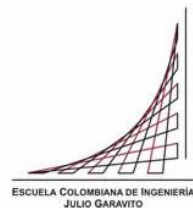


**Maestría en Ingeniería Civil**

**Modelación física en centrífuga geotécnica de un terraplén que reposa en un suelo blando mejorado con columnas de suelo-cemento**

**Yulieth Paola Bueno Agudelo**

**Bogotá, D.C., 15 de diciembre de 2023**



**Modelación física en centrífuga geotécnica de un terraplén que reposa en un suelo blando mejorado con columnas de suelo-cemento**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Geotecnia**

**Director**

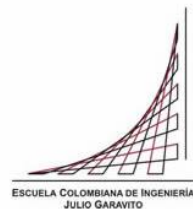
**PhD. Lina Ximena Garzón Ávila**

**Jurado**

**Ph.D Catalina Lozada López**

**Ing. José Vicente Amórtegui Gil**

**Bogotá, D.C., 15 de diciembre de 2023**



La tesis de maestría titulada “Modelación física en centrífuga geotécnica de un terraplén que reposa en un suelo blando mejorado con columnas de suelo-cemento”, presentada por Yulieth Paola Bueno Agudelo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Lina Ximena Garzón Ávila

Jurado

Catalina Lozada López

Jurado

José Vicente Amórtegui Gil

Bogotá, D.C., día de mes de año ( \_\_\_\_\_ )

## **Dedicatoria**

A mi amada familia, fuente inagotable de apoyo, amor y aliento. Sin ustedes, este logro habría sido inalcanzable. Este camino no ha sido fácil, pero cada desafío ha sido una oportunidad para crecer y aprender. Agradezco el valor que encontré en ustedes para persistir cuando los caminos se tornaron difíciles.

## **Agradecimientos**

A Dios, por haber encontrado en su palabra la fortaleza y el valor necesario para afrontar con valentía cada obstáculo.

A mi directora de proyecto, Lina Ximena Garzón, por su guía experta, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso de investigación. Su apoyo fue fundamental para enfocar mis ideas y desarrollar este trabajo.

También quiero reconocer la labor de todos los profesores y personal del programa de maestría. Sus conocimientos y enseñanzas me otorgaron una base sólida para abordar los desafíos académicos con confianza.

Al personal del Laboratorio de Suelos, quienes brindaron de forma permanente acompañamiento a las actividades experimentales de esta investigación.

## Resumen

Este trabajo investigativo centra sus análisis en la mejora de las propiedades ingenieriles de un suelo blando fabricado en el laboratorio, a partir de la mezcla de caolín (70%) y bentonita (30%) bajo un esfuerzo de consolidación de 25 kPa sobre el cual se soporta un terraplén de 3.5m de alto. La técnica de mejora utilizada en los análisis corresponde al tipo de *Soil Mixing* empleando columnas de suelo-cemento de 6.5 m de longitud, 0.6 m y 1.0 m de diámetro (medidas en el prototipo), y una separación centro a centro del orden de 2D, 3D y 4D. Siendo el objetivo principal de esta tesis comprobar la efectividad de este método de mejoramiento del suelo mediante la utilización de una centrífuga geotécnica para simular condiciones reales de campo.

Inicialmente, se proyectó la construcción de terraplenes con ángulos de inclinación de 34° y 45°. Esto con el fin de reproducir en el laboratorio la configuración geométrica de este tipo de estructuras con respecto a las construidas en campo. Sin embargo, los resultados de los vuelos realizados en los modelos con un suelo de fundación sin mejora no fueron concluyentes ni representativos para terraplenes con 45° de inclinación. Debido a lo anterior, los prototipos propuestos y estudiados en esta tesis se realizaron para terraplenes con una inclinación de 34°.

