

MEJORAMIENTO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN ARENAS
ARCILLOSAS MEDIANTE LA ADICIÓN DE GEOTEXTIL TEJIDO T-2400

DIANA PATRICIA MORENO CÁCERES
ROBINSON JAIR RAMÍREZ FORERO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2012

MEJORAMIENTO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA EN ARENAS
ARCILLOSAS MEDIANTE LA ADICIÓN DE GEOTEXTIL TEJIDO T-2400

DIANA PATRICIA MORENO CÁCERES

ROBINSON JAIR RAMÍREZ FORERO

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

Director

Ing. Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BUCARAMANGA

2012

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 12-09-2012

Dedicado a...

Dios por iluminarme en el camino a este nuevo logro.

A mis padres por el apoyo y motivación constante durante el transcurso del proyecto, tanto en los momentos felices como en los difíciles.

A mis profesores, por sus enseñanzas, conocimientos y experiencias que me compartieron dentro y fuera del aula de clase, que me motivaron a seguir adelante en este proyecto.

A mis compañeros por los momentos compartidos durante esta carrera.

Robinson Jair Ramírez Forero

Dedicado a...

Dios, pues por él ha sido posible este logro.

A mis papás, que siempre me brindaron su apoyo y motivación durante todo este proceso, por difícil o duro que fuera.

A mi hermanita, que es mi modelo a seguir, y siempre estuvo pendiente de la ejecución de este proyecto.

A mi tía Amparo que siempre me apoyó y me dio palabras de ánimo.

A mi familia en general que siempre estuvo pendiente y al tanto.

A mis amigos, compañeros y profesores que siempre estuvieron ahí.

Diana Patricia Moreno Cáceres

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto de grado contó con la colaboración y apoyo de muchas personas, a las que queremos darles un agradecimiento muy especial, que de una u otra manera hicieron que esto fuera posible.

A nuestras familias por su incondicional apoyo y voces de aliento para lograr este objetivo en nuestras vidas.

Al ingeniero GERARDO BAUTISTA GARCIA, director de este proyecto de grado, por darnos la confianza y permitir trabajar junto a él, agradecemos también por su apoyo y motivación durante el desarrollo de este.

Al ingeniero FERNANDO QUIMBAYO CARDONA, representante de la empresa PAVCO, quien con su colaboración nos suministró el geotextil tejido T-2400.

A la ingeniera LUZ MARINA TORRADO, coordinadora de los laboratorios de ingeniería civil, por su apoyo a este trabajo de grado, brindándonos facilidades de uso de los equipos del laboratorio de suelos.

A los señores HELI RUEDA, VICENTE PAEZ y LEONEL OJEDA, laboratoristas de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga quienes con su experiencia, enseñanzas y paciencia, permitieron una mejor ejecución de todos los ensayos realizados durante este trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. Planteamiento del problema.....	16
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo general.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3. Suelo.....	18
3.1 Tipos de suelo.....	18
3.1.1 Arcillas.....	18
3.1.2 Arenas.....	19
3.1.3 Gravas.....	19
3.1.4 Limos.....	19
3.1.5 Suelos turbosos.....	19
3.1.6 Suelos orgánicos.....	19
3.1.7 Suelos cementados.....	20
3.1.8 Suelos salinos (yesos).....	20
3.2 Clasificación de los suelos.....	20
3.2.1 Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS).....	20
3.2.2 Sistema de Clasificación AASHTO.....	27
3.3 Caracterización del material utilizado.....	28
3.3.1 Granulometría.....	28
3.3.2 Límites de consistencia.....	30
3.3.3 Clasificación del suelo estudiado.....	32
3.4 Ensayos de compactación.....	33
3.5 Ensayo para determinar la resistencia al corte del suelo.....	34
3.5.1 Ensayo de corte directo.....	35
4. Geotextiles.....	37
4.1 Geosintéticos.....	37
4.2 Geotextiles.....	37
4.2.1 Clasificación de los geotextiles.....	37

4.2.2	Funciones y campos de aplicación.....	38
4.3	Normas de ensayo y especificación de construcción para el geotextil	41
4.3.1	Método para la determinación de la carga de rotura y la elongación de geotextiles (método GRAB). ASTM D-4632, INV E – 901	41
4.3.2	Método para la determinación del índice de resistencia al punzonamiento de geotextiles, geomembranas y productos relacionados. ASTM D-4833, INV E – 902.	41
4.3.3	Método para la determinación de la resistencia al rasgado trapezoidal de geotextiles. ASTM D-4533, INV E – 903.....	41
4.3.4	Método para la determinación de la resistencia al estallido de geotextiles (método del diafragma hidráulico – <i>mullen burst</i>). ASTM D-3786, INV E – 904.....	41
4.3.5	Método para la determinación de la permeabilidad al agua de los geotextiles por medio de la permitividad. ASTM D-4491, INV E – 905.	41
4.3.6	Método de ensayo estándar para determinar el espesor nominal de geotextiles y geomembranas. ASTM D-5199, INV E – 906.	41
4.3.7	Método estándar para la determinación del tamaño de abertura aparente (taa) de un geotextil. ASTM D-4751, INV E – 907.	41
4.3.8	Método de muestreo de geosintéticos para ensayos. ASTM D-4354 y 4439, INV E – 908.....	41
4.3.9	Práctica para establecer la conformidad de especificaciones de geosintéticos. ASTM D- 4759 Y 4439, INV E – 909.....	41
4.3.10	Método de ensayo para medir el deterioro de geotextiles a la exposición de luz ultravioleta y agua, (aparato del tipo arco xenón). ASTM D-4355, INV E – 910.....	41
4.3.11	Método estándar para determinar la retención de asfalto de geotextiles usados en repavimentaciones asfálticas. ASTM D-6140, INV E – 911. 41	
4.3.12	Método estándar para medir la masa por unidad de área de geotextiles. ASTM D-5261, INV E – 912.....	41
4.3.13	Método de ensayo estandarizado para la determinación de la resistencia a la penetración estática de geotextiles usando un pistón de prueba de 50 mm de diámetro. ASTM D-6241, INV E – 913.	42
4.3.14	Método para la determinación del espesor nominal para productos enrollados para control de erosión (PECE) permanentes. ASTM D-6525, INV E – 914. 42	
4.3.15	Método para la determinación del deterioro de geotextiles por exposición a la luz, la humedad y el calor en un aparato del tipo arco de Xenón. ASTM D-4355, INV E – 916.	42

4.3.16	Método de ensayo estándar para determinar el coeficiente de fricción suelo - geosintético y geosintético - geosintético por el método de corte directo. ASTM D 5321 – 02.	42
4.3.17	Método de prueba estándar para propiedades de tensión de geotextiles por el método de tira ancha. ASTM D-4595.....	42
5.	Metodología	43
5.1	Revisión bibliográfica	43
5.2	Recolección de muestras.....	43
5.3	Caracterización del suelo.....	43
5.4	Ensayos del suelo sin refuerzo	45
5.5	Preparación del geotextil	45
5.6	Ensayos del suelo con refuerzo	46
5.7	Recolección de datos	46
5.8	Análisis de resultados	47
6.	Resultados	48
6.1	Resultados de clasificación.....	48
6.2	Resultados de compactación.....	49
6.3	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras sin refuerzo	50
6.4	Resultados de los ensayos de corte directo realizados para calcular el factor de corrección de la máquina manual	51
6.4.1	Resultados de los ensayos de corte directo de la máquina manual para esfuerzos de 0.25 kg/cm ² , 0.5 kg/cm ² y 1kg/cm ²	51
6.4.2	Resultados de los ensayos de corte directo de la máquina manual para esfuerzos de 0.5 kg/cm ² , 1 kg/cm ² y 2 kg/cm ²	52
6.5	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo reforzadas con fibras de geotextil tejido T-2400	53
6.5.1	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.25%.....	53
6.5.2	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.5%.....	55
6.5.3	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.75%.....	56
6.5.4	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.25%.....	58

6.5.5	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.5%.....	59
6.5.6	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.75%.....	60
6.5.7	Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 3 cm y porcentaje de 0.25%.....	62
7.	Análisis de resultados	64
7.1	Límite de contracción.....	64
7.2	Factor de corrección	64
7.3	Corte directo	65
8.	Conclusiones.....	72
9.	Recomendaciones	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistema de clasificación AASHTO	27
Tabla 2. Resultados ensayos de granulometría.....	48
Tabla 3. Resultados ensayos de límites de plasticidad.....	49
Tabla 4. Resultados ensayo de límite de contracción.....	49
Tabla 5. Resultados ensayos de compactación.....	49
Tabla 6. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo sin refuerzo	50
Tabla 7. Cuadro resumen ensayos de corte directo para factor de corrección. Suelo sin refuerzo.....	52
Tabla 8. Cuadro resumen ensayos de corte directo para factor de corrección. Suelo sin refuerzo.....	52
Tabla 9. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.25% en peso.....	53
Tabla 10. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.5% en peso.....	55
Tabla 11. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.75% en peso.....	56
Tabla 12. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.25% en peso.....	58
Tabla 13. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.5% en peso.....	59
Tabla 14. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.75% en peso.....	61
Tabla 15. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 3cm y proporción de 0.25% en peso.....	62
Tabla 16. Rango de límites de contracción.....	64
Tabla 17. Resultados promedio de los ensayos de corte directo para factor de corrección.	65
Tabla 18. Factores de corrección para el ensayo de corte directo en la máquina manual.....	65
Tabla 19. Resumen de los ángulos de fricción interna	65
Tabla 20. Variación del ángulo de fricción interna	67
Tabla 21. Resumen de la cohesión de los ensayos de corte directo	69
Tabla 22. Variación de la cohesión	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de suelo.....	18
Figura 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano grueso)	21
Figura 3. Carta de plasticidad	25
Figura 4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano fino) ...	25
Figura 5. Granulometría por mallas.....	29
Figura 6. Estados de consistencia	30
Figura 7. Copa de Casagrande. Límite líquido	31
Figura 8. Ensayo límite plástico	31
Figura 9. Ensayo límite de contracción	32
Figura 10. Ventajas de la compactación de un suelo	33
Figura 11. Ensayo de proctor	34
Figura 12. Formas de obtener el ángulo de fricción interna y la cohesión	35
Figura 13. Dispositivo para el ensayo de corte directo	36
Figura 14. Clasificación de los geotextiles	37
Figura 15. Funciones de los geotextiles	39
Figura 16. Recolección de muestras	43
Figura 17. Caracterización del suelo	44
Figura 18. Muestra de suelo sin refuerzo	45
Figura 19. Preparación del geotextil tejido T-2400	45
Figura 20. Muestra de suelo con refuerzo.....	46
Figura 21. Curvas granulométricas	48
Figura 22. Proporción vs. Ángulo de Fricción Interna	66
Figura 23. Longitud vs. Ángulo de fricción interna.....	67
Figura 24. Variación del ángulo de fricción interna vs. Longitud.....	68
Figura 25. Proporción vs. Cohesión	69
Figura 26. Longitud vs. Cohesión	70
Figura 27. Mejoramiento de la cohesión vs. Longitud	71

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Normas de los ensayos realizados (INVIAS)

Anexo B. Registro fotográfico

Anexo C. Ensayos de granulometría

Anexo D. Ensayos de límite líquido y límite plástico

Anexo E. Ensayos de límite de contracción

Anexo F. Ensayos de compactación

Anexo G. Ensayos de corte directo

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: Mejoramiento del ángulo de fricción interna en arenas arcillosas mediante la adición de geotextil tejido T-2400.

AUTOR(ES): Diana Patricia Moreno Cáceres.
Robinson Jair Ramírez Forero.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil.

DIRECTOR: Gerardo Bautista García.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo el objetivo de analizar el comportamiento mecánico de una arena arcillosa al adicionarle fibra de geotextil tejido T-2400, esto debido a que los suelos con alto porcentaje de finos, presentan un comportamiento bajo a la resistencia al corte.

Para llevar a cabo este trabajo, se inició con la consecución del material y su posterior caracterización, para lo cual se realizaron los siguientes ensayos: granulometría por mallas, límite líquido y límite plástico para su clasificación, luego se realizó el ensayo de límite de contracción para ver su cambio volumétrico y por último el ensayo de proctor modificado, para calcular su humedad óptima y densidad seca máxima. Posterior a esto, se siguió con la determinación de los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción y cohesión) por medio del ensayo de corte directo.

Para mejorar el comportamiento de la resistencia al corte, se adicionó fibras de geotextil tejido T-2400 en longitudes de 1cm, 2cm y 3 cm y en proporciones de 0.25%, 0.5% y 0.75% en peso de la muestra. Se trabajó sobre muestras alteradas, mezcladas con las fibras de geotextil respectivas, con la humedad óptima y compactada por medio del equipo de proctor modificado. Posterior a esto se realizaron los ensayos de corte directo para calcular el ángulo de fricción y la cohesión después de la adición de las fibras.

Se compararon los parámetros de resistencia al corte entre el suelo natural y el suelo reforzado, para determinar la longitud y proporción óptima, que fue la que logró el mayor mejoramiento del ángulo de fricción interna del suelo estudiado. Para el presente trabajo, dicha longitud y proporción óptima fue la de 2 cm y 0.5%.

PALABRAS CLAVES: Corte directo, arena arcillosa, geotextil, ángulo de fricción, cohesión.

GENERAL SUMMARY OF WORK GRADE

TITLE: Improvement of internal friction angle over clayey sand through the application of woven geotextile T-2400.

AUTHOR (S): Diana Patricia Moreno Cáceres.
Robinson Jair Ramirez Forero.

FACULTY: Civil Engineering.

DIRECTOR: Gerardo Bautista Garcia.

ABSTRACT

The main goal of this graduation research project was to analyze the mechanical behavior of clayey sand under the effects of woven geotextile fiber T-2400. Essentially because soil with a high percentage of fines grained materials shows low shear strength.

In order to start developing this project was necessary to extract some of the material for its later categorization. The following experiments were made: particle size distribution test, liquid limit and plastic limit tests for its classification; then, a shrinkage limit test to check the volumetric change; and finally, a Modified Proctor test for calculating its optimum moisture and maximum dry density. Subsequently, a direct shear test was done so as to determine shear strength parameters (friction angle and cohesion).

With the purpose of upgrading the performance concerning shear strength, Geotextile fibers T-2400 were added in sizes of 1cm, 2cm and 3cm with proportions of 0.25%, 0.5% y 0.75% in the sample. The procedure was done over modified samples mixed up with specific geotextile fibers, with the optimum moisture and compressed with modified Proctor equipment. Later in the process, direct shear tests were conducted in order to calculate the friction angle and the cohesion after adding the fibers.

Finally, factors of shear strength between the natural soil and the upgraded soil were compared in an attempt to determine if real improvements had been achieved. In fact, optimal proportion and size were the two conditions in which the soil's internal friction angle acquired the largest advance. The consequent optimal size and proportions were 2cm and 0.5% respectively.

KEY WORDS: Direct shear, clayey sand, geotextile, friction angle and cohesion.

INTRODUCCIÓN

La propuesta de este trabajo es la de mejorar las propiedades de resistencia al corte de una arena arcillosa mediante la adición de fibras de geotextil tejido T-2400, es decir, encontrar la longitud y porcentaje óptimo para que dicho suelo alcance su mayor resistencia al corte.

Esto debido a que los suelos con alto porcentaje de finos presentan un ángulo de fricción bajo y por consiguiente, una baja capacidad de soporte y factores de seguridad bajos. Con ésta adición, se busca incrementar el ángulo de fricción interna de dicho suelo y de esta manera aumentar la capacidad portante, la resistencia al corte y su estabilidad. Además se busca una mejora a largo plazo de dichas propiedades.

Para hallar el valor del ángulo de fricción interna y la cohesión (parámetros importantes en la resistencia al corte de un suelo), se hicieron ensayos de corte directo en la máquina digital y manual de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

Este trabajo de grado complementa otra serie de estudios hechos en la universidad con respecto al mejoramiento de suelos con baja resistencia al corte, cuyos materiales han sido fibra de guadua, fibra de vidrio y fibra de geotextil tejido de diferentes resistencias.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La topografía colombiana se caracteriza por ser bastante quebrada, lo que conlleva a grandes problemas de estabilización de suelos cuando se realizan obras de ingeniería o de construcción, y en el caso de obras en pendientes fuertes el problema es generado por los deslizamientos de los taludes, es por ello que el presente trabajo de grado estudió el comportamiento de una arena arcillosa, al agregarle geotextil en ciertas cantidades y magnitudes.

Los suelos con gran cantidad de finos se caracterizan por tener un ángulo de fricción interna bajo y una alta cohesión. Según investigaciones hechas con anterioridad a este planteamiento (Análisis del comportamiento de los suelos finos en el aparato de corte directo después de la adición de fibras naturales¹, Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibra de vidrio², Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibras artificiales³, Estudio del comportamiento de los suelos arcillosos después de la adición de fibra de geotextil tejido T-1700⁴ y Estudio del comportamiento de suelos arcillosos después de la adición de geotextil tejido T-2400⁵), al agregarle fibras de geotextil al suelo, éste mejora sus propiedades mecánicas en especial su ángulo de fricción, que va directamente relacionado con su capacidad portante, resistencia al corte y estabilidad.

En este proyecto se trabajó con un tipo de geotextil, T-2400, con el cual se calculó la cantidad y longitud óptima que se le debe adicionar a la arena arcillosa para mejorar su resistencia al corte. Para determinar este porcentaje óptimo de fibra, se llevaron a cabo ensayos de corte directo, para así, analizar su ángulo de fricción, variable importante en la determinación de la resistencia de un suelo. Vale aclarar que durante todo este proceso no se pretendió aumentar la cohesión del suelo, nuestro enfoque es netamente, al aumento del ángulo de fricción interna de éste.

