del material, lo que permite reducir potencialmente el espesor estructural requerido en las capas de base o subbase, optimizando el diseño del pavimento.

Además de mitigar problemas geotécnicos comunes, como el ahuellamiento y la pérdida de banca por inestabilidad al corte, esta técnica promueve la economía circular al ofrecer un uso de alto valor a un residuo agroindustrial, alineándose con las directrices de infraestructura sostenible del país. En ese orden de ideas, la implementación de la mezcla óptima (20 mm al 2,0 %) representa, por lo tanto, una alternativa robusta y ambientalmente responsable frente a los estabilizadores tradicionales de alto impacto ambiental, como el cemento o la cal.

CONCLUSIONES

La incorporación de fibra de coco en suelos clasificados como A-4 genera mejoras significativas en las propiedades mecánicas, con incrementos en la resistencia al corte no drenada de hasta 300 % y en el módulo de elasticidad de hasta 99,6 % para las configuraciones óptimas (longitud de fibra 20 mm y porcentaje de adición del 1,5 %). Estos resultados demuestran la viabilidad técnica de la fibra de coco como alternativa sostenible a los métodos tradicionales de estabilización química, particularmente en aplicaciones de infraestructura vial donde estos suelos son comunes.

El efecto del porcentaje de adición de fibra de coco es fuertemente dependiente de la longitud de fibra empleada. Las fibras cortas (8 mm) alcanzan su óptimo al 1,5 % de adición, mientras que las fibras largas (15 mm y 20 mm) mantienen incrementos sostenidos hasta el 2,0 %. La configuración que proporcionó el mejor balance entre resistencia y eficiencia de material corresponde a fibras de 20 mm al 1,5 % ($S_u = 1168$ kPa, incremento del 300 %), seguida por fibras de 15 mm al 2,0 % ($S_u = 1127$ kPa, incremento del 286 %).

La interacción entre porcentaje y longitud de fibra presenta patrones diferenciados según el parámetro mecánico evaluado. Para la resistencia al corte no drenada se observa una tendencia creciente, mientras que para el módulo de elasticidad se evidencia convergencia hacia un límite superior, independientemente de la longitud de fibra. Esta diferencia implica que en la optimización del refuerzo se deben considerar los requerimientos específicos de cada aplicación.

Los resultados demuestran la viabilidad técnica y la sostenibilidad de la fibra de coco como una alternativa a los métodos tradicionales de estabilización química (como la cal o el cemento), reduciendo la dependencia de estos estabilizantes. El empleo de este residuo agroindustrial en subrasantes viales no solo optimiza la capacidad portante y la resistencia a la deformación de los suelos A-4, sino que también promueve la economía circular y la construcción de infraestructura verde en regiones con alta disponibilidad de coco.

Para trasladar estos resultados a aplicaciones prácticas de ingeniería con mayor robustez, se recomienda enfocar las futuras líneas de investigación en la evaluación de la respuesta a esfuerzos tridimensionales mediante ensayos triaxiales, la determinación de la durabilidad a largo plazo de los suelos reforzados y el análisis de la

estabilidad volumétrica del material frente a cambios considerables de humedad.

Los resultados obtenidos son consistentes con la bibliografía existente sobre refuerzo de suelos con fibras naturales, particularmente con los incrementos del 80-100 % reportados por Tang et al. (2007) para materiales similares. La presente investigación contribuye al conocimiento existente al proporcionar información específica sobre suelos A-4.

Es fundamental reconocer que la presente investigación se desarrolló con restricciones de tiempo que limitaron el tamaño muestral a solo dos réplicas por cada combinación de fibra y porcentaje. Consecuentemente, la ausencia de un análisis estadístico inferencial robusto impide establecer con certeza si las diferencias cuantificadas en los parámetros mecánicos entre las configuraciones son estadísticamente significativas o meramente atribuibles a la variabilidad experimental inherente; por lo tanto, los resultados obtenidos, si bien son altamente prometedores, se deben interpretar con un carácter exploratorio.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por el apoyo institucional dado para el desarrollo de esta investigación, así como al Laboratorio de Suelos y Pavimentos por el préstamo de insumo y de equipos de laboratorio.

Autoría

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses. Esta sección solo se debe incorporar al texto en su versión definitiva, una vez el artículo haya sido aceptado.

REFERENCIAS

- Ahmad, J., Rughan, N. R., Ibrahim, A., Rosli, M. I. F., y Abdul Rahman, A. S. (2023). Laboratory and numerical analysis on the effect of using coconut fibre as additive towards residual shear strength of soil for slope construction. *ES-TEEM Academic Journal*, 19, 1-9. <https://ir.uitm.edu.my/id/eprint/76035>
- Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B. B., y Nahazanan, H. (2015). Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement*, 59, 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.059>
- Arathi, K. U., Athulya, K. M., Vinaya, V., Pooja, P. V., y Athira, V. V. (2022). Stabilization of black cotton soil using coconut fiber, 10, 1-6. <https://doi.org/10.7770/safer-V10N1-art2547>