Los trabajos de laboratorio consideraron los factores más relevantes que gobiernan el desarrollo de la resistencia en las mezclas de suelo cemento, tales como la dosificación del aglutinante, el tiempo de curado y la relación a/c. Para ello, se propusieron cinco diseños de mezclas y conforme a los resultados obtenidos, se optó por un mejoramiento con mezclas de suelo-cemento de resistencias bajas, es decir, menores a 1.5 MPa. Con esto se evita que la velocidad de perforación y de rotación, así como la presión de inyección, no afecten el desarrollo de la resistencia de la lechada.

En conclusión, la modelación física en centrífuga geotécnica proporcionó una valiosa herramienta para evaluar la efectividad en la estabilidad de terraplenes de 34° de inclinación, a partir de la inclusión de columnas de suelo-cemento de 0.6 m de diámetro, separadas centro a centro 2D, y distribuidas de forma homogénea tanto en el cuerpo como en el talud del terraplén logrando con ello la mejora de la rigidez del suelo de fundación y la reducción de asentamientos.

Palabras claves: columnas de suelo-cemento, suelos compresibles, relación agua-cemento, centrífuga geotécnica, *soil mixing*.

## Tabla de contenido

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Justificación y problema</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Árbol del problema</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>17</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>18</b>
<b>4.1</b>	<b>Soil mixing</b>	<b>19</b>
4.1.1	Métodos de mezclado en el <i>soil mixing</i>	20
4.1.2	Control de calidad del <i>soil mixing</i>	22
4.1.3	Ventajas del <i>soil mixing</i>	24
4.1.4	Desventajas del <i>soil mixing</i>	24
<b>4.2</b>	<b>Casos de estudio de utilización del <i>soil mixing</i></b>	<b>25</b>
4.2.1	Modelos físicos a escala real y reducida utilizando como material aglutinante cemento.	25
4.2.2	Modelos físicos en centrífuga geotécnica de mezclas profundas	27
4.2.3	Modelos físicos en centrífuga geotécnica de mezclas profundas utilizando columnas rígidas.	31
<b>4.3</b>	<b>Principios de la modelación física en centrífuga geotécnica</b>	<b>32</b>
4.3.1	Leyes de escala para modelos lineales	33
<b>4.4</b>	<b>Análisis de imágenes mediante PIV</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Revisión bibliográfica</b>	<b>37</b>
<b>5.2</b>	<b>Configuración geométrica de los modelos</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Caracterización de las propiedades de los materiales de construcción de los modelos</b>	<b>40</b>
5.3.1	Suelo de fundación sin mejoramiento	42
5.3.2	Lechada de suelo cemento	45
5.3.3	Suelo del terraplén	48
5.3.4	Suelo mejorado con columnas de suelo cemento	51
<b>5.4</b>	<b>Preparación y ensayo de los modelos sin mejoramiento en la centrífuga geotécnica</b>	<b>55</b>
5.4.1	Preparación modelos sin mejoramiento	55
5.4.2	Vuelo en la centrifuga geotécnica.	57
<b>5.5</b>	<b>Preparación y ensayo de los modelos con mejoramiento</b>	<b>59</b>
5.5.1	Modelo D= 0.6m , S= 2D y terraplén con ángulo de inclinación de 34°.	59
5.5.2	Modelo D= 1.0 m, S= 2D y terraplén con ángulo de inclinación de 34°	63
5.5.3	Modelo D= 0.6 m, separación S= 3D y un ángulo de inclinación del terraplén de 34°.	66
5.5.4	Modelo D= 0.6 m, separación S= 4D y un ángulo de inclinación del terraplén de 34°.	70

5.5.5 Modelos complementarios para el suelo de fundación con mejora	73
<b>6 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>80</b>
<b>6.1 Condiciones de drenaje en ensayos de resistencia, CD</b>	<b>80</b>
<b>6.2 Cálculo del área tratada para el suelo de fundación mejorado</b>	<b>82</b>
<b>6.3 Cálculo de asentamientos teóricos</b>	<b>84</b>
6.3.1 Asentamientos en el suelo sin mejora	84
6.3.2 Asentamientos en el suelo mejorado	85
<b>6.4 Análisis de imágenes modelos sin mejora y con mejora</b>	<b>86</b>
6.4.1 Suelo de fundación sin mejora	87
6.4.2 Suelo de fundación mejorado con $S= 2D$	89
6.4.3 Suelo de fundación mejorado con $S= 3D$	89
6.4.4 Suelo de fundación mejorado con $S= 4D$	89
<b>7 CONCLUSIONES</b>	<b>96</b>
<b>8 RECOMENDACIONES</b>	<b>98</b>