¹ CERRO BECERRA, Sergio Andrés y OVIEDO DIAZ, Yesica Alayx. Análisis del comportamiento de los suelos finos en el aparato de corte directo después de la adición de fibras naturales. Bucaramanga, 2004, p. 60. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.

² ACOSTA REYES, Mónica Cecilia. BELLESTEROS FUENTES, José Julián. Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibra de vidrio. Bucaramanga, 2005, p. 47. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil.

³ SANTOS REY, Johanna Paola. TORRES SERRANO, Tania Cardina. Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibras artificiales. Bucaramanga, 2005, p. 44. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil.

⁴ BARAJAS LOZANO, Herik Yenson. VANEGAS BARRERA, Germán Alexander. Estudio del comportamiento de los suelos arcillosos después de la adición de fibra de geotextil tejido T-1700. Bucaramanga, 2008, p. 66. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.

⁵ TRIANA RODRIGUEZ, Carlos Alfonso. VILLAMIZAR DUARTE, Diego Armando. Estudio del comportamiento de suelos arcillosos después de la adición de geotextil tejido T-2400. Bucaramanga, 2010, p. 58. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas de una arena arcillosa después de la adición de fibras de geotextil T-2400.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

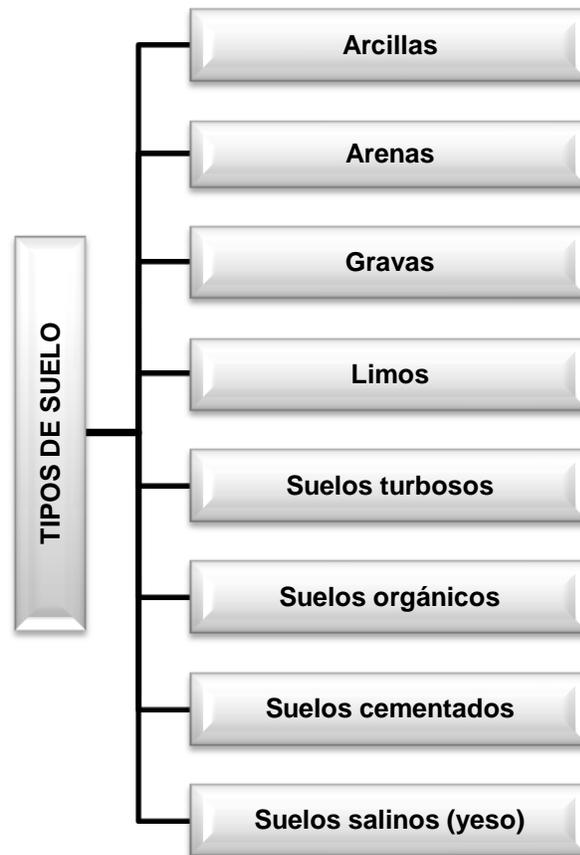
- Seleccionar la fuente de material de la cual se va a tomar el suelo a ensayar cuyas propiedades físicas desean modificarse mediante la adición de fibras.
- Realizar ensayos de clasificación con el fin de determinar el tipo de arena.
- Encontrar la densidad específica máxima y la humedad óptima de la arena arcillosa mediante el ensayo de Proctor modificado.
- Determinar el ángulo de fricción interna y cohesión de la arena (sin refuerzo) mediante el ensayo de corte directo.
- Realizar ensayos de corte directo para obtener el ángulo de fricción y la cohesión del suelo reforzado, para longitudes de fibra de geotextil T-2400 de 1cm, 2cm y 3cm y porcentajes en peso de la misma de 0.25%, 0.50% y 0.75%.
- Identificar la longitud y el porcentaje óptimo de la fibra de geotextil T-2400 para el mejoramiento del ángulo de fricción interna.
- Analizar la incidencia de la fibra en el cálculo de la capacidad portante de un suelo con gran cantidad de finos.

3. SUELO

3.1 TIPOS DE SUELO⁶

Existe gran variedad de suelos presentes sobre la corteza terrestre, estos son los clasificados empíricamente por el ingeniero constructor:

Figura 1. Tipos de suelo



Fuente. Autor

3.1.1 Arcillas

En realidad contienen solo una parte de arcilla, provienen de sedimentación en los cauces de los ríos o erosiones generadas por los cambios geológicos. Son

⁶ JIMENEZ S., José A. Tipos de suelos. En: Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería. Madrid. Editorial Dossat. 1954. p. 126-138.

sensibles a la humedad. Si el estado de tensiones de las arcillas es de tipo de compresión sus fallas permanecen cerradas y durante largo tiempo conserva sus propiedades mecánicas, mientras si su estado de tensiones es de tipo tracción, estas fallas se abren y posibilitan la entrada de agua, lo que genera cambios negativos en sus propiedades resistentes, pues las debilita.

3.1.2 Arenas

Es un suelo ideal para los ingenieros civiles, por su elevado rozamiento interno y baja compresibilidad. Se deben proteger de la erosión interna y externa. Algunas arenas presentan asientos progresivos y constantes, que para el caso de obras urbanas no son muy recomendadas. Las excavaciones de este tipo de suelo por debajo del nivel freático son peligrosas pues se convierten en inestables.

3.1.3 Gravas

Su único problema mecánico es lo derivado con la permeabilidad. La naturaleza mineralógica y la intensa erosión mecánica sufrida por el arrastre fija la forma de los elementos, angulosos o redondeados, cúbicos o en lascas. En general provienen del arrastre por las aguas o glaciares.

3.1.4 Limos

Proviene de depósitos fluviales (cauces o desembocadura de ríos), tienen apariencia similar a la de una arcilla. Su cohesión es pequeña, son permeables y el agua penetra rápidamente por estas.

3.1.5 Suelos turbosos

Están compuestos exclusivamente por materia orgánica poco transformada, en la cual es fácilmente visible restos de plantas. Sus propiedades mecánicas son muy malas, su capacidad de sostener cargas es reducida, son muy compresibles y varían altamente su volumen. Normalmente es de color oscuro o negro.

3.1.6 Suelos orgánicos

Están formados por materia orgánica, aunque en menor proporción que los suelos turbosos, la cual está transformada por diferentes organismos vivos y efectos del clima. Su contenido de humus los hace tener una compresibilidad alta. También se caracterizan por ser de color oscuro.

3.1.7 Suelos cementados

Los suelos más importantes de este grupo son las margas, que son suelos arcillosos con carbonato cálcico, dependiendo de la cantidad de este componente varían sus propiedades. Son suelos que están unidos generalmente por una sustancia resistente como la caliza. Son muy permeables y se encharcan con facilidad.

3.1.8 Suelos salinos (yesos)

Contienen una elevada proporción de sales, son muy plásticos y pesados por las arcillas sódicas. Son impermeables y muy compresibles. Suelen ser problemáticos para la ingeniería civil por su acción agresiva sobre el concreto. Son formados por sedimentación en aguas salinas o por suelos salinizados por infiltración de estas aguas.

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Debido a la necesidad de dar un nombre y caracterizar los diferentes tipos de suelos que existen, surgen varios métodos para denominarlos los cuales se basan en las propiedades físicas de estos. Entre los más destacados se encuentran el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (S.U.C.S), y el método AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*).

3.2.1 Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS)⁷

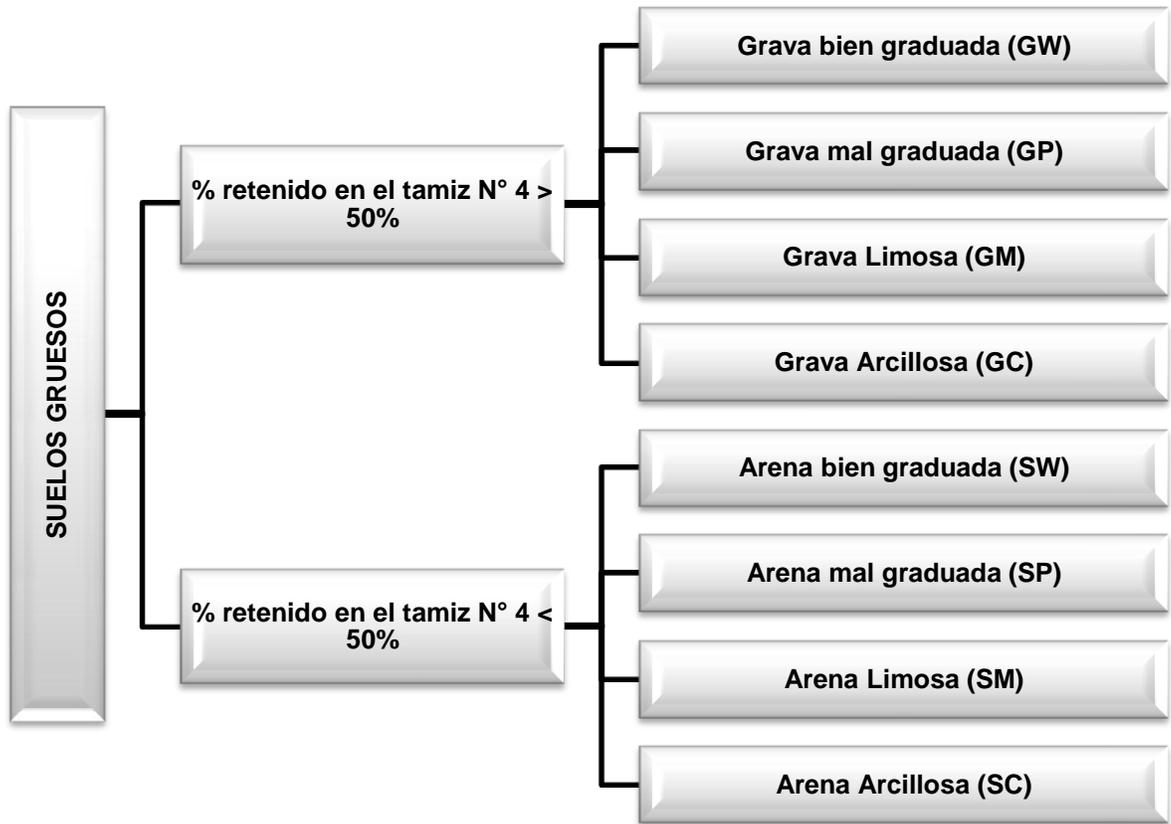
Método propuesto por Arturo Casagrande, cuyo objetivo es clasificar los suelos en dos grandes grupos, suelos gruesos y suelos finos, los cuales se distinguen por el tamizado a través de la malla N° 200. Se considera que un suelo es grueso, si más del 50% (en peso) de una muestra representativa es retenida por dicha malla, y se considera que un suelo es fino, si más del 50% (en peso) de una muestra representativa pasa por ésta.

3.2.1.1 Suelos gruesos

Los suelos gruesos se dividen en dos grandes grupos, en gravas y arenas, y estos a su vez se subdividen en otros tantos. La denominación de estos consta por dos letras mayúsculas, que hacen referencia a las iniciales del tipo de suelo, ya sea grava [G] o arena [S], bien gradada [W] o mal gradada [P].

⁷ JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Clasificación e identificación de suelos. *En*: Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa Noriega Editores, tomo 1. 2000. p. 152-158.

Figura 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano grueso).



Fuente. Autor

- *Gravel* (Gravas) → [G]: Un suelo es considerado grava cuando más del 50% (en peso), de la fracción gruesa, es retenida por el tamiz N° 4.
- *Sand* (Arenas) → [S]: Un suelo se considera arena cuando más del 50% (en peso) de la fracción gruesa pasa por el tamiz N° 4.

Los suelos mencionados a continuación contienen un porcentaje de finos bajo o nulo (<5%), lo que establece que no afectan ni alteran la resistencia de la fracción gruesa ni su capacidad de drenaje.

Otro aspecto a tener en cuenta en los suelos siguientes es su gradación. Los parámetros que dictan si una grava o una arena están bien o mal gradadas son el coeficiente de uniformidad C_u y el coeficiente de curvatura C_c , cuya determinación se muestran a continuación:

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

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Donde:

- D60 = Tamaño en mm tal que el 60% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- D30 = Tamaño en mm tal que el 30% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- D10 = Tamaño en mm tal que el 10% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- GW

Son gravas limpias que cumplen con los parámetros de gradación, con un Cu mayor a 4, y un Cc entre 1 y 3. Presentan gran diversidad en dimensiones y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.

- SW

Son arenas limpias que cumplen con los parámetros de gradación, con un Cu mayor a 6, y un Cc entre 1 y 3. Presentan una amplia gama de dimensiones y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.

- GP

Gravas limpias con una apariencia uniforme, donde predomina un solo tamaño teniendo ausencia de los intermedios. Estas gravas no cumplen con los parámetros de gradación, de Cu mayor a 4, y Cc entre 1 y 3.

- SP

Arenas limpias con aspecto uniforme, donde hay un tamaño predominante, y se nota la ausencia de los intermedios. Estas arenas no cumplen con los parámetros de gradación, de Cu mayor a 6, y Cc entre 1 y 3.

Los suelos que se mencionarán a continuación presentan un alto porcentaje de finos (>12%), queriendo decir que los finos si afectan la resistencia de la fracción gruesa y su capacidad de drenaje.

Se debe tener en cuenta para su clasificación la plasticidad, la cual está dada por el límite líquido y el índice de plasticidad.

- GM

Gravas con finos, cuya plasticidad varía entre nula a media, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por debajo de la línea A, o por encima donde el índice de plasticidad es menor a 4.

- SM

Arenas con finos, cuya plasticidad varía entre nula a media, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por debajo de la línea A, o por encima donde el índice de plasticidad es menor a 4.

- GC

Gravas con finos, cuya plasticidad varía entre media a alta, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por encima de la línea A y el índice de plasticidad es mayor a 7.

- SC

Arenas con finos, cuya plasticidad varía entre media a alta, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por encima de la línea A y el índice de plasticidad es mayor a 7.

Los suelos cuyo contenido de finos se encuentra entre 5% y 12%, el S.U.C.S. los considera casos frontera, asignándoles un símbolo doble. O en caso de que el material no cae claramente dentro de un grupo mencionado anteriormente, se asigna doble nomenclatura.

- Gravas limosas bien gradadas [GW – GM]

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Y son ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- Gravas limosas mal gradadas [GP – GM]

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- Gravas arcillosas bien gradadas [GW – GC]

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- Grava arcillosa mal gradada [GP – GC]

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- Arenas limosas bien gradadas [SW – SM]

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se ubican en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- Arenas limosas mal gradadas [SP – SM]

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- Arenas arcillosas bien gradadas [SW – SC]

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- Arena arcillosa mal gradada [SP – SC]

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

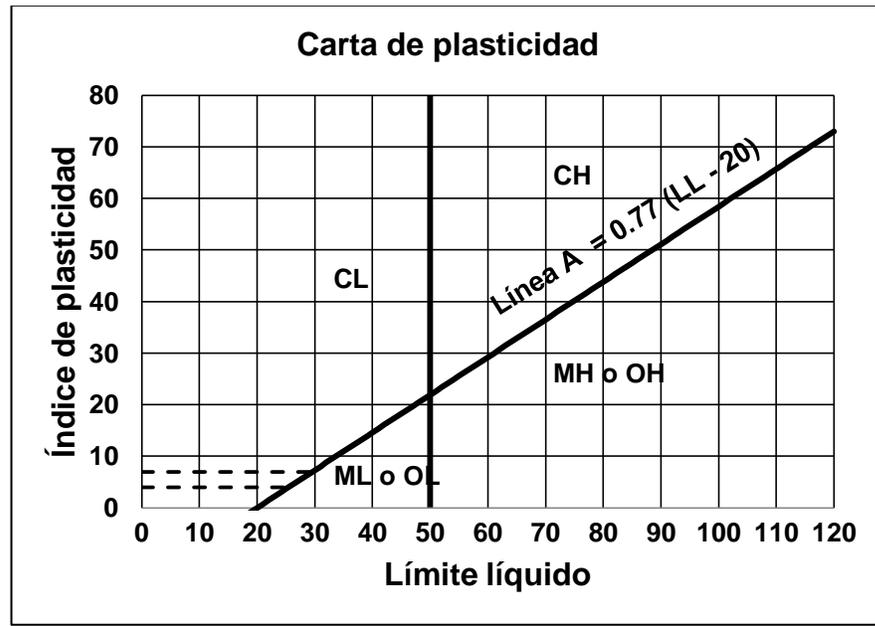
3.2.1.2 Suelos finos

La denominación de estos grupos consta por dos letras mayúsculas, que hacen referencia a las iniciales del tipo de suelo, y a las zonas divididas en la carta de plasticidad, de acuerdo a su plasticidad y compresibilidad.

La carta de plasticidad sirve para agrupar a los suelos que comparten de manera general las propiedades del grupo al que pertenecen, de ésta depende ciertas propiedades de interés, como la resistencia, relaciones de esfuerzo, deformación, compresibilidad, permeabilidad, velocidad de variación volumétrica, entre otras. Respecto a la compresibilidad se puede afirmar que está relacionada de manera directa con el límite líquido, si éste es inferior al 50%, se dice que la compresibilidad es baja [L], de lo contrario se dice que es de compresibilidad alta [H].