- Asha'ari, M. A., Rahman, E. K. A., Ratnayake, U., Tan, S. J., y Shams, S. (2021). Field evaluation of using coconut husk and fibre to control slope erosion. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (vol. 646, N.º 1, p. 012044). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/646/1/012044>
- Ayininuola, G. M., y Oladotun, P. O. (2016). Geotechnical properties of coconut coir fiber soil mixture. *Journal of Civil Engineering Research*, 26(4), 79-85. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20160604.01>
- Bhole, C. R., Sunitha, V., y Mathew, S. (2025). Coir geotextile reinforcement for sustainable pavements: an experimental investigation into structural behavior. *Int. J. Pavement Res. Technol.*, 18, 600-613 <https://doi.org/10.1007/s42947-023-00367-y>
- Chauhan, M. S., Mittal, S., y Mohanty, B. (2008). Performance evaluation of silty sand subgrade reinforced with fly ash and fibre. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(5), 429-435. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.02.001>
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D., y Coop, M. R. (2005). Effect of fiber reinforcement on the isotropic compression behavior of a sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1434-1436. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412005131:111434>
- DeepL GmbH (2023). DeepL Translator [software]. <https://www.deepl.com/translator>
- Gomes, F. S., Motta, M. F. B., Bernardes, G. D. P., y Soares, P. V. (2023). Influence of coconut fiber on the microstructural, mechanical and hydraulic behavior of unsaturated compacted soil. *Soils and Rocks*, 46(2), e2023013322. <https://doi.org/10.28927/SR.2023.013322>
- Gray, D. H., y Ohashi, H. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 335-353. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(335))
- Hima Bindu, G., y Mallikarjuna, V. (2022). Improving the geotechnical properties of silty sands by using GGBS and coir fibre. En P. G. Kumar, K. V. L. Subramaniam, S. M. Santhakumar, y N. Satyam (eds.), *Recent Advances in Civil Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, 233. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0189-8_24
- Jeludin, M., y Suffri, N. (2017, July). The effects of coir fibre on consolidation behaviour of soft clay. En *Global Civil Engineering Conference* (pp. 1323-1330). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_94
- Kaushik, D., y Singh, S. K. (2021). Use of coir fiber and analysis of geotechnical properties of soil. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4418-4422. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.255>
- Li, H., Yang, J., Yang, D. et al. (2024). Fiber-reinforced polymer waste in the construction industry: a review. *Environ Chem Lett*, 22, 2777-2844. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01769-5>
- Lone, I. A., y Bawa, E. A. (2018). Utilization of Fly-Ash and coir fibre in soil reinforcement: a review. *International Journal of Engineering Development and Research*, 6(1), 488-489. <https://rjwave.org/IJEDR/viewpaperforall?paper=IJE DR1801083>
- Maher, M. H., y Gray, D. H. (1990). Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers. *Journal of Geotechnical Engineering*, 116(11), 1661-1677. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1990\)116:11\(1661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1990)116:11(1661))
- Majid, A. E., Baba, K., y Razzouk, Y. (2023). Assessing the impact of plant fibers on swelling parameters of two varieties of expansive soil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100408>
- Medina-Martínez, C. J., Sandoval-Herazo, L. C., Zamora-Castro, S. A., Vivar-Ocampo, R., y Reyes-González, D. (2022). Natural fibers: an alternative for the reinforcement of expansive soils. *Sustainability*, 14(15), 9275. <https://doi.org/10.3390/su14159275>
- OpenAI (2023). ChatGPT (Mar 14 version) [Large language model]. <https://chat.openai.com/>
- Salazar, M. P. S., Martínez, J. D. A., Cardoso, V. R., y Góngora, I. A. M. G. (2023). Evaluación de la resistencia al corte de un suelo con refuerzo de fibra de coco. *Revista Contemporânea*, 3(10), 19018-19040. <https://doi.org/10.56083/RCV3N10-129>
- Sen, T., y Reddy, H. J. (2011). Application of sisal, bamboo, coir and jute natural composites in structural upgradation. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 2(3), 186.
- Shukla, S., Mittal, A., y Kumar, S. (2021). Improvement in soil subgrade using natural fibre (kenaf and coir fibre). In *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019: IGC-2019* (vol. III, pp. 211-218). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6444-8_18
- Shukla, S., Shukla, S., Mittal, A., y Singh, T. (2022). A review on use of coir fibre in road construction. *Materials Today: Proceedings*, 65, 1839-1845. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.017>
- Singh, A., y Sharma, R. (2022). A study of black cotton soil by using sisal fibre and coconut fibre. *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, 10(3), 276-279. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40609>
- Sivakumar Babu, G. L., y Vasudevan, A. K. (2008). Strength and stiffness response of coir fiber-reinforced tropical soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20(9), 571-577. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20:9\(571\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:9(571))
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., y Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>
- Vidal, H. (1969). The principle of reinforced earth. *Highway Research Record*, 282. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1969/282/282-001.pdf>
- Widianti, A., Negara, A. A. B., Elmino, T. S., y Ramadhani, L. (2022). Utilization of coir fibers to improve the bearing capacity and tensile strength of expansive clay. *Geomate Journal*, 23(95), 20-26. <https://doi.org/10.21660/2022.95.16>