## Índice de tablas

Tabla 1. Factores de escala en la modelación centrífuga .....	34
Tabla 2. Dimensiones de los modelos en centrífuga geotécnica .....	37
Tabla 3. Dosificación para fabricación del suelo de fundación.....	42
Tabla 4. Parámetros de compresibilidad suelo de fundación.....	43
Tabla 5. Resultado de la resistencia al corte no drenado en ensayo de compresión inconfiada para el suelo de fundación sin mejora.....	45
Tabla 6. Dosificaciones propuestas para la lechada de suelo cemento.....	46
Tabla 7. Resultado de resistencia a la compresión de las mezclas de suelo cemento .....	47
Tabla 8. Resultados ensayos de laboratorio material para terraplén .....	49
Tabla 9. Resultados resistencia al corte no drenada para caracterización de suelo de fundación mejorado con columnas de suelo cemento .....	53
Tabla 10. Comparativa de ensayos de corte directo y triaxial en investigaciones previas .....	81
Tabla 11. Cálculo de área tratada para modelos con $D=0.6m$ y $S=2D$ , $S=3D$ , $S=4D$ .....	83
Tabla 12. Asentamientos teóricos del suelo mejorado .....	86
Tabla 13. Información de modelos seleccionados para el análisis de imágenes .....	87
Tabla 14. Desplazamiento máximo y cálculo del factor de reducción de asentamientos.....	93
Tabla 15. Desplazamientos teóricos y con análisis de imágenes para el suelo de fundación .....	94

## Índice de figuras

Figura 1. Árbol del problema .....	16
Figura 2. Columna de soporte de terraplén y plataforma de transferencia de carga .....	19
Figura 3. Proceso constructivo Soil Mixing .....	21
Figura 4. Diagrama de flujo para la estimación de procedimientos QA/QC en mezclas de suelo-cemento .....	23
Figura 5. Geometría de elementos empleando soil mixing .....	24
Figura 6. Falla por volteo de las columnas de suelo-cemento .....	27
Figura 7. En a) máquina de modelo de mezcla profunda de dos ejes, en b) máquina de modelo de mezcla profunda de un eje .....	28
Figura 8. Grietas en rejilla de suelo cemento .....	29
Figura 9. Modelo de suelo sin mejorar .....	29
Figura 10. Modelo de suelo reforzado con columnas de suelo cemento. Distribución en planta de columnas bajo el terraplén. ....	30
Figura 11. Superficies de falla en modelo de suelo sin mejora .....	30
Figura 12 Superficies de falla en el modelo de suelo mejorado con columnas de suelo-cemento..	31
Figura 13. Modelo en centrífuga de terraplén estabilizado mediante columnas rígidas.....	32
Figura 14. Centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería .....	35
Figura 15. En a) modelo físico de suelo homogéneo sin mejora con ángulo de $45^\circ$ y en b) modelo físico de suelo homogéneo sin mejora con ángulo de $34^\circ$ .....	38