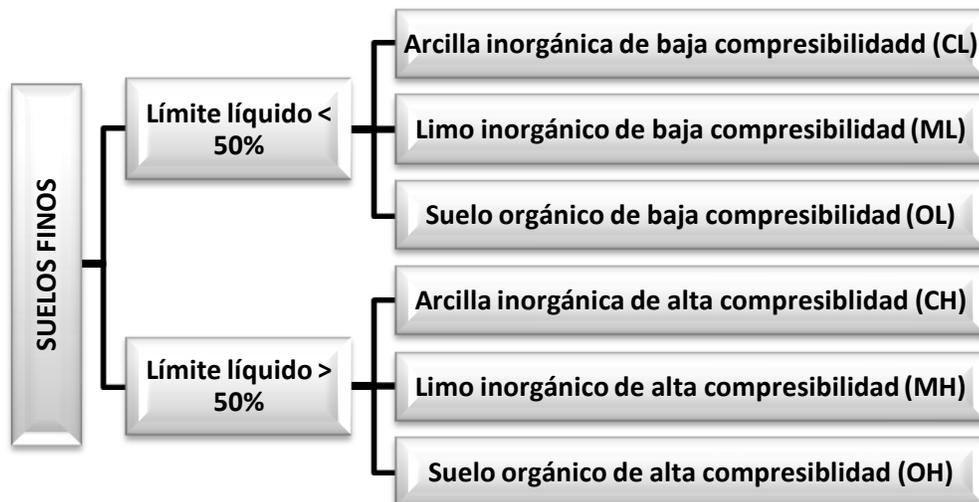
En ésta carta, los suelos cuya plasticidad es alta y se ubiquen por encima de de la línea A, se llaman arcillas inorgánicas [C], y los que se encuentran por debajo de la línea, son los conocidos limos inorgánicos [M], y los suelos orgánicos [O].

Figura 3. Carta de plasticidad.



Fuente. Principios de ingeniería de cimentaciones⁸.

Figura 4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano fino).



Fuente. Autor.

⁸ BRAJA M., Das. Propiedades geotécnicas del suelo. En: Principios de Ingeniería de Cimentaciones. México. Editorial Thomson. 5 ed. 2006. p.15.

- CL

Arcillas inorgánicas de baja plasticidad a media plasticidad, es decir con un límite líquido inferior a 50%, y ubicado por encima de la línea A, con un índice de plasticidad superior a 7.

- CH

Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, es decir con un límite líquido superior a 50%, ubicado por encima de la línea A.

- ML

Limos inorgánicos, ligeramente plásticos, es decir con un límite líquido inferior a 50%, y ubicado por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- MH

Limos inorgánicos de alta plasticidad, es decir con un límite líquido superior a 50%, ubicado por debajo de la línea A.

- OL

Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad. Tienen alto contenido de materia orgánica, su ubicación en la carta de plasticidad es similar a la ML, con una proximidad mayor a la línea A.

- OH

Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad. Tienen alto contenido de materia orgánica, su ubicación en la carta de plasticidad es similar a la MH, con una proximidad mayor a la línea A.

- CL – ML

Suelos conocidos, como casos frontera, debido a que se encuentran ubicados en la carta de plasticidad sobre la línea A, con un índice de plasticidad entre 4 y 7, reciben doble nomenclatura.

- Pt

Suelos con alto contenido de materia orgánica y altamente compresibles. Su límite líquido se encuentra entre 300% y 500%, y su índice de plasticidad entre 100% y 200%, ubicados en la carta de plasticidad por debajo de la línea A.

3.2.2 Sistema de Clasificación AASHTO⁹

Es una metodología de la *American Association of State Highway Officials* (AASHTO) y actualmente es el sistema de clasificación de suelos más usado para vías. Este sistema clasifica los suelos a partir de los resultados dados por los ensayos de granulometría y los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico). Se divide en dos grandes grupos: suelos granulares y suelos limo-arcillosos, los cuales se subdividen en 7 grupos. La siguiente tabla resume este sistema de clasificación.

Tabla 1. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos del total para el tamiz No 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Porcentaje de material que pasa el tamiz No 10 No 40 No 200	50 máx 30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 máx 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	A-7-6 36 mín
Características de la fracción que pasa el tamiz No 40 Límite Líquido, w_L Índice Plástico, I_p				40 máx	41 mín	40 máx	40 mín	40 máx	41 mín	40 máx	40 mín
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx		8 máx	12 máx	16 máx	20 máx

Fuente. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil¹⁰.

Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan por el tamiz N° 200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas que pasan por el tamiz N° 200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y materiales de tipo arcilla.

El índice de grupo se calcula con la siguiente ecuación:

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Donde:

⁹ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.69-72.

¹⁰ BOWLES, Joseph E. Op. Cit., p.70.

- a = Porcentaje de material que pasa por la malla No 200 mayor que 35% pero menor que 75%, dado como un número entero positivo ($1 \leq a \leq 40$).
- b = Porcentaje de material que pasa por la malla No 200 mayor que 15% pero menor que 55%, dado como un número entero positivo ($1 \leq b \leq 40$).
- c = Parte del límite líquido mayor que 40 pero menor que 60, dada como un número entero positivo ($1 \leq c \leq 20$).
- d = Parte del índice de plasticidad mayor que 10 pero menor que 30, dada como un número entero positivo ($1 \leq d \leq 20$).

3.3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO

Debido al objetivo principal planteado en este trabajo de grado, el cual buscaba apreciar la incidencia de geotextil en diferentes tamaños y proporciones en el ángulo de fricción interna de un suelo, se optó por trabajar con una arena arcillosa [SC] de color anaranjado con matices grises, proveniente de las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga, del edificio K.

Los suelos con alto porcentaje de finos se caracterizan por el constante mejoramiento que requieren, pues no son los mejores suelos para la construcción de obras ingenieriles, algunas propiedades que conllevan a esto, es que los suelos con alta cantidad de finos tienen la capacidad de expandirse o de comprimirse, según su grado de saturación, lo cual ocasiona que fallen; son poco estables, a lo que se recurre a su mejora ya sea con productos químicos como la cal, las cenizas, entre otros, o a remover el suelo en su totalidad y reemplazarlo por otro, lo cual es considerado costoso. Además se caracteriza por su alta absorción de agua, su baja permeabilidad, baja capacidad portante y estabilidad.

Para la definición del material de trabajo, se tuvieron en cuenta los respectivos ensayos de clasificación que se nombrarán a continuación.

3.3.1 Granulometría¹¹

La granulometría comprende todos los métodos tendientes a separar una muestra de suelo en fracciones según los tamaños de sus partículas. Está la granulometría por mallas (la empleada en este trabajo de grado) y la prueba del hidrómetro (para suelos finos).

¹¹ BRAJA M., Das. Op. Cit., p.2-5.

3.3.1.1 Granulometría por mallas

Se hace pasar una muestra de suelo por una serie de tamices dispuestos en orden decreciente según el tamaño de su abertura, con estos tamices se puede llegar a separar hasta tamaños correspondientes al tamiz N° 200 (0.074 mm), el paso del material fino por medio de este tamiz se ayuda con agua (un lavado).

Se registra el peso inicial de la muestra seca, luego esta se lava con ayuda del tamiz N° 200, se deja secar una vez más y es pesado nuevamente, la diferencia de estos pesos es entendido como el material que pasa por el tamiz N° 200, el material restante es el que atraviesa el juego de tamices para determinar así, la cantidad retenida por cada uno y hacer una representación gráfica de la distribución granulométrica. Cuando esta curva granulométrica es tendida, corresponde a un suelo con gran variedad de tamaños de partículas (bien gradado), cuando la curva granulométrica tiene una tendencia vertical, con una pendiente alta, corresponde a suelos donde predomina un solo tamaño (mal gradado).

Figura 5. Granulometría por mallas.



Lavado del material por el pasa 200



Serie de tamices



Porcentaje retenido por cada tamiz

Fuente. Autor

3.3.1.2 Prueba del hidrómetro

La prueba se basa en la ley de *Stokes*, donde se relaciona la velocidad de precipitación o cimentación de una partícula en un fluido con el tamaño de la misma. Con este ensayo se obtiene el diámetro equivalente de una partícula que se sedimenta en un fluido con la misma velocidad del suelo. En partículas equidimensionales el diámetro equivalente puede llegar a ser la mitad del real. En partículas laminares el diámetro equivalente puede llegar a ser la cuarta parte del real. La Ley de *Stokes* sólo es válida para tamaños de partículas entre 0,2 micras y 0.2 mm.

3.3.2 Límites de consistencia¹²

La plasticidad es una propiedad circunstancial que depende del contenido de agua (humedad), un suelo susceptible de ser plástico, de acuerdo con su humedad, podría encontrarse en cualquier de los siguientes estados de consistencia.

Figura 6. Estados de consistencia.

Estado líquido	•El suelo tiene la apariencia y propiedades de una suspensión.
Estado semilíquido	•El suelo tiene apariencia y propiedades de un fluido viscoso.
Estado plástico	•El suelo se comporta plásticamente.
Estado semisólido-semirígido	•El suelo tiene la apariencia de un cuerpo rígido, pero aún disminuye su volumen con el secado.
Estado sólido	•El suelo ya no disminuye su volumen con el secado.

Fuente. Autor.

Atterberg, estableció las fronteras entre los diferentes estados y los llamó límites de consistencia:

3.3.2.1 Límite líquido

Es la frontera convencional entre el estado semilíquido y estado plástico [LL].

Este ensayo se lleva a cabo en la copa de Casagrande. Se vierte aproximadamente 1cm de suelo mezclado con agua en la copa, se hace una ranura en la mitad con el ranurador trapezoidal, se acciona la copa a razón de 2 golpes por segundo y se cuenta el número de golpes necesarios para que la ranura se cierre, aproximadamente 1cm.

El límite líquido corresponde a la humedad para la cual la ranura se cierra a los 25 golpes. El ensayo se realiza con 4 puntos, 2 de los cuales corresponden a un cierre con más de 25 golpes y los otros dos con menos de 25 golpes, estos golpes deben estar entre 6 y 40, si es menor a 6 no se podrá determinar el preciso

¹² JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Op. Cit., p. 127-143.

momento de cierre y si es mayor a 40, la prueba durará tanto que habrá perdido humedad por evaporación.

Figura 7. Copa de Casagrande. Límite líquido.



Límite líquido

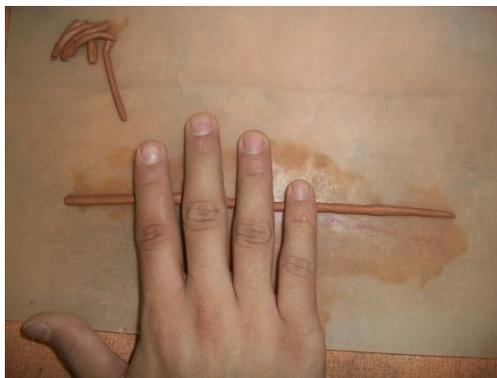
Fuente. Autor

3.3.2.2 Límite plástico

Es la frontera convencional entre el estado plástico y el estado semi-sólido [LP].

Se determina mezclando suelo con agua hasta que este adquiera una consistencia suave y manejable, se crean rollos con un grosor aproximado de 3mm, sobre una superficie corrugada de un vidrio o sobre papel periódico. Si estos rollos no se fracturan, agrietan o desmoronan, se deben deshacer y hacer de nuevo, repitiendo este procedimiento hasta que ellos se rompan, es allí donde se toma la humedad, la cual corresponde al límite plástico.

Figura 8. Ensayo límite plástico.



Límite plástico

Fuente. Autor

3.3.2.3 Límite de contracción

Corresponde a la frontera convencional entre el estado semisólido y el estado sólido [LC]. Corresponde a la humedad por debajo de la cual el suelo ya no disminuye su volumen con el secado.

El método empleado para determinar el límite de contracción en este trabajo de grado es el método de Terzagui, el otro es el *Public Rocal Administration*. Según Terzagui el límite de contracción, aprovechando que por debajo de él los suelos ya no disminuyen su volumen, corresponde a la humedad de una muestra de suelo seca, cuyos vacíos se llenan completamente de agua.

Figura 9. Ensayo límite de contracción.



Fuente. Autor

3.3.3 Clasificación del suelo estudiado

Basados en los numerales anteriores el suelo trabajado corresponde a una arena arcillosa [SC]. Este suelo tiene un porcentaje de finos de 46.91%, de gravas 3.17% y de arenas 49.92%.

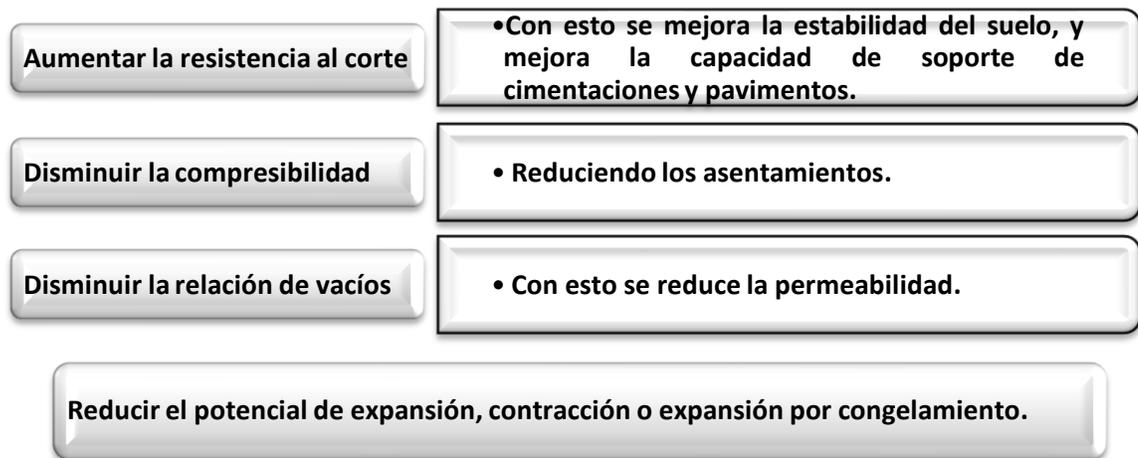
Según la literatura, se tiene que este tipo de suelo cuando se encuentra en estado compactado tiene un comportamiento de impermeabilidad, cuya resistencia al corte en condiciones de densidad y humedad óptima son de buena a regular, su compresibilidad es baja, y su tratamiento en obra es de fácil manejo¹³.

¹³ UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO. "Clasificación de suelos". [En línea]. <http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf> Consultado [21/07/12].

3.4 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN¹⁴

Cuando nos referimos a la compactación de un suelo, hablamos de densificarlo, esto se logra mediante la disminución de la cantidad de vacíos que se encuentra en la muestra, manteniendo constante el contenido de agua. El fin último de la compactación es mejorar las propiedades del suelo, para hacerlo óptimo. Algunas de las características son las siguientes:

Figura 10. Ventajas de la compactación de un suelo.



Fuente. Autor.

La compactación en un laboratorio, consiste en compactar una muestra de suelo, con la humedad determinada en un molde cilíndrico, cuyo volumen es conocido, y con una energía establecida.

R.R. Proctor dio las bases necesarias para los ensayos de compactación usados en la actualidad. El procedimiento como tal libera una energía nominal de compactación de 593,7 Kj/m³.

El ensayo de compactación, se repite el número de veces necesarios para poder elaborar una curva de contenido de humedad contra densidad seca, en la cual el pico más alto hace referencia al contenido de humedad óptimo (CHO), a la cual el suelo llega a la densidad seca máxima.

Se ha establecido que este método de compactación es eficaz, cuando el suelo es bien gradado y contiene cierta cantidad de finos.

A medida que fue avanzando la necesidad de crear una mayor densidad en el suelo, el ensayo de compactación tradicional fue quedando atrás, es por esto que

¹⁴ JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Op. Cit., p. 575-581.

se hizo un nuevo ensayo llamado Compactación Modificado o Proctor Modificado, el cual tiene estas características:

- Molde = 944 cm³
- Martillo = 44.5 N
- Capas = 5 a 55 golpes por capa
- Caída del martillo = 0.46m

Presenta casi el mismo procedimiento del ensayo patrón, pero con la diferencia de que la energía nominal de compactación al suelo es de 2710 kJ/m³. Con este ensayo, se logra que la densidad del suelo aumente entre 5% y 10% y el valor de CHO disminuya. La gráfica, se presenta como densidad seca vs. Contenido de Humedad.

Para calcular el grado de compactación de un suelo, hay que determinar la densidad seca de él, teniendo en cuenta los parámetros de energía utilizada durante la compactación y del contenido de humedad durante la misma. Estas relaciones se obtienen a partir de ensayos en el laboratorio.

Figura 11. Ensayo de proctor.



Fuente. Autor

3.5 ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL CORTE DEL SUELO¹⁵

La resistencia al corte del suelo, es el valor máximo, que se pueda provocar dentro de su masa antes de que ceda.