Figura 16. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 0.6 m en el prototipo .....	38
Figura 17. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 1 m en el prototipo .....	39
Figura 18. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 1.4 m en el prototipo .....	39
Figura 19. Sección transversal de columnas de suelo cemento a) diámetro 0.6 m, b) diámetro 1.0m y c) diámetro 1.4 m en el prototipo y un terraplén con ángulo de inclinación de 34° .....	40
Figura 20. Diagrama de flujo para el desarrollo de la etapa experimental .....	41
Figura 21. Curva de compresibilidad para caracterización del suelo de fundación.....	43
Figura 22. Ensayo gravedad específica, Gs. Suelo de fundación .....	44
Figura 23. Gráfica de esfuerzo Vs. Deformación unitaria en ensayo de compresión inconfiada para el suelo de fundación .....	44
Figura 24. Falla de la muestra en ensayo de compresión inconfiada .....	45
Figura 25. Ensayo de fluidez para la mezcla N°4 de suelo cemento.....	46
Figura 26. Ensayo de resistencia a la compresión a los siete días para la mezcla N°2 de suelo cemento .....	47
Figura 27. Resistencia a la compresión Vs. Relación suelo / cemento de los diseños de mezcla ...	48
Figura 28. Ensayo de corte directo, CD, para muestra M1 con un esfuerzo vertical de 80 kPa .....	50
Figura 29. Gráfica de esfuerzo cortante Vs. Deformación tangencial en ensayo de corte, CD, para terraplén.....	50
Figura 30. Gráfica de esfuerzo normal Vs. Esfuerzo cortante para ensayo de corte, CD, para terraplén.....	50
Figura 31. Implantación de columnas de suelo cemento para ensayo de compresión inconfiada. En a) separación S= 2D. En b) separación S= 3D y en c) separación S= 4D.....	51
Figura 32. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación S= 2D .....	52
Figura 33. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M2 con separación S= 2D .....	52
Figura 34. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación S= 3D .....	52
Figura 35. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación S= 4D .....	53
Figura 36. Gráfica de resultados de ensayos de compresión inconfiada vs. Separación entre centros de columnas .....	53
Figura 37. Preparación de muestra para ensayo de corte directo, Cu.....	54
Figura 38. Gráfica de esfuerzo cortante Vs. Deformación tangencial en ensayo de corte, Cu, para suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro .....	55
Figura 39. Gráfica de esfuerzo normal Vs. Esfuerzo cortante para ensayo de corte, Cu, para suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro.....	55
Figura 40. En a) características de la caja de la centrífuga geotécnica con extensiones, en b) dimensiones de la caja de la centrífuga geotécnica sin extensiones .....	56

Figura 41. Conformación geométrica del terraplén en el prototipo en a) 34° de inclinación y en b) 45° de inclinación.....	57
Figura 42. Modelo de terraplén con ángulo de inclinación de 34° en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo en centrífuga geotécnica.....	58
Figura 43. Modelo de terraplén con ángulo de inclinación de 45° en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo en centrífuga geotécnica.....	58
Figura 44. Ensayo con miniveleta en a) modelo de terraplén con ángulo de inclinación de 34°, en b) modelo de terraplén con ángulo de inclinación de 45°.....	59
Figura 45. Perforación de columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro, S=2D.....	60
Figura 46. En a) Inyección de lechada de suelo cemento para columnas de 0.6m de diámetro, S=2D, en b) ensanchamiento del suelo de fundación.....	61
Figura 47. Modelo de columnas de suelo cemento de D=0.6m, S= 2D en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo. ....	61
Figura 48. Auscultación de las columnas en el modelo de D=0.6m , S= 2D después del vuelo en centrífuga geotécnica.....	63
Figura 49. Perforación y construcción de columnas de suelo cemento de 1.0 m de diámetro, S=2D .....	64
Figura 50. modelo de columnas de suelo cemento de D=1.0m, S= 2D en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo .....	65
Figura 51. Auscultación de columnas de suelo cemento de D= 1.0m y S= 2D .....	65
Figura 52. Reducción del diámetro efectivo de columnas de suelo cemento D= 1.0m y S= 2D ....	66
Figura 53. Perforación y construcción de columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y S= 3D .....	67
Figura 54. Modelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y S= 3D. en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo, en c) zoom de la superficie de falla presentada. ....	68
Figura 55. Lámina de agua en la superficie del modelo de suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y S= 3D posterior al vuelo. ....	69
Figura 56. Ensayo de resistencia al corte no drenado con miniveleta sobre el suelo de fundación sin mejora en el área de berma del modelo con D=0.6m y S= 3D. ....	69
Figura 57. Fractura en columnas de suelo cemento en modelo con D=0.6m y S= 3D.....	70
Figura 58. Implantación, perforación y construcción de columnas de suelo cemento en modelo con D=0.6m y S= 4D, .....	71
Figura 59. Modelo de suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y S= 4D. en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo. ....	72
Figura 60. En a) falla por cortante en columna de suelo-cemento a 1/3H y 2/3H, en b) ensanchamiento del diámetro de columna de suelo-cemento a profundidad .....	73
Figura 61. Construcción de columnas de suelo cemento de D= 0.6m, S= 2D en el cuerpo del terraplén.....	74
Figura 62. Modelo con columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S= 2D distribuidas en el cuerpo del terraplén antes del vuelo, en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo. Fuente: elaboración propia .....	75