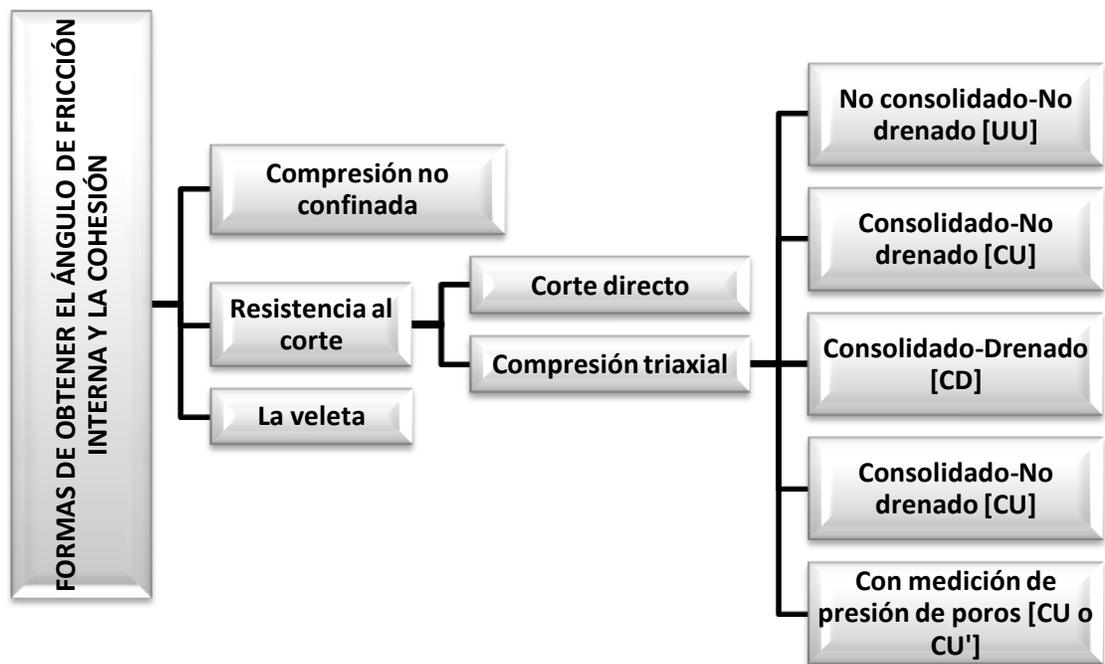
El ángulo de fricción interna es junto a la cohesión, un parámetro de la resistencia al corte de los suelos. Es el ángulo formado por la envolvente de falla (línea

¹⁵ JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Op. Cit., p. 45-52.

tangente a los círculos de falla) y la horizontal (esfuerzos normales), obtenido de uno de los ensayos de resistencia al corte. Y la cohesión es la fuerza de atracción o adherencia entre las partículas o granos del suelo, debida a las fuerzas moleculares y las membranas de agua.

Las formas tradicionales de obtener los parámetros nombrados anteriormente pueden ser el ensayo de corte directo (método implementado en esta investigación), y el ensayo de compresión triaxial.

Figura 12. Formas de obtener el ángulo de fricción interna y la cohesión.



Fuente. Autor.

3.5.1 Ensayo de corte directo

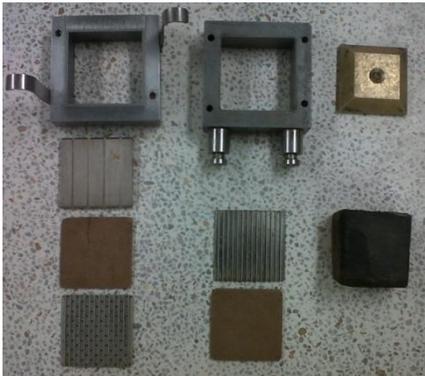
Recibe este nombre, puesto que mide directamente los esfuerzos normal y de corte en el plano de falla.

Inicialmente se prepara la muestra de suelo, según las especificaciones, para que pueda ser introducida en la caja de corte, la cual por lo general tiene unas dimensiones de 6 x 6cm.

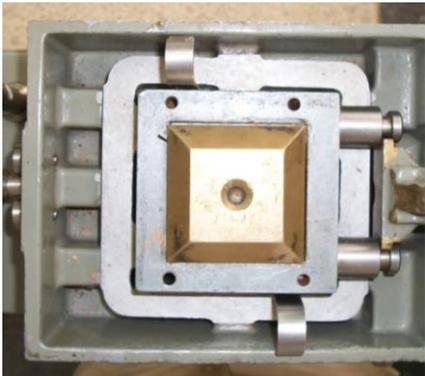
La caja consta de dos partes, las cuales deben hacerse encajar con ayuda de dos tornillos de seguridad, que a la hora de ejecutar el ensayo deberán ser removidos, luego de esto, se dispone de una piedra porosa, luego una placa metálica acanalada, enseguida de estas se acomoda la muestra de suelo, con ayuda de un

corcho, después se coloca otra placa metálica acanalada y otra piedra porosa, finalmente una almohadilla de presión sobre la cual se va a ejercer la carga. Esta caja es dispuesta en una caja mayor, donde se llevará a cabo el ensayo como tal.

Figura 13. Dispositivo para el ensayo del corte directo.



Partes de la caja de corte directo



Caja de corte directo en la máquina manual



Máquina de corte directo manual

Fuente. Autor

4. GEOTEXTILES

4.1 GEOSINTÉTICOS¹⁶

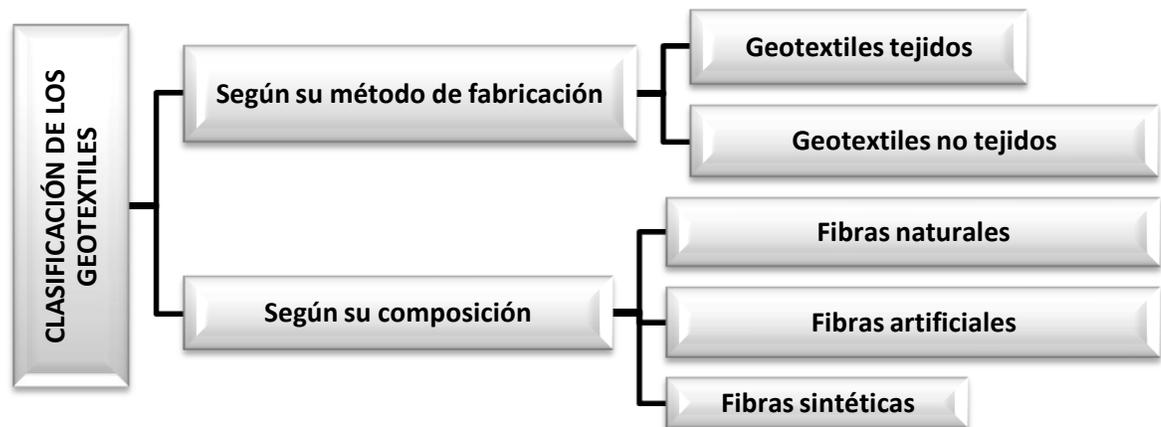
Son materiales generados a través de la conversión industrial de sustancias químicas conocidas como polímeros, que desde su forma natural (polvo o gránulos), son transformados en láminas, fibras, perfiles, películas, tejidos o mallas. Su aplicación está relacionada con la acción de la construcción tradicional como lo son, suelos, vías, concreto, pavimentos, etc. Estos materiales son usados como mejoras al funcionamiento de los sistemas constructivos o en algunos casos, sustituyen a materiales existentes o tradicionales.

4.2 GEOTEXTILES¹⁷

Son materiales textiles planos, permeables y hechos a base de polímeros (sintético o natural), que pueden ser no tejidos o tejidos. Se usan en contacto con el suelo u otros materiales en ingeniería civil, especialmente en obras geotécnicas.

4.2.1 Clasificación de los geotextiles

Figura 14. Clasificación de los geotextiles.



Fuente. Autor

¹⁶ GRUPO SITSA. "Materiales Geosintéticos" [En línea] <<http://www.tuberias.mx/geosinteticos.html>> Consultado [11/07/12].

¹⁷ DEPARTAMENTO DE INGENIERIA. Manual de diseño de geotextiles. PAVCO, sexta edición. Colombia. Septiembre de 2003. Pág. 1-9.

4.2.1.1 Clasificación según su método de fabricación

- **Geotextiles Tejidos:** Están formados por hilos entrelazados en una máquina de tejer. Pueden ser tejidos de calada o tricotados. Los tejidos de calada son generados por hilos de urdimbre (sentido longitudinal) y por hilos de trama (sentido transversal). La resistencia a la tracción es de tipo biaxial (dos sentidos de elaboración). Su estructura es plana. Los tejidos de tricotados están elaborados con hilo entrelazado en máquinas de tejido de punto. La resistencia a la tracción puede ser biaxial o multiaxial dependiendo de cuál máquina sea usada para su fabricación (tricotadas o circulares).
- **Geotextiles No Tejidos:** Están conformados por hilos o fibras superpuestas de manera laminar. Pueden ser ligados mecánicamente (agujados), térmicamente (termosoldados) y químicamente (resinados).

4.2.1.2 Clasificación según su composición

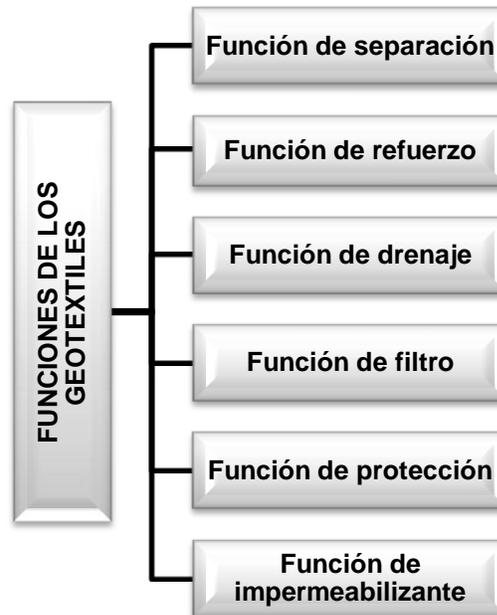
Las fibras más usadas para la elaboración del geotextil son las sintéticas, sin embargo existen otros tipos de fibra para su generación.

- **Fibras Naturales:** Son de origen vegetal o animal, y se usan para la fabricación de geotextiles biodegradables, cuya aplicación puede ser la revegetación de taludes.
- **Fibras Artificiales:** Proviene de la celulosa, como el rayón, la viscosa y el acetato.
- **Fibras Sintéticas:** Son fabricadas a partir de polímeros sintéticos y son usadas cuando al geotextil se le exige durabilidad y resistencia a los ataques de microorganismos y bacterias. Los materiales más usados son: polipropileno, poliéster, polietileno, poliamida y poli acrílico.

4.2.2 Funciones y campos de aplicación

El campo donde se puede emplear este tipo de geotextiles, tejido y no tejido, se define por medio de la función que vayan a cumplir. A pesar de que un geotextil pueda hacer varias funciones, siempre habrá una por la cual se determinará el uso de este. Las principales funciones de un geotextil son:

Figura 15. Funciones de los geotextiles



Fuente. Autor

4.2.2.1 Función de separación

Consiste en la separación de dos capas de suelo con diferentes propiedades físicas tales como: granulometría, densidad, capacidad, etc. que evita que estas se mezclen.

4.2.2.2 Función de refuerzo

Consiste en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo mediante el uso de geotextil, especialmente, su capacidad de resistencia a la tracción, tanto en la construcción como en la puesta al servicio de la construcción. El geotextil actúa como un elemento estructural que le da al suelo confinamiento y reparte proporcionalmente las tensiones locales. Esta función permite mejorar la capacidad portante y la estabilidad en las construcciones.

4.2.2.3 Función de drenaje

Consiste en la captación y dirección de gases y líquidos en el plano del geotextil. Este último, debe impedir el lavado o transporte de partículas finas, ya que al

depositarse en él, reduce la capacidad de permeabilidad. Debe garantizarse el transporte del agua sin generar grandes pérdidas de presión.

4.2.2.4 Función de filtro

Consiste en la restricción del paso de ciertas partículas del terreno por parte del geotextil (depende del tamaño de las partículas y de los poros del geotextil), siempre garantizando el paso de fluidos y gases. Es muy usado en los sistemas de drenaje.

4.2.2.5 Función de protección

Consiste en la prevención o limitación de un deterioro de un sistema geotécnico, como por ejemplo, punzonamientos, roturas, perforaciones, dilataciones y contracciones en geomembranas, es decir, el geotextil protege a la geomembrana (que cumple una función específica) de estos problemas.

4.2.2.6 Función de impermeabilización

Se logra con la impregnación de asfalto u otro material impermeabilizante sintético al geotextil. Este debe tener la resistencia, rigidez y capacidad de deformación necesaria para remediar las tensiones térmicas.

4.3 NORMAS DE ENSAYO Y ESPECIFICACIÓN DE CONSTRUCCIÓN PARA EL GEOTEXTIL¹⁸

- 4.3.1 Método para la determinación de la carga de rotura y la elongación de geotextiles (método GRAB). ASTM D-4632, INV E – 901
- 4.3.2 Método para la determinación del índice de resistencia al punzonamiento de geotextiles, geomembranas y productos relacionados. ASTM D-4833, INV E – 902.
- 4.3.3 Método para la determinación de la resistencia al rasgado trapezoidal de geotextiles. ASTM D-4533, INV E – 903.
- 4.3.4 Método para la determinación de la resistencia al estallido de geotextiles (método del diafragma hidráulico – *mullen burst*). ASTM D-3786, INV E – 904.
- 4.3.5 Método para la determinación de la permeabilidad al agua de los geotextiles por medio de la permitividad. ASTM D-4491, INV E – 905.
- 4.3.6 Método de ensayo estándar para determinar el espesor nominal de geotextiles y geomembranas. ASTM D-5199, INV E – 906.
- 4.3.7 Método estándar para la determinación del tamaño de abertura aparente (taa) de un geotextil. ASTM D-4751, INV E – 907.
- 4.3.8 Método de muestreo de geosintéticos para ensayos. ASTM D-4354 y 4439, INV E – 908.
- 4.3.9 Práctica para establecer la conformidad de especificaciones de geosintéticos. ASTM D- 4759 Y 4439, INV E – 909.
- 4.3.10 Método de ensayo para medir el deterioro de geotextiles a la exposición de luz ultravioleta y agua, (aparato del tipo arco xenón). ASTM D-4355, INV E – 910.
- 4.3.11 Método estándar para determinar la retención de asfalto de geotextiles usados en repavimentaciones asfálticas. ASTM D-6140, INV E – 911.
- 4.3.12 Método estándar para medir la masa por unidad de área de geotextiles. ASTM D-5261, INV E – 912.

¹⁸ COLOMBIA, INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo. Bogotá D.C. 2007.

- 4.3.13 Método de ensayo estandarizado para la determinación de la resistencia a la penetración estática de geotextiles usando un pistón de prueba de 50 mm de diámetro. ASTM D-6241, INV E – 913.
- 4.3.14 Método para la determinación del espesor nominal para productos enrollados para control de erosión (PECE) permanentes. ASTM D-6525, INV E – 914.
- 4.3.15 Método para la determinación del deterioro de geotextiles por exposición a la luz, la humedad y el calor en un aparato del tipo arco de Xenón. ASTM D-4355, INV E – 916.
- 4.3.16 Método de ensayo estándar para determinar el coeficiente de fricción suelo - geosintético y geosintético - geosintético por el método de corte directo. ASTM D 5321 – 02.
- 4.3.17 Método de prueba estándar para propiedades de tensión de geotextiles por el método de tira ancha. ASTM D-4595.

5. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en este proyecto, tomó como referencia las Normas Técnicas Colombianas (ICONTEC) y las Normas INVIAS para la ejecución de los ensayos de laboratorio. Esta fue la metodología desarrollada:

5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se realizó una revisión bibliográfica sobre las investigaciones previas sobre esta temática, las recomendaciones y su metodología, de los ensayos que se llevaron a cabo (granulometría, límite líquido, límite plástico, límite de contracción, proctor modificado y corte directo), y su procedimiento.

5.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras de arena arcillosa se obtuvieron de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga por medio de apiques. Para la escogencia del suelo, se tuvo en cuenta las anteriores investigaciones, las cuales eran suelos finos, para este caso el suelo tiene alto contenido de partículas finas.

Figura 16. Recolección de muestras.



Recolección de muestras material del edificio K de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Bucaramanga.

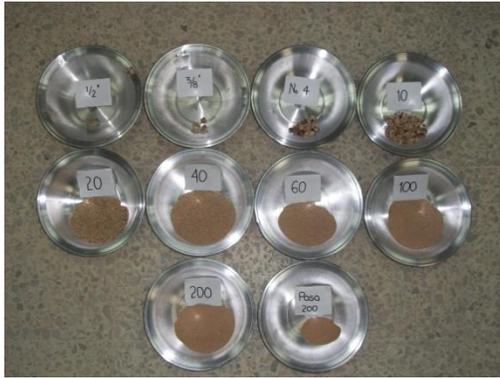
Fuente. Autor

5.3 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

Luego de la recolección del suelo, se procedió hacer su respectiva clasificación y caracterización, para ello se realizaron los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico requeridos para hacerlo por medio del Sistema Unificado de

Clasificación de Suelos (S.U.C.S.). Además se realizaron los ensayos de proctor modificado, para calcular su humedad óptima y densidad específica seca máxima, y límite de contracción. Esto permitió conocer las características físicas del suelo.

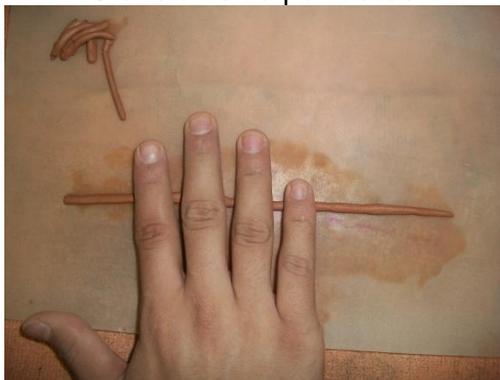
Figura 17. Caracterización del suelo.