Figura 63. En a) continuidad de la columna y en b) inclinación de la columna para el modelo D=0.6m, S=2D y columnas bajo el cuerpo del terraplén. ....	75
Figura 64. Construcción de columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S= 3D distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud.....	77
Figura 65. Inicio de curado de las columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S= 3D distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud. ....	77
Figura 66. Modelo con columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S= 3D distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud, en a) antes del vuelo, b) después del vuelo y c) zoom de la superficie de falla presentada. ....	78
Figura 67. En a) Estado de las pantallas, en b) estado de las columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S= 3D distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud después del vuelo.....	79
Figura 68. En a) área de tratamiento del 17.7% y en b) con un área de tratada del 13.3%, y en c) muestra de suelo mejorado con columnas de grava para ensayo de corte CU.....	81
Figura 69. Representación gráfica del área tratada del suelo a través de columnas de suelo cemento en malla cuadrada.....	83
Figura 70. Determinación del área tratada para un modelo con S=3D.....	83
Figura 71. Análisis de imágenes modelo sin mejora en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrífuga geotécnica, c) desplazamiento vertical ...	88
Figura 72. Modelo 3. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=2D en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrífuga geotécnica, c) desplazamientos resultantes, Fuente: elaboración propia .....	91
Figura 73. Modelo 5. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=3D en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrífuga geotécnica, c) desplazamientos resultantes. Fuente: elaboración propia .....	91
Figura 74. Modelo 6. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=4D en a) vectores de desplazamiento, en b) desplazamientos resultantes y en c) superposición de vectores en el modelo de la centrífuga geotécnica. Fuente: elaboración propia.....	91
Figura 75. Vectores de desplazamiento verticales en a) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=2D en b) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=3D y c) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=4D.....	92
Figura 76. Desplazamientos máximos obtenido con análisis de imágenes .....	94
Figura 77. Desplazamientos teóricos y obtenido con análisis de imágenes para el suelo de fundación .....	94

## 1 Introducción

El uso de columnas de suelo-cemento como técnica de mejora de suelos blandos, ha demostrado ser efectivo en diferentes proyectos de ingeniería. Estas columnas, fabricadas mediante el proceso de *Soil Mixing*, consisten en la mezcla de suelo blando con cemento para aumentar su resistencia y rigidez, mejorando así la capacidad portante del terreno.

Utilizando la modelación física en la centrífuga geotécnica y el análisis de imágenes mediante MATLAB, este estudio evaluó la influencia de la separación entre columnas de suelo cemento en la estabilidad de un terraplén con un ángulo de inclinación de  $34^\circ$  y 3.5 m de altura. Para esto, los modelos construidos contemplaron separaciones entre centros de columnas de 2D, 3D y 4D. Para cada separación se evaluó además el factor de reducción de asentamientos, y el área de tratamiento, las cuales variaron entre 39% y 7% para separaciones 2D y 4D respectivamente.