Granulometría por mallas



Límite líquido



Límite plástico



Límite de contracción



Proctor modificado

Fuente. Autor

5.4 ENSAYOS DEL SUELO SIN REFUERZO

Se realizaron ensayos de corte directo, al suelo sin refuerzo, de esta manera se calcularon parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna, parámetros fundamentales en la resistencia al corte de un suelo, las cuales se compararon después con los ensayos del suelo reforzado.

Figura 18. Muestra de suelo sin refuerzo



Muestras de suelo sin refuerzo para ensayo de corte directo



Muestra de suelo sin refuerzo fallada

Fuente. Autor

5.5 PREPARACIÓN DEL GEOTEXTIL

Para realizar los ensayos al suelo reforzado, se procedió a preparar las fibras de geotextil T-2400 en sus longitudes y porcentajes requeridos, 1cm 2cm y 3cm, 0.25%, 0.50% y 0.75%, respectivamente. La preparación del geotextil se llevó a cabo por medio de tijeras.

Figura 19. Preparación del geotextil tejido T-2400.



Geotextil recortado y almacenado

Fuente. Autor

5.6 ENSAYOS DEL SUELO CON REFUERZO

Se mezclaron el suelo natural con la proporción de geotextil determinado. Este se compactó con la humedad óptima (obtenida en ensayos previos), aplicando el ensayo de proctor modificado. Posteriormente se extrajeron las muestras para realizar el ensayo de corte directo y determinar los parámetros de resistencia como la cohesión y el ángulo de fricción interna. Cabe recordar que se realizaban 30 ensayos de corte directo para el suelo con geotextil de 1cm con cada una de las proporciones (0.25%, 0.5% y 0.75%), lo mismo se hizo con las fibras de 2cm y para el de 3cm, solo se trabajó la proporción de 0.25% en peso.

Figura 20. Muestra de suelo con refuerzo.



Muestra de suelo con refuerzo sin enrazar para ensayo de corte



Muestra de suelo con refuerzo antes del ensayo de corte directo



Muestra de suelo con refuerzo fallada

Fuente. Autor

5.7 RECOLECCIÓN DE DATOS

La recolección de datos se hizo al tiempo con la ejecución de los ensayos. Se registraron los parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna, tanto

para el suelo natural como para el suelo reforzado, según la longitud y porcentaje de fibra de geotextil T-2400.

5.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los datos obtenidos en los diferentes ensayos, tanto del suelo sin refuerzo, como los del suelo reforzado, se analizaron los parámetros de resistencia al corte (ángulo de fricción interna y cohesión). Posterior a esto se hizo una comparación entre los resultados del suelo natural y el suelo reforzado, para verificar la eficiencia de la fibra de geotextil T-2400 y poder encontrar el porcentaje y longitud óptima de fibra que logró el mejor aumento del ángulo de fricción interna para este tipo de suelo.

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN

Luego de la realización de los ensayos correspondientes a la caracterización del suelo como la granulometría, límite líquido, límite plástico y límite de contracción, estos fueron los resultados obtenidos:

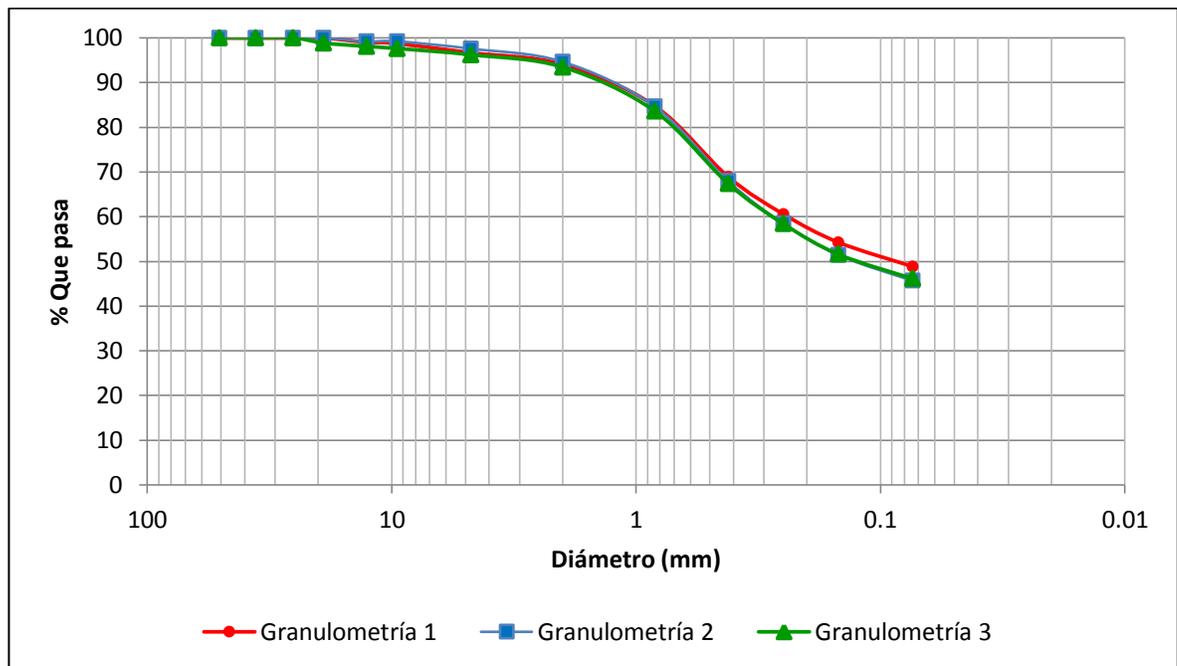
Tabla 2. Resultados ensayos de granulometría.

Ensayo	%Gravas	%Arenas	%Finos
1	3.31	47.87	48.82
2	2.41	51.88	45.71
3	3.8	50.01	46.19
Promedio	3.17	49.92	46.91

Fuente. Autor

Pertenece a un suelo grueso con alto porcentaje de finos: %Gruesos=53.09% y %Finos=46.91%. Sabiendo que más del 50% de la porción gruesa pasa por el tamiz N° 4, el suelo corresponde a una arena y se le asigna la letra S (*Sand*). Recurrimos a los ensayos de límites de Atterberg para asignarle la segunda letra.

Figura 21. Curvas granulométricas.



Fuente. Autor

Tabla 3. Resultados de ensayos límites de plasticidad.

Ensayo	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
1	41.87	25.1	16.77
2	40.67	21.17	19.5
3	40.76	24.44	16.32
Promedio	41.10	23.57	17.53

Fuente. Autor

Un límite líquido (LL) de 41.10%, un límite plástico (LP) de 23.57% y un índice de plasticidad (IP) de 17.53.

Tabla 4. Resultados ensayo de límite de contracción.

Cápsula N°	Límite de Contracción (%)	Relación de contracción (Sr)
1	15.39	1.78
2	18.23	1.81
3	15.60	1.78
Promedio	16.41	1.79

Fuente. Autor

Se obtuvo un límite de contracción de 16.41%.

Con estos datos obtenidos y la ayuda de la carta de plasticidad de Casagrande, se observó que el suelo en estudio, al entrar a dicha carta, con un LL=41.10% y un IP=17.53% se encuentra por encima de la línea A, es decir, está en la zona de las arcillas, por lo cual se le asigna la segunda letra C (*Clay*). En definitiva el suelo corresponde a una Arena Arcillosa [SC].

6.2 RESULTADOS DE COMPACTACIÓN

Se realizaron 3 ensayos de compactación, mediante el método del Proctor Modificado, para hallar la humedad óptima de compactación y la densidad específica seca máxima del suelo.

Tabla 5. Resultados ensayo de compactación.

Ensayo	γ_d (T/m³)	ω (%)
1	1.925	13.6
2	1.935	14.1
3	1.735	14.2
Promedio	1.865	14.0

Fuente. Autor

De estos 3 ensayos de compactación se obtuvo una humedad óptima de 14.0% y una densidad específica seca máxima de 1.865 Ton/m³.

6.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO REALIZADOS A MUESTRAS SIN REFUERZO

Se realizaron 30 cortes directos para el suelo natural (sin refuerzo) en la máquina digital para hallar los parámetros de resistencia al corte. Para estos ensayos, primero el suelo se mezcló con la cantidad de agua para llegar a la humedad óptima, luego se compactó en los moldes de proctor modificado, después se introdujeron los moldes para corte directo, se extraían y finalmente se llevaban a la máquina para realizar este ensayo. Para estas pruebas se usaron esfuerzos normales de 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm² y 1kg/cm² respectivamente.

Tabla 6. Cuadro resumen de ensayos de corte directo. Suelo sin refuerzo.

Resumen suelo sin refuerzo					
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm ²	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ω (%)
	Máx	Máx			
1	14.48	0.41	1.79	1.57	13.73
2	25.86	0.24	1.94	1.70	14.01
3	18.06	0.34	1.96	1.72	14.22
4	17.62	0.39	1.98	1.73	14.30
5	20.10	0.24	1.90	1.66	14.09
6	10.71	0.57	1.89	1.66	14.10
7	16.60	0.45	1.78	1.56	14.07
8	17.24	0.27	1.94	1.70	14.41
9	18.75	0.28	2.00	1.75	14.37
10	15.57	0.49	2.00	1.76	13.65
11	16.54	0.28	2.03	1.77	14.19
12	20.11	0.46	1.99	1.75	13.70
13	21.08	0.30	1.98	1.74	13.69
14	18.75	0.33	1.96	1.73	13.74
15	21.32	0.30	1.98	1.74	14.27
16	22.22	0.22	1.96	1.72	13.68
17	17.62	0.29	2.00	1.76	14.17
18	16.60	0.32	2.04	1.78	14.35
19	16.16	0.25	1.97	1.72	14.41
20	16.22	0.28	2.01	1.77	13.67

Resumen suelo sin refuerzo					
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)
	Máx	Máx			
21	18.37	0.26	1.99	1.75	13.76
22	21.08	0.26	2.03	1.78	13.98
23	17.37	0.28	1.99	1.74	14.40
24	24.33	0.37	2.03	1.79	13.71
25	14.35	0.25	1.96	1.72	14.32
26	17.24	0.28	1.98	1.74	13.86
27	18.37	0.37	1.95	1.71	14.14
28	19.62	0.24	1.98	1.74	13.77
29	20.35	0.26	2.02	1.76	14.32
30	24.56	0.28	1.91	1.68	13.70
Promedio	18.57	0.32	1.96	1.72	14.03
Desviación	3.22	0.08	0.06	0.05	0.28
Coef. Var (%)	17.33	26.68	3.12	3.10	1.98

Fuente. Autor

En la tabla 6 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio de 18.57° con una desviación estándar de 3.22° y una cohesión promedio de 0.32 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.08 kg/cm^2 .

6.4 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO REALIZADOS PARA CALCULAR EL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA MÁQUINA MANUAL

6.4.1 Resultados de los ensayos de corte directo de la máquina manual para esfuerzos de 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 y 1 kg/cm^2

Se realizaron 5 cortes directos para el suelo natural (sin refuerzo) en la máquina manual para hallar los parámetros de resistencia al corte y determinar un factor de corrección entre esta máquina y la digital. Para estas pruebas se usaron esfuerzos normales de 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 y 1 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 7. Cuadro resumen de ensayos de corte directo para factor de corrección. Suelo sin refuerzo.

Resumen suelo natural manual					
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)
	Máx	Máx			
1	50.43	1.05	1.99	1.75	13.87
2	51.35	0.67	2.01	1.76	14.41
3	44.42	0.83	1.99	1.74	14.39
4	47.77	0.70	1.97	1.73	14.21
5	50.83	0.73	1.98	1.74	14.05
Promedio	48.96	0.80	1.99	1.74	14.19
Desviación	2.89	0.15	0.01	0.01	0.23
Coef. Var (%)	5.91	19.04	0.75	0.69	1.60

Fuente. Autor

En la tabla 7 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio de 48.96° con una desviación estándar de 2.89° y una cohesión promedio de 0.8 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.15 kg/cm^2 .

6.4.2 Resultados de los ensayos de corte directo de la máquina manual para esfuerzos de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2

Se realizaron 5 cortes directos para el suelo natural (sin refuerzo) en la máquina manual para hallar los parámetros de resistencia al corte y determinar un factor de corrección entre esta máquina y la digital. Para estas pruebas se usaron esfuerzos normales de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 8. Cuadro resumen de ensayos de corte directo para factor de corrección. Suelo sin refuerzo.

Resumen suelo natural manual					
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)
	Máx	Máx			
1	31.75	1.59	1.98	1.74	14.05
2	35.29	1.05	2.01	1.76	14.38
3	34.24	1.04	1.97	1.72	14.25
4	29.33	1.18	2.02	1.77	14.19
5	36.27	1.10	1.96	1.72	14.23

Resumen suelo natural manual					
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)
	Máx	Máx			
Promedio	33.38	1.19	1.99	1.74	14.22
Desviación	2.82	0.23	0.03	0.02	0.12
Coef. Var (%)	8.45	19.11	1.26	1.25	0.84

Fuente. Autor

En la tabla 8 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio de 33.38° con una desviación estándar de 2.82° y una cohesión promedio de 1.19 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.23 kg/cm^2 .

6.5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO REALIZADOS A MUESTRAS DE SUELO REFORZADAS CON FIBRAS DE GEOTEXTIL TEJIDO T-2400

Se realizaron 30 ensayos de corte directo para cada longitud/proporción de geotextil tejido T-2400 adicionado al suelo. Para este caso se usaron tiras de geotextil de longitudes de 1cm, 2cm y 3 cm y proporciones en porcentaje del peso del suelo de 0.25%, 0.5% y 0.75%. El procedimiento fue similar al realizado al suelo natural, con la diferencia de que antes del mezclado con agua, se le adicionaba el geotextil designado.

6.5.1 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.25%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo: 25 ensayos en la máquina digital con esfuerzos normales de 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 y 1 kg/cm^2 respectivamente; y 5 ensayos en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 9. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.25% en peso.

1 cm - 0.25% Digital - Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx					
						1.8*	3.73*

1 cm - 0.25% Digital - Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	22.51	0.2988	1.96	1.73	13.76	-	-
2	19.24	0.3031	1.95	1.71	13.53	-	-
3	22.04	0.2394	1.95	1.71	14.35	-	-
4	23.46	0.214	1.97	1.74	13.74	-	-
5	25.98	0.2309	1.94	1.71	13.55	-	-
6	21.08	0.1715	1.95	1.71	14.14	-	-
7	20.53	0.2161	1.91	1.67	14.34	-	-
8	16.60	0.3243	1.99	1.75	13.60	-	-
9	23.92	0.2309	1.99	1.75	13.70	-	-
10	25.98	0.1631	1.95	1.71	13.68	-	-
11	14.41	0.3455	1.90	1.66	14.39	-	-
12	23.22	0.2055	1.90	1.67	13.90	-	-
13	30.71	0.1546	1.91	1.68	14.04	-	-
14	17.74	0.3031	1.94	1.69	14.42	-	-
15	23.46	0.214	1.96	1.72	14.03	-	-
16	27.64	0.3115	1.96	1.72	14.42	-	-
17	16.35	0.3497	1.93	1.69	14.40	-	-
18	17.87	0.3412	1.87	1.63	14.38	-	-
19	18.37	0.3412	1.93	1.69	13.71	-	-
20	20.96	0.354	1.98	1.74	13.67	-	-
21	21.68	0.1843	1.96	1.73	13.78	-	-
22	25.75	0.214	1.95	1.71	13.52	-	-
23	25.86	0.2437	1.94	1.69	14.24	-	-
24	20.82	0.3667	1.99	1.75	13.88	-	-
25	25.64	0.2097	1.95	1.71	13.71	-	-
26	35.46	0.9687	1.91	1.68	13.63	19.70	0.26
27	41.03	0.9288	1.97	1.74	13.67	22.80	0.25
28	35.92	0.9898	1.93	1.70	13.67	19.95	0.27
29	39.07	0.9652	1.96	1.73	13.59	21.70	0.26
30	39.16	0.6628	1.88	1.64	14.23	21.76	0.18
Promedio	21.92**	0.26**	1.94	1.70	13.92	21.18	0.24
Desviación	3.63	0.06	0.03	0.03	0.32	1.31	0.04
Coef. Var (%)	16.54	24.70	1.61	1.75	2.31	6.20	15.07

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

** Los promedios del ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c), fueron calculados con los primeros 25 ensayos realizados en la máquina de corte directo digital, más los 5 últimos ensayos realizados en la máquina de corte directo manual afectados por el factor de corrección correspondiente.

Fuente. Autor

En la tabla 9 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio de 21.92° con una desviación estándar de 3.63° y una cohesión promedio de 0.26 kg/cm² con una desviación estándar de 0.06 kg/cm².

6.5.2 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.5%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm², 1 kg/cm² y 2kg/cm² respectivamente.

Tabla 10. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.5% en peso.

Resumen 1 cm - 0.5% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm ²	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ω (%)	Ángulo corregido kf	Cohesión corregida kc
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	36.47	1.07	1.89	1.66	14.08	20.26	0.29
2	38.40	1.25	1.91	1.67	14.29	21.33	0.33
3	38.79	1.28	1.90	1.67	14.04	21.55	0.34
4	31.88	1.60	1.97	1.72	14.08	17.71	0.43
5	42.41	0.98	1.89	1.66	13.84	23.56	0.26
6	45.11	0.49	1.96	1.71	14.33	25.06	0.13
7	46.11	1.06	1.99	1.74	14.21	25.61	0.28
8	46.77	0.79	1.90	1.67	13.68	25.99	0.21
9	34.39	1.00	1.93	1.70	13.67	19.11	0.27
10	38.45	1.11	1.95	1.68	14.44	21.36	0.30
11	46.23	0.81	0.80	0.70	14.35	25.68	0.22
12	31.88	1.33	1.93	1.69	14.24	17.71	0.36
13	49.91	0.97	1.94	1.70	13.91	27.73	0.26
14	47.96	1.13	2.04	1.78	14.27	26.65	0.30
15	40.23	0.96	1.95	1.71	14.18	22.35	0.26
16	39.99	1.23	1.93	1.69	14.36	22.22	0.33
17	39.42	1.13	1.93	1.69	14.31	21.90	0.30
18	44.68	1.09	1.93	1.70	13.83	24.82	0.29
19	48.59	1.02	1.94	1.70	13.96	26.99	0.27
20	41.09	1.06	1.95	1.71	14.30	22.83	0.28
21	41.46	1.08	1.98	1.73	14.22	23.03	0.29
22	40.07	1.08	1.98	1.73	14.18	22.26	0.29
23	42.54	1.00	1.94	1.71	14.05	23.63	0.27

Resumen 1 cm - 0.5% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
24	42.95	1.06	1.94	1.70	14.14	23.86	0.28
25	43.63	0.96	1.96	1.72	14.07	24.24	0.26
26	42.31	1.00	1.95	1.71	14.05	23.50	0.27
27	38.73	1.11	1.98	1.73	14.12	21.52	0.30
28	47.17	1.15	1.93	1.70	13.75	26.20	0.31
29	36.88	1.03	1.93	1.69	14.37	20.49	0.28
30	46.04	1.00	1.98	1.73	14.12	25.58	0.27
Promedio	41.68	1.06	1.91	1.67	14.11	23.16	0.28
Desviación	4.72	0.19	0.21	0.19	0.21	2.62	0.05
Coef. Var (%)	11.31	17.70	11.08	11.09	1.48	11.31	17.70

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 10 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 23.16° con una desviación estándar de 2.62° y una cohesión promedio corregida de 0.28 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.05 kg/cm^2 .

6.5.3 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 1 cm y porcentaje de 0.75%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 11. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 1cm y proporción de 0.75% en peso.

Resumen 1 cm - 0.75% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	33.00	1.04	1.86	1.63	14.30	18.33	0.28
2	39.06	0.83	1.90	1.66	14.28	21.70	0.22
3	43.21	1.07	1.91	1.67	14.38	24.00	0.29
4	43.51	0.96	1.63	1.42	14.25	24.17	0.26

Resumen 1 cm - 0.75% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
5	37.08	1.20	1.92	1.69	13.65	20.60	0.32
6	42.62	1.01	1.95	1.71	13.68	23.68	0.27
7	42.97	0.88	1.89	1.66	14.23	23.87	0.24
8	41.34	0.80	1.88	1.65	14.10	22.97	0.21
9	24.96	1.11	1.98	1.73	14.22	13.87	0.30
10	39.55	1.04	1.85	1.62	14.32	21.97	0.28
11	38.66	0.89	1.87	1.64	14.23	21.48	0.24
12	34.01	1.20	1.91	1.67	14.40	18.90	0.32
13	33.80	1.07	1.85	1.62	14.40	18.78	0.29
14	43.95	1.27	1.93	1.69	13.84	24.42	0.34
15	36.90	1.42	1.84	1.62	13.67	20.50	0.38
16	49.96	0.67	1.88	1.65	13.80	27.76	0.18
17	41.76	1.14	1.90	1.67	13.78	23.20	0.31
18	41.69	1.08	1.92	1.68	14.42	23.16	0.29
19	41.53	0.93	1.95	1.71	14.01	23.07	0.25
20	38.57	1.31	1.89	1.66	14.08	21.43	0.35
21	41.22	1.12	1.95	1.71	14.06	22.90	0.30
22	34.50	1.49	1.65	1.45	14.15	19.16	0.40
23	34.38	1.17	1.98	1.74	14.28	19.10	0.31
24	38.00	1.05	1.94	1.70	14.27	21.11	0.28
25	40.05	1.28	1.93	1.69	14.18	22.25	0.34
26	41.32	1.13	1.91	1.67	14.31	22.95	0.30
27	38.06	1.26	1.94	1.70	14.02	21.14	0.34
28	40.09	1.28	1.90	1.66	14.38	22.27	0.34
29	37.69	1.40	1.89	1.66	14.02	20.94	0.37
30	39.42	0.86	1.92	1.68	13.96	21.90	0.23
Promedio	39.09	1.10	1.89	1.66	14.12	21.72	0.29
Desviación	4.51	0.19	0.08	0.07	0.23	2.51	0.05
Coef. Var (%)	11.54	17.74	4.06	4.08	1.66	11.54	17.74

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 11 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 21.72° con una desviación estándar de 2.51° y una cohesión promedio corregida de 0.29 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.05 kg/cm^2 .

6.5.4 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.25%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm², 1 kg/cm² y 2 kg/cm² respectivamente.

Tabla 12. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.25% en peso.

2 cm - 0.25% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm ²	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ω (%)	Ángulo corregido kf	Cohesión corregida kc
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	38.83	0.74	1.92	1.68	14.30	21.57	0.20
2	38.67	0.74	1.89	1.65	14.34	21.48	0.20
3	36.26	0.80	1.95	1.70	14.35	20.14	0.22
4	37.78	1.04	1.89	1.65	14.43	20.99	0.28
5	40.26	0.71	1.92	1.68	14.30	22.37	0.19
6	41.79	1.10	1.93	1.70	13.68	23.22	0.30
7	39.48	0.25	1.98	1.74	13.71	21.93	0.07
8	46.06	1.02	1.96	1.73	13.66	25.59	0.27
9	36.85	0.89	1.94	1.71	13.74	20.47	0.24
10	42.21	0.93	2.17	1.90	13.78	23.45	0.25
11	34.39	0.62	1.93	1.69	14.37	19.11	0.17
12	43.29	0.85	1.99	1.75	13.60	24.05	0.23
13	34.66	0.71	1.94	1.70	14.40	19.26	0.19
14	41.23	0.91	1.94	1.71	13.63	22.91	0.24
15	34.59	0.72	1.87	1.63	14.41	19.21	0.19
16	38.05	0.76	1.91	1.67	14.35	21.14	0.20
17	38.28	1.07	1.96	1.72	13.60	21.27	0.29
18	36.09	1.03	1.95	1.71	13.65	20.05	0.28
19	42.15	1.34	1.99	1.75	13.60	23.42	0.36
20	34.74	1.48	1.98	1.74	13.70	19.30	0.40
21	43.76	1.15	1.93	1.70	13.58	24.31	0.31
22	42.03	0.71	1.93	1.70	13.68	23.35	0.19
23	42.40	1.06	1.89	1.66	13.67	23.56	0.29
24	40.00	0.74	1.92	1.68	14.15	22.22	0.20
25	38.52	0.62	1.88	1.65	13.85	21.40	0.17
26	37.13	0.87	1.97	1.72	14.39	20.63	0.23
27	50.13	0.44	1.91	1.67	14.42	27.85	0.12
28	45.88	0.66	1.93	1.69	14.42	25.49	0.18
29	39.05	0.73	1.92	1.68	14.32	21.69	0.20

2 cm - 0.25% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
30	37.50	0.65	1.89	1.65	14.44	20.83	0.17
Promedio	39.74	0.85	1.94	1.70	14.02	22.08	0.23
Desviación	3.76	0.25	0.05	0.05	0.36	2.09	0.07
Coef. Var (%)	9.46	29.67	2.79	2.92	2.54	9.46	29.67

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 12 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 22.08° con una desviación estándar de 2.09° y una cohesión promedio corregida de 0.23 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.07 kg/cm^2 .

6.5.5 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.5%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 13. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.5% en peso.

2 cm - 0.5% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	43.63	0.44	1.90	1.66	14.44	24.24	0.12
2	35.28	0.79	1.90	1.66	14.42	19.60	0.21
3	36.34	0.67	1.86	1.62	14.39	20.19	0.18
4	43.27	0.72	1.89	1.66	13.72	24.04	0.19
5	47.19	0.76	1.87	1.64	14.37	26.22	0.20
6	42.78	0.72	1.89	1.66	13.72	23.76	0.19
7	47.64	0.52	1.93	1.70	13.67	26.47	0.14
8	34.40	0.90	1.92	1.68	13.71	19.11	0.24
9	41.25	0.63	1.86	1.63	13.93	22.92	0.17
10	41.65	0.79	1.87	1.63	14.45	23.14	0.21

2 cm - 0.5% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
11	55.25	0.50	1.90	1.67	13.68	30.69	0.13
12	43.26	1.02	1.90	1.67	13.59	24.03	0.27
13	40.29	0.71	1.93	1.70	13.58	22.39	0.19
14	40.65	1.00	1.92	1.69	13.64	22.58	0.27
15	47.05	0.46	1.91	1.68	13.60	26.14	0.12
16	41.73	0.69	1.95	1.71	14.41	23.18	0.19
17	48.95	0.43	1.88	1.65	13.56	27.19	0.11
18	44.46	0.98	1.88	1.65	13.76	24.70	0.26
19	47.37	1.01	1.90	1.68	13.59	26.32	0.27
20	49.15	0.69	1.94	1.71	13.66	27.31	0.18
21	38.78	1.06	1.95	1.71	13.90	21.54	0.28
22	48.89	0.60	1.95	1.72	13.60	27.16	0.16
23	49.04	0.65	1.86	1.63	13.94	27.24	0.17
24	43.82	1.00	1.85	1.62	13.97	24.35	0.27
25	31.58	1.03	1.93	1.70	13.94	17.55	0.28
26	39.07	1.01	1.85	1.62	14.08	21.70	0.27
27	48.72	0.30	1.93	1.68	14.43	27.07	0.08
28	42.54	0.52	1.88	1.64	14.41	23.63	0.14
29	49.52	0.72	1.94	1.70	13.60	27.51	0.19
30	44.58	0.53	1.84	1.61	14.22	24.77	0.14
Promedio	43.60	0.73	1.90	1.67	13.93	24.22	0.20
Desviación	5.25	0.21	0.03	0.03	0.34	2.92	0.06
Coef. Var (%)	12.05	29.52	1.78	1.89	2.41	12.05	29.52

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 13 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 24.22° con una desviación estándar de 2.92° y una cohesión promedio corregida de 0.2 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.06 kg/cm^2 .

6.5.6 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 2 cm y porcentaje de 0.75%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 respectivamente.

Tabla 14. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 2cm y proporción de 0.75% en peso.

2 cm - 0.75% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				1.8*	3.73*
1	32.53	1.26	1.88	1.65	14.17	18.07	0.34
2	38.18	1.04	1.84	1.61	14.30	21.21	0.28
3	38.35	1.15	1.90	1.67	13.66	21.31	0.31
4	41.60	1.20	1.91	1.68	13.71	23.11	0.32
5	41.68	0.58	1.91	1.68	13.70	23.16	0.15
6	40.10	0.63	1.93	1.70	13.57	22.28	0.17
7	32.79	0.76	1.79	1.57	13.97	18.22	0.20
8	40.73	1.13	1.88	1.66	13.62	22.63	0.30
9	22.45	1.25	1.89	1.66	14.03	12.47	0.33
10	38.94	1.16	1.92	1.69	13.68	21.63	0.31
11	37.92	0.99	1.92	1.69	13.94	21.06	0.27
12	44.63	1.12	1.92	1.69	13.61	24.79	0.30
13	38.67	0.61	1.88	1.65	13.69	21.48	0.16
14	26.99	0.84	1.82	1.60	13.64	14.99	0.22
15	36.42	1.10	1.98	1.75	13.63	20.23	0.30
16	47.05	1.05	1.94	1.70	13.85	26.14	0.28
17	40.32	1.03	1.88	1.65	13.85	22.40	0.28
18	41.99	0.71	1.91	1.68	13.68	23.33	0.19
19	30.98	1.17	1.87	1.64	13.62	17.21	0.31
20	35.98	0.89	1.84	1.62	13.66	19.99	0.24
21	29.48	1.42	1.90	1.67	13.62	16.38	0.38
22	25.26	1.33	1.91	1.68	13.62	14.03	0.36
23	41.61	0.69	1.96	1.72	13.88	23.12	0.19
24	49.56	0.66	1.86	1.63	13.88	27.53	0.18
25	42.46	0.56	1.79	1.58	13.81	23.59	0.15
26	33.71	0.90	1.86	1.64	13.73	18.73	0.24
27	36.37	1.15	1.90	1.67	13.64	20.20	0.31
28	30.46	1.21	1.96	1.72	13.92	16.92	0.33
29	38.25	1.08	1.96	1.72	13.81	21.25	0.29
30	33.36	0.96	1.85	1.63	13.91	18.53	0.26
Promedio	36.96	0.99	1.89	1.66	13.78	20.53	0.27
Desviación	6.25	0.24	0.05	0.04	0.18	3.47	0.07
Coef. Var (%)	16.90	24.60	2.52	2.56	1.29	16.90	24.60

* Parámetros de corrección para cargas de 0.5 kg/cm^2 , 1 kg/cm^2 y 2 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 14 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 20.53° con una desviación estándar de 3.47° y una cohesión promedio corregida de 0.27 kg/cm² con una desviación estándar de 0.07 kg/cm².

6.5.7 Resultados de los ensayos de corte directo realizados a muestras de suelo con refuerzo de longitud de 3 cm y porcentaje de 0.25%

Se realizaron 30 ensayos de corte directo en la máquina manual, con esfuerzos normales de 0.25 kg/cm², 0.5 kg/cm² y 1kg/cm² respectivamente.

Tabla 15. Cuadro resumen ensayos de corte directo. Suelo reforzado con fibra de 3cm y proporción de 0.25% en peso.

Resumen 3 cm - 025% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm ²	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ω (%)	Ángulo corregido kf	Cohesión corregida kc
	Máx	Máx				2.64*	2.5*
1	55.39	0.26	1.93	1.69	14.37	20.98	0.10
2	47.79	0.91	1.93	1.69	14.07	18.10	0.36
3	33.49	0.47	1.99	1.74	13.99	12.69	0.19
4	54.55	0.96	1.99	1.75	13.59	20.66	0.38
5	43.40	0.99	1.95	1.71	14.40	16.44	0.40
6	50.93	0.70	1.95	1.72	13.60	19.29	0.28
7	57.91	0.89	1.97	1.74	13.75	21.94	0.36
8	53.28	0.89	1.94	1.71	13.65	20.18	0.35
9	46.44	0.54	1.94	1.69	14.38	17.59	0.21
10	48.06	0.68	1.95	1.70	14.36	18.21	0.27
11	54.39	0.74	1.92	1.68	14.39	20.60	0.30
12	60.20	0.51	1.92	1.69	13.79	22.80	0.20
13	48.15	1.09	1.97	1.72	14.37	18.24	0.44
14	45.36	0.78	1.97	1.72	14.05	17.18	0.31
15	54.74	0.86	1.99	1.74	14.31	20.74	0.34
16	48.61	0.65	1.99	1.74	14.03	18.41	0.26
17	61.68	0.48	1.98	1.74	13.86	23.36	0.19
18	56.98	0.64	1.99	1.75	14.16	21.58	0.26
19	46.55	0.95	1.99	1.75	13.95	17.63	0.38
20	41.48	0.71	1.97	1.73	13.72	15.71	0.28
21	56.77	0.78	1.99	1.75	13.65	21.50	0.31
22	25.08	1.07	1.95	1.72	13.68	9.50	0.43
23	44.81	0.58	1.94	1.69	14.42	16.97	0.23

Resumen 3 cm - 025% Manual							
Ensayo	Ángulo de fricción ϕ	Cohesión kg/cm^2	γ (g/cm^3)	γ_d (g/cm^3)	ω (%)	Ángulo corregido k_f	Cohesión corregida k_c
	Máx	Máx				2.64*	2.5*
24	46.15	0.70	1.94	1.69	14.36	17.48	0.28
25	46.26	0.69	1.97	1.73	14.28	17.52	0.28
26	50.39	0.45	1.94	1.70	14.36	19.09	0.18
27	44.67	0.79	1.94	1.70	14.36	16.92	0.31
28	34.02	1.33	2.01	1.76	14.13	12.89	0.53
29	57.70	0.60	2.01	1.76	14.13	21.86	0.24
30	57.70	0.59	1.95	1.71	13.65	21.86	0.24
Promedio	49.10	0.74	1.96	1.72	14.06	18.60	0.30
Desviación	8.31	0.23	0.03	0.02	0.30	3.15	0.09
Coef. Var (%)	16.93	30.34	1.32	1.41	2.11	16.93	30.34

* Parámetros de corrección para cargas de 0.25 kg/cm^2 , 0.5 kg/cm^2 y 1 kg/cm^2 . Más adelante en el numeral 7.2 se describe todo lo relacionado al factor de corrección.

Fuente. Autor

En la tabla 15 se observan los promedios de los parámetros de resistencia al corte del suelo analizado: un ángulo de fricción interno promedio corregido de 18.60° con una desviación estándar de 3.15° y una cohesión promedio corregida de 0.30 kg/cm^2 con una desviación estándar de 0.09 kg/cm^2 .

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 LÍMITE DE CONTRACCIÓN

El límite de contracción de la Arena Arcillosa analizada en este trabajo de grado dio 16.41%, lo cual, según la tabla 16 presentada a continuación, este límite es bajo.

Tabla 16. Rango de límites de contracción.

Cambio de Volumen	Límite de Contracción
Bajo	≥ 12
Bajo a Medio	10-12
Medio a Alto	≤ 10

Fuente: Mecánica de suelos y cimentaciones¹⁹.

7.2 FACTOR DE CORRECCIÓN

Debido a que durante el transcurso de este trabajo, la máquina de corte directo digital se averió, se decidió continuar los ensayos con la máquina de corte manual, para lo cual, se hizo necesario calcular unos factores de corrección entre ambas máquinas, debido a la variación que se presentó en los resultados por este cambio de equipo. Cabe aclarar que en la máquina digital se trabajaron con esfuerzos normales de 0.25, 0.5 y 1 kg/cm² mientras que en la máquina manual se trabajaron ensayos con dos tipos de esfuerzos normales: 0.25, 0.5, 1 kg/cm² y 0.5, 1, 2 kg/cm², por lo tanto, se calcularon 2 factores de corrección para el ángulo de fricción interna y 2 factores de corrección para la cohesión. A continuación se explica cómo se llegó a estos factores:

En los 30 ensayos de corte directo al suelo natural realizados en la máquina digital, se obtuvo como resultado promedio un ángulo de fricción interna de 18.57° y una cohesión de 0.32 kg/cm².

Luego se realizaron 10 ensayos de corte directo en la máquina manual, 5 para un grupo de esfuerzos normales (0.25, 0.5, 1 kg/cm²) y 5 para el otro grupo (0.5, 1, 2 kg/cm²). Con los cuales se obtuvieron resultados promedios de la siguiente manera:

¹⁹ CRESPO V., Carlos. Plasticidad de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. 4 ed. México. Editorial Limusa Noriega Editores. 1999. p.86.

Tabla 17. Resultados promedio de los ensayos de corte directo para factor de corrección.

Esfuerzos Normales (Kg/cm²)	Angulo de fricción interna Promedio (°)	Cohesión Promedio (Kg/cm²)
0.25 - 0.5 - 1	48.96	0.8
0.5 - 1 - 2	33.38	1.19

Fuente. Autor

Para el cálculo del factor de corrección entre las máquinas de corte directo, se dividió el valor de la máquina manual sobre el valor de la máquina digital, dando los siguientes resultados:

Tabla 18. Factores de corrección para el ensayo de corte directo en la máquina manual

Esfuerzos Normales (Kg/cm²)	Factor Corrección Ángulo de Fricción Interna (kf)	Factor Corrección Cohesión (kc)
0.25 - 0.5 - 1	2.64	2.50
0.5 - 1 - 2	1.80	3.73

Fuente. Autor

Estos factores fueron aplicados a todos los ensayos realizados en la máquina de corte directo manual.

7.3 CORTE DIRECTO

Después de haber realizado todos los ensayos de corte directo, tanto del suelo reforzado como no reforzado, y compactados a la humedad óptima, se prosiguió con la realización de las gráficas que permitió el mejor análisis de resultados de este trabajo de grado.

En la siguiente tabla se muestran los promedios del ángulo de fricción interna, obtenidos en todos los ensayos realizados.

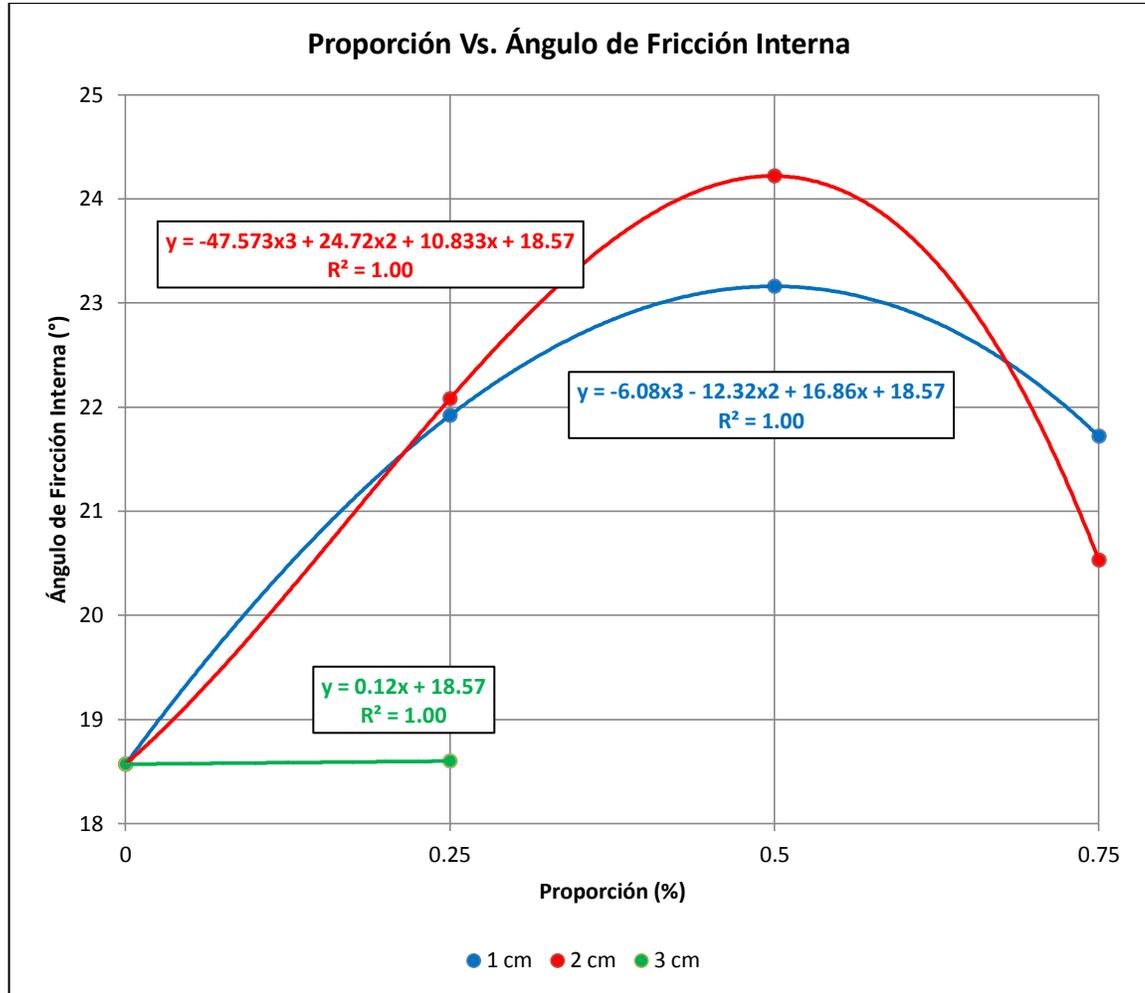
Tabla 19. Resumen de los ángulos de fricción interna.

Angulo Fricción Interna (°)			
Proporción (%)	Longitud (cm)		
	1	2	3
0	18.57	18.57	18.57
0.25	21.92	22.08	18.6
0.5	23.16	24.22	-
0.75	21.72	20.53	-

Fuente. Autor

En la siguiente figura se graficaron las proporciones de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto al ángulo promedio obtenido en los ensayos.

Figura 22. Proporción vs. Ángulo de Fricción Interna.

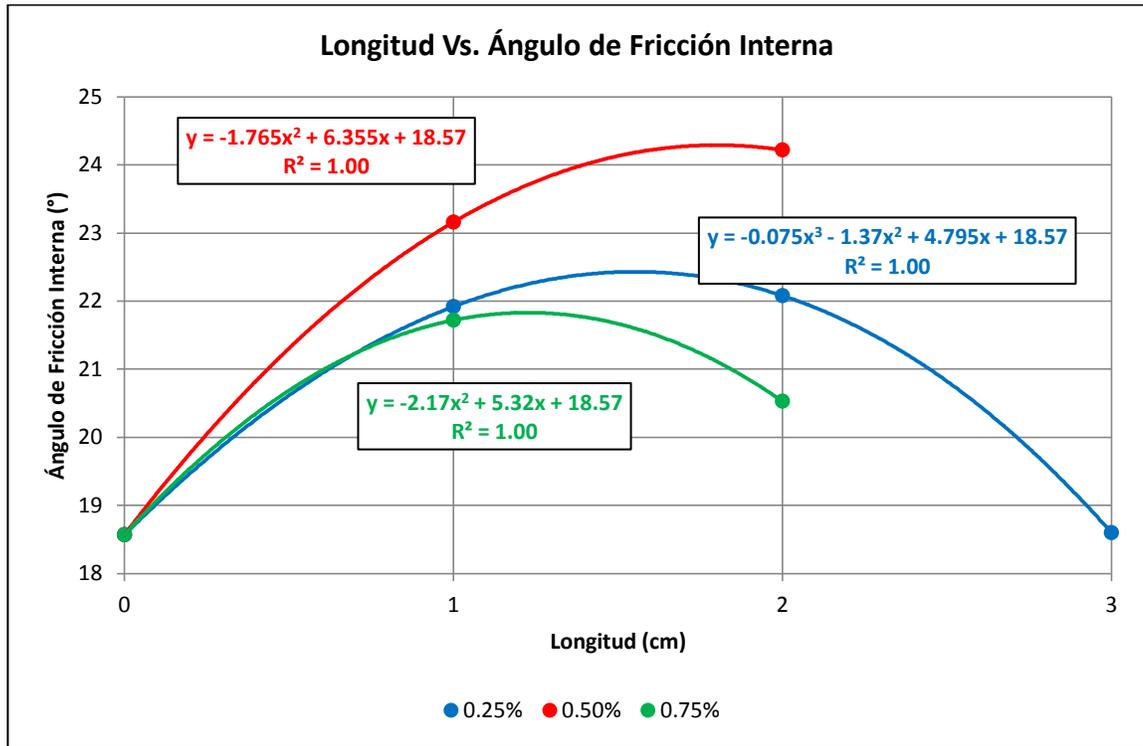


Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que para la longitud de 2 cm y proporción 0.5%, se presenta el mayor ángulo de fricción con un valor de 24.22°, es decir, que esta proporción y longitud de fibra de geotextil fue la óptima. También se observa que para la longitud de 3 cm y proporción 0.25%, el ángulo de fricción no presenta una variación relevante, con lo cual, se decidió no continuar con las otras dos proporciones de esta longitud (0.5% y 0.75%), pues no alcanzaría a superar el ángulo como las otras dos longitud/proporción si lo hicieran.

En la siguiente figura se graficaron las longitudes de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto al ángulo promedio obtenido en los ensayos.

Figura 23. Longitud vs. Ángulo de fricción interna.



Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que para la proporción de fibra de geotextil de 0.5 %, el ángulo aumentó notablemente respecto de las otras proporciones, es decir, que esta proporción fue la óptima. También se observa que para la proporción de 0.75 %, el ángulo de fricción no aumentó significativamente.

En la siguiente tabla se muestran los porcentajes de variación del ángulo de fricción interna, obtenidos en todos los ensayos realizados.

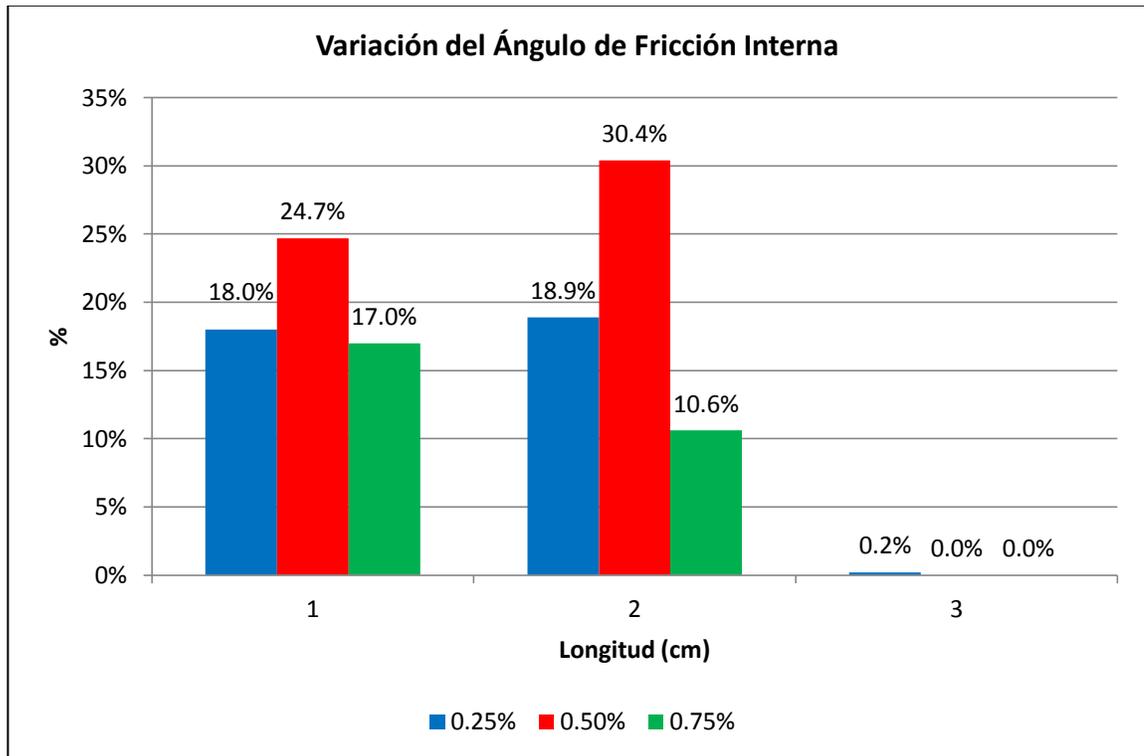
Tabla 20. Variación del ángulo de fricción interna.

Variación del Ángulo Fricción Interna (%)			
Proporción (%)	Natural	18.57	
	Longitud (cm)		
	1	2	3
0.25	18.0	18.9	0.2
0.5	24.7	30.4	-
0.75	17.0	10.6	-

Fuente. Autor

En la siguiente figura se graficaron las longitudes de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto al porcentaje mejorado del ángulo de fricción interna obtenido en los ensayos.

Figura 24. Variación del ángulo de fricción interna vs. Longitud.



Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que la proporción de 0.5% fue la que mayor mejoramiento logró en el ángulo de fricción del suelo estudiado, mientras que la proporción de 0.75% fue la que menor mejoramiento presentó en el ángulo de fricción. Además se aprecia que la longitud de 2cm y proporción 0.5% fue la longitud/proporción óptima. La fibra de geotextil de 3 cm no arroja ningún cambio significativo en el suelo.

En la siguiente tabla se muestran los promedios de la cohesión, obtenidos en todos los ensayos realizados.

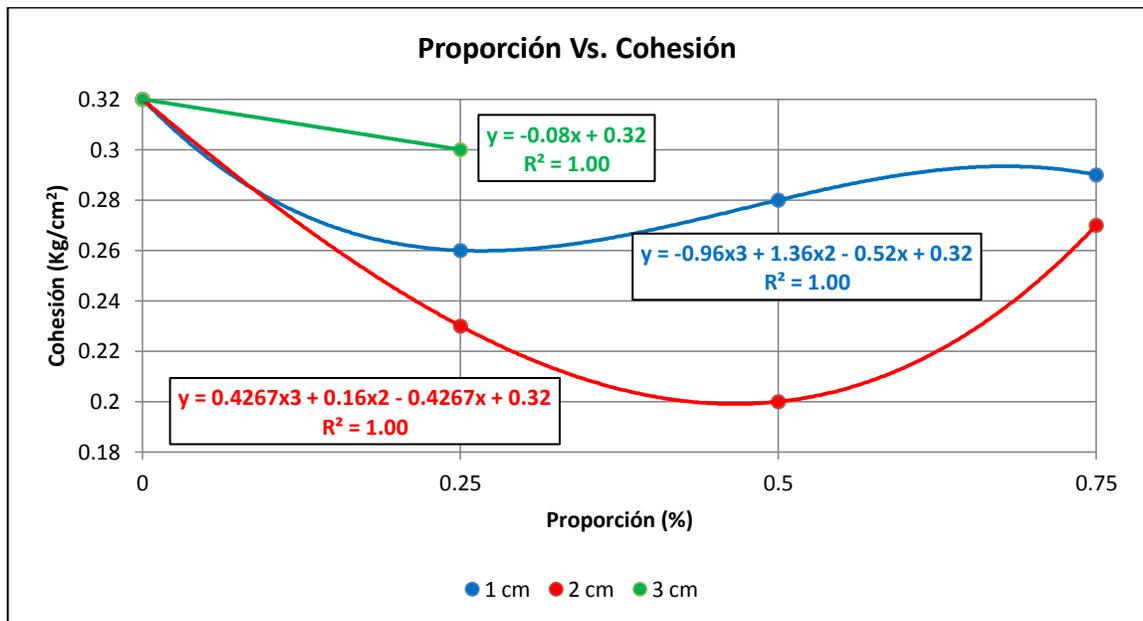
Tabla 21. Resumen de la cohesión de los ensayos de corte directo.

Cohesión (kg/cm ²)			
Proporción (%)	Longitud (cm)		
	1	2	3
0	0.32	0.32	0.32
0.25	0.26	0.23	0.3
0.5	0.28	0.2	-
0.75	0.29	0.27	-

Fuente. Autor

En la siguiente figura se graficaron las proporciones de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto a la cohesión obtenida en los ensayos.

Figura 25. Proporción vs. Cohesión.

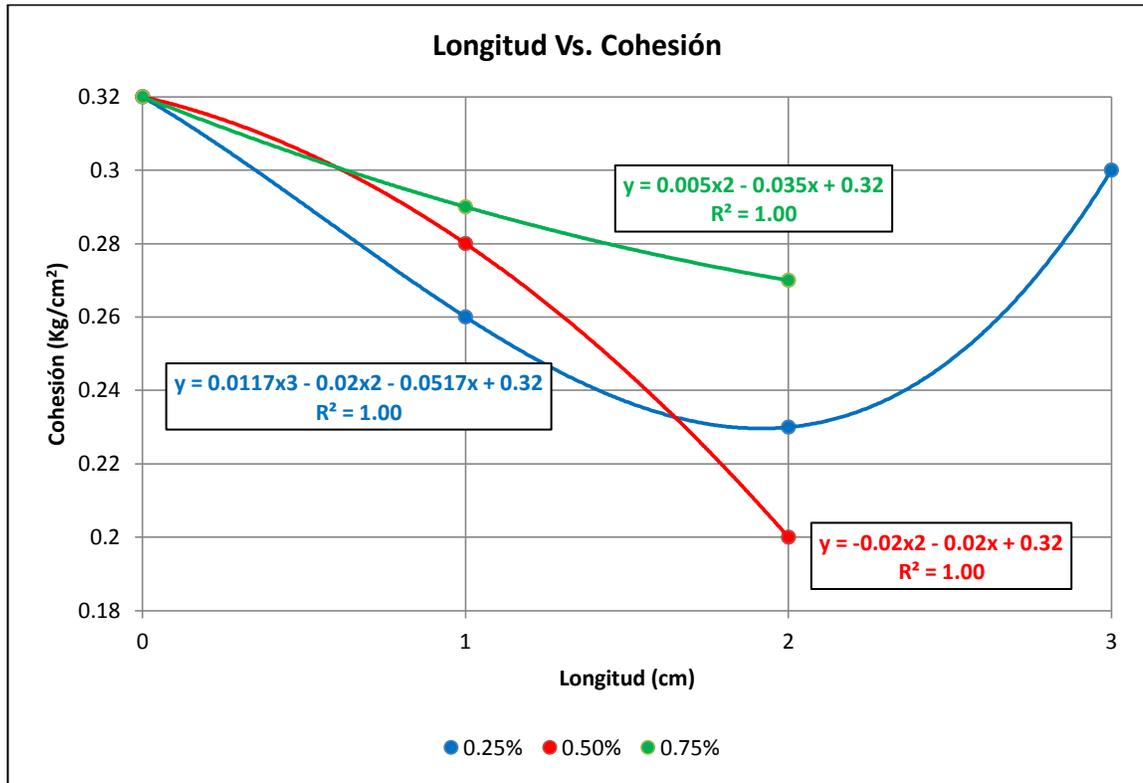


Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que para la longitud de 2 cm se presenta una disminución considerable en la cohesión del suelo, y en la proporción de 0.5% de esta misma longitud, se presenta la menor cohesión de los ensayos realizados con 0.2 Kg/cm². Además, se observa que ninguna longitud/proporción de fibra de geotextil mejoró la cohesión.

En la siguiente figura se graficaron las longitudes de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto a la cohesión obtenida en los ensayos.

Figura 26. Longitud vs. Cohesión.



Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que en la proporción de fibra de geotextil 0.5% y longitud de 2 cm, la cohesión del suelo fue la que más disminuyó respecto a las demás. También se observa que la proporción de 0.75% fue la que menor afectación hizo en la cohesión y además se aprecia que la cohesión y la longitud/proporción de fibra geotextil no presentan una relación entre sí.

En la siguiente tabla se muestran los porcentajes de variación de la cohesión, obtenidos en todos los ensayos realizados.

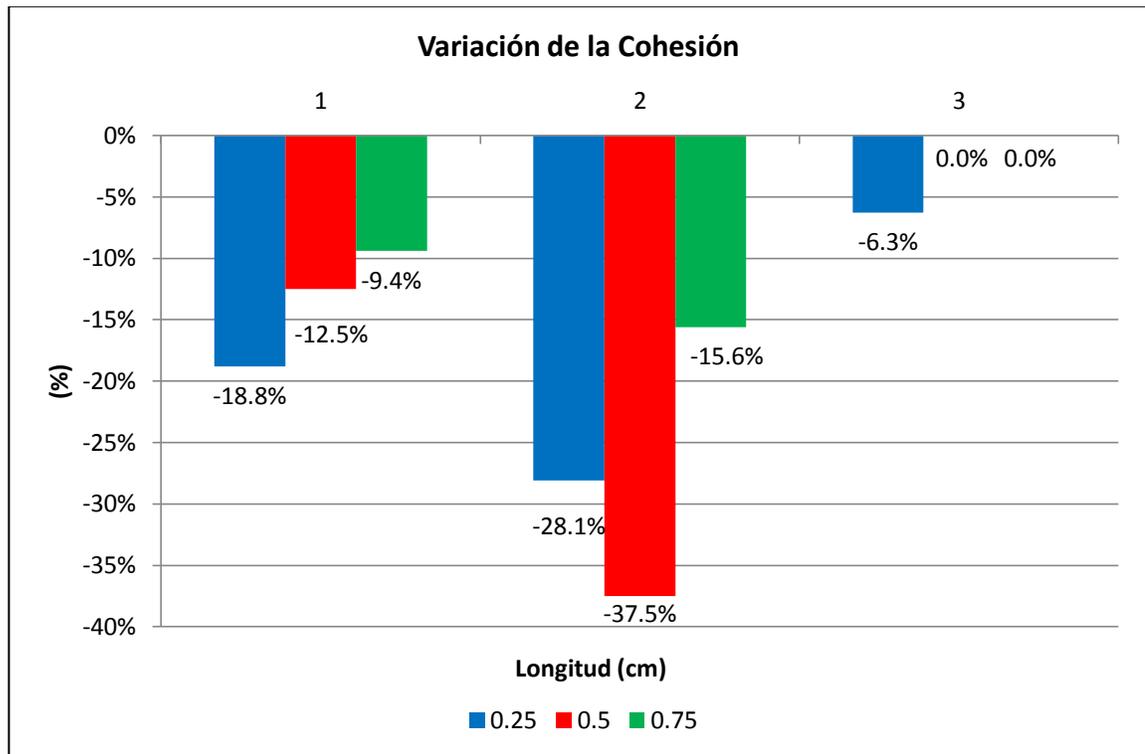
Tabla 22. Variación de la cohesión.

Variación Cohesión (%)			
Proporción (%)	Natural	0.32	
	Longitud (cm)		
	1	2	3
0.25	-18.8	-28.1	-6.3
0.5	-12.5	-37.5	-
0.75	-9.4	-15.6	-

Fuente. Autor

En la siguiente figura se graficaron las longitudes de fibra de geotextil adicionadas al suelo respecto al porcentaje de variación de la cohesión obtenida en los ensayos realizados.

Figura 27. Variación de la cohesión vs. Longitud



Fuente. Autor

En la anterior gráfica se observa que en la longitud de 2 cm, la cohesión se vio altamente afectada. Además se aprecia que en la proporción de 0.75%, se obtuvo la menor afectación de la cohesión del suelo estudiado. También se concluye que en todas las proporciones/longitudes de fibra de geotextil, la cohesión disminuyó.

8. CONCLUSIONES

- Por medio de la granulometría por mallas y los límites de Atterberg, se concluye que el suelo estudiado es una arena arcillosa (SC), este suelo se encontró en la Universidad Pontificia Bolivariana en el sector entre la cafetería campestre y el edificio K.
- Mediante los ensayos de compactación (proctor modificado), se determinó la humedad óptima del suelo que fue de aproximadamente 14% y el peso específico seco máximo de 1.865 T/m^3 .
- Los parámetros de resistencia al corte del suelo estudiado sin refuerzo fueron los siguiente: ángulo de fricción interna = 18.57° y cohesión = 0.32 kg/cm^2 .
- Los parámetros de resistencia al corte del suelo reforzado con fibra de geotextil tejido T-2400 de 1cm proporción 0.25% fueron: ángulo de fricción interna = 21.92° y cohesión = 0.26 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 1 cm proporción 0.5% fueron: ángulo de fricción interna = 23.16° y cohesión = 0.28 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 1 cm proporción 0.75% fueron: ángulo de fricción interna = 21.72° y cohesión = 0.29 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 2 cm proporción 0.25% fueron: ángulo de fricción interna = 22.08° y cohesión = 0.23 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 2 cm proporción 0.5% fueron: ángulo de fricción interna = 24.22° y cohesión = 0.20 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 2 cm proporción 0.75% fueron: ángulo de fricción interna = 20.53° y cohesión = 0.27 kg/cm^2 . Para el suelo reforzado con fibra de geotextil de 3 cm proporción 0.5% fueron: ángulo de fricción interna = 18.60° y cohesión = 0.30 kg/cm^2 .
- El mayor ángulo de fricción del suelo reforzado fue de 24.22° , el cual se presentó en la proporción de fibra de 0.5 % del peso de la muestra y longitud de 2 cm, a estos valores les correspondió una cohesión de 0.20 kg/cm^2 . Con estos resultados, el ángulo de fricción interna tuvo un aumento de 30.4 % y la cohesión disminuyó 37.5 %.
- A través del ensayo de límite de contracción se determinó que para este suelo, dicho límite fue de 16.41 %.
- Con los resultados obtenidos, se observó que para longitudes de fibra de 3cm, el ángulo de fricción interna del suelo no tuvo mayor alteración, por lo tanto, se concluye que el suelo no se reforzó con este tipo de fibra para dicha longitud.

- Este trabajo de grado sólo es aplicable para suelos del tipo de arenas arcillosas (SC), clasificadas mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y para el geotextil tejido T-2400.
- En la longitud y proporción óptima de fibra de geotextil (2 cm y 0.5%) se presentó la mayor afectación de la cohesión (0.20 Kg/cm²), con una disminución del 37.5%.
- Para cualquier longitud y proporción de fibra de geotextil tejido T-2400 utilizadas en este trabajo de grado, adicionado a una arena arcillosa, la cohesión disminuye, sin embargo el objetivo de este trabajo no era el mejoramiento de la cohesión.
- La proporción que mostró una mejoría del ángulo de fricción independientemente de la longitud utilizada, es la de 0.5 %, seguida de la proporción de 0.25%, a diferencia de la proporción de 0.75 % que siempre tuvo una tendencia a disminuir.
- Debido a que en la longitud de 3 cm y proporción de 0.25 % el ángulo no aumentó significativamente (0.2 % en relación al suelo natural), no valía la pena continuar con las proporciones de 0.5 % y 0.75 % a pesar de que en la proporción de 0.5 % se encontraba el incremento mayor, pues no había manera de que superara las anteriores longitudes y proporciones.
- Se evidencia notablemente que al adicionar fibras de geotextil a una arena arcillosa, la cohesión no presenta un comportamiento lógico y analizable, pues no manifiesta una tendencia única.
- La capacidad portante de un suelo es directamente proporcional a sus parámetros de resistencia al corte: ángulo de fricción interna (Φ) y cohesión (C), y de la profundidad y ancho de la cimentación. La siguiente es la ecuación general de la capacidad portante:

$$q_{\acute{u}lt} = cN_c + \bar{q}N_q + \frac{\gamma B}{2} N_\gamma$$

Dónde:

- C = Cohesión.
- γ = Peso específico del suelo.
- B = Ancho de cimentación.
- \bar{q} = Presión de sobrecarga ($\gamma \times D$).
- D = Profundidad de cimentación.
- N_c , N_q y N_γ = Factores de capacidad portante.

La manera de calcular N_c , N_q y N_γ es característica de cada método de análisis (Terzaghi, Meyerhof, Balla, Hasen, etc), estos factores son calculados en base al ángulo de fricción interna del suelo (Φ), haciendo que varíen exponencialmente, por lo tanto este trabajo de grado arroja valiosos resultados a favor de la capacidad de soporte ya que aumentó este parámetro, a pesar de que la cohesión no es muy favorecida. En base a lo anterior, es preferible tener un aumento significativo en el ángulo de fricción interna, así la cohesión disminuya.

Para el caso de este trabajo de grado, se tiene que para la longitud y proporción óptimas, 2cm y 0.5%, el ángulo de fricción interna aumento en un 30.4%, y la cohesión disminuyó en un 37.5%.

9. RECOMENDACIONES

- Para efectos de optimizar el trabajo, se recomienda tamizar el suelo y empacarlo con el peso y la cantidad de geotextil requerida en bolsas resistentes, para su posterior uso.
- Para lograr una mezcla homogénea del suelo y las fibras de geotextil, se recomienda mezclar inicialmente el suelo con el geotextil, y posteriormente adicionar el agua requerida.
- Para mantener la humedad óptima durante todo el proceso de preparación (compactación, extracción, remoldeo de muestra) y ejecución del ensayo, se recomienda para su cálculo, aumentar en un 0.5 % a 1% esta humedad, evitando así que se pierda.
- Para obtener la humedad óptima del suelo durante la ejecución del ensayo de corte directo, se recomienda adicionar el agua con ayuda de un rociador, logrando así una menor pérdida de ésta y una mayor distribución con el suelo. Se debe adicionar en varios turnos, para ir mezclando de vez en cuando. Se aconseja revolver con palustres, evitando el uso de las manos.
- Adquirir nuevos moldes para extracción de muestras de corte directo, debido a que algunos se encuentran en mal estado (doblados, partidos), favoreciendo así al fallo de la muestra antes del ensayo.
- Para la extracción de las muestras de corte directo, se recomienda engrasar los moldes y usar la máquina extractora de muestras, debido a su eficiencia y eficacia, a diferencia de la máquina de compresión, que retrasa el proceso.
- En el momento de la extracción de las muestras de corte directo, se debe asegurar que la superficie de trabajo está lo más nivelada posible, con el fin de evitar que se desvíe de la trayectoria y se cause una posible falla en esta.
- Al extraer las muestras para corte directo del molde de compactación, se recomienda envolverlas en bolsas plásticas junto a paños húmedos y en lo posible en un recipiente (cava) para que se mantenga la humedad en lo posible. Esto debido a la falta de un cuarto húmedo.
- Al pasar las muestras de corte con fibras de geotextil a la caja de corte directo, se recomienda recortar las fibras sobrantes, favoreciendo el traspaso de la una a la otra, evitando que se fracturen y fallen.

- Para cada punto del ensayo de corte directo, se recomienda sacar 2 humedades, para con estas, sacar un promedio y así evitar errores o desfases mayores al llegar a la humedad óptima.
- Investigar qué tanto es posible reutilizar el suelo con el geotextil adicionado, para llevar a cabo los mismos ensayos u otros, eliminando el material ya fallado, con el fin de no desperdiciar material.
- Adquirir la máquina pseudoneumática de corte directo, que controle automáticamente los esfuerzos normales que se deseen aplicar, favoreciendo la ejecución del ensayo mismo.
- Ejecutar este trabajo de grado variando el ensayo de corte directo con el ensayo triaxial, puesto que estos agregan la presión de confinamiento que mejora la precisión del cálculo de los parámetros de resistencia al corte de los suelos.
- Llevar a cabo más investigaciones de este tipo. Utilizando diferentes suelos con ángulos de fricción interna bajos, adicionándoles diferentes tipos de geotextil, en diferentes longitudes y proporciones, y diferentes tipos de materiales como la viruta de acero, fibras de tela, fibras de carbono, entre otros.
- Llevar a cabo investigaciones que midan el comportamiento de morteros, concreto, adoquines o materiales de mampostería con la adición de fibras de geotextil.
- Como limitación de este trabajo de grado es que el estudio es válido únicamente para muestras cuya área sea de 6 x 6 cm, dado que son las dimensiones de la cámara de corte directo.
- La extensión o prolongación de este trabajo de grado es determinar un factor de escala para taludes, para subrasantes arcillosas entre otras, de tal manera que este factor, proporcione la longitud y proporción óptima en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- ACOSTA REYES, Mónica Cecilia. BELLESTEROS FUENTES, José Julián. Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibra de vidrio. Bucaramanga, 2005, p. 47. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil.
- BARAJAS LOZANO, Herik Yeison. VANEGAS BARRERA, Germán Alexander. Estudio del comportamiento de los suelos arcillosos después de la adición de fibra de geotextil tejido T-1700. Bucaramanga, 2008, 66 p. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.
- BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. 213 p.
- BRAJA M., Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5 ed. México. Editorial Thomson. 2006. 742 p.
- CERRO BECERRA, Sergio Andrés y OVIEDO DIAZ, Yesica Alayx. Análisis del comportamiento de los suelos finos en el aparato de corte directo después de la adición de fibras naturales. Bucaramanga, 2004, p. 60. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.
- COLOMBIA, INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo. Bogotá D.C. 2007. 10 p.
- CRESPO V., Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. 4 ed. México. Editorial Limusa Noriega Editores. 1999. 639 p.
- DEPARTAMENTO DE INGENIERIA. Manual de diseño de geotextiles. PAVCO, 6 ed. Colombia. Septiembre de 2003. 9 p.
- GRUPO SITSA. “Materiales Geosintéticos” [En línea] <<http://www.tuberias.mx/geosinteticos.html>> Consultado [11/07/12].
- JIMENEZ S., José A. Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería. Madrid. Editorial Dossat. 1954. 533 p.
- JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa Noriega Editores, tomo 1, 2000. 642 p.
- SANTOS REY, Johanna Paola. TORRES SERRANO, Tania Cardina. Estudio del comportamiento de los suelos finos después de la adición de fibras artificiales.

Bucaramanga, 2005, p. 44. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Civil.

TRIANA RODRIGUEZ, Carlos Alfonso. VILLAMIZAR DUARTE, Diego Armando. Estudio del comportamiento de suelos arcillosos después de la adición de geotextil tejido T-2400. Bucaramanga, 2010, 62 p. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO. "Clasificación de suelos". [En línea].

<http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf> Consultado [21/07/12]