Previo a la construcción de los modelos, se llevó a cabo la caracterización de los materiales correspondientes al suelo de fundación, la lechada suelo-cemento y el terraplén. Específicamente para la lechada se adoptó una relación a/c de 1.0 y un tiempo de curado de 7 días. El desarrollo de la resistencia de las columnas, es dependiente de varios factores, pero principalmente de la presión de inyección y la velocidad del mezclado. No obstante, de acuerdo con investigaciones anteriores, estos factores pueden no afectar de forma significativa la resistencia final, siempre que la resistencia de diseño sea inferior a 1.5 MPa. En razón de lo anterior, la resistencia de diseño utilizada en estos análisis fue de 1.28 MPa.

Así las cosas, esta tesis tiene como objetivo principal proporcionar una evaluación detallada de la técnica de *Soil Mixing* mediante la modelación física en centrífuga geotécnica para una tipología específica de terraplén, en donde los resultados y conclusiones de esta investigación brindan soluciones muy aproximadas y relacionadas con el mejoramiento de las propiedades de resistencia y de compresibilidad en suelos blandos.

## **2 Problema de investigación**

### **2.1 Justificación y problema**

La baja capacidad portante o los grandes asentamientos esperados en el suelo, suelen ser los problemas más comunes a resolver en la cimentación de obras, principalmente de infraestructura vial. Las técnicas de mejoramiento del subsuelo se presentan como herramientas importantes para abordar estos problemas, ya que permiten incrementar la densidad, la capacidad de carga del suelo y la resistencia al corte. Además, aceleran el proceso de consolidación, controlan las deformaciones y transfieren las cargas a un suelo de fundación más competente.

A nivel local, la inversión en proyectos públicos relacionados con la infraestructura vial depende de rubros presupuestales limitados. Esta situación requiere la ejecución de estudios y diseños optimizados con los cuales sea posible satisfacer las hipótesis de diseño. Sin embargo, desde un punto de vista subjetivo, la "optimización" puede llevar a subestimar el comportamiento del suelo y, por consiguiente, reducir el período de servicio de las vías. Por lo tanto, contemplar el uso de técnicas de mejora y definir con propiedad su eficiencia en las diferentes obras de ingeniería se convierte en un desafío para la contratación pública.

Ahora bien, las técnicas de mejoramiento para suelos blandos relacionadas con mezclas de suelo a profundidad son relativamente recientes. Una breve contextualización permite establecer que los primeros estudios se realizaron hacia 1967 de manera simultánea en Suecia y Japón, países en los cuales se efectuó una mezcla de suelo y cal viva. En Japón, además, se desarrolló el método húmedo, en el cual el material aglutinante, cemento, se mezcla con agua e inyecta en forma de lechada. Posteriormente, en los años ochenta, se llevaron a cabo numerosas investigaciones en campo y laboratorio, popularizando rápidamente esta técnica. Tanto es así que en la actualidad existen diversas compañías que han desarrollado procesos de mezcla exclusivos, lo que ha dado lugar a diversas técnicas de instalación (Larson, 2003).

No obstante, es importante considerar que los ensayos de campo para la validación de la técnica de mejora suelen tener un costo elevado y requieren un tiempo considerable. Además, la realización de un gran número de ensayos in situ puede resultar poco realista y representar una limitación económica para un proyecto (Chen & Lee, 2012).

En este sentido, la utilización de la modelación física en centrífuga geotécnica se erige como una herramienta poderosa para validar el comportamiento y la uniformidad de la mezcla. No obstante, es responsabilidad del ingeniero geotécnico analizar la calidad de los datos obtenidos y contrastar, en cada caso, su correspondencia con el problema evaluado. Esto implica considerar las diversas alteraciones que puedan surgir en el proceso (Caicedo, 2003).

En síntesis, en la actualidad, las modelaciones físicas realizadas en centrífuga geotécnica en relación con el mejoramiento del suelo mediante columnas de suelo cemento son escasas en trabajos de investigación a nivel de maestría o doctorado. Esto podría deberse a una combinación de factores técnicos, económicos, de conocimiento y de enfoque. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, esta tesis aborda un enfoque investigativo y experimental que permitirá dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Se mejora la estabilidad de un terraplén cuando el suelo de fundación sobre el cual se soporta es reforzado con columnas de suelo cemento?

## **2.2 Árbol del problema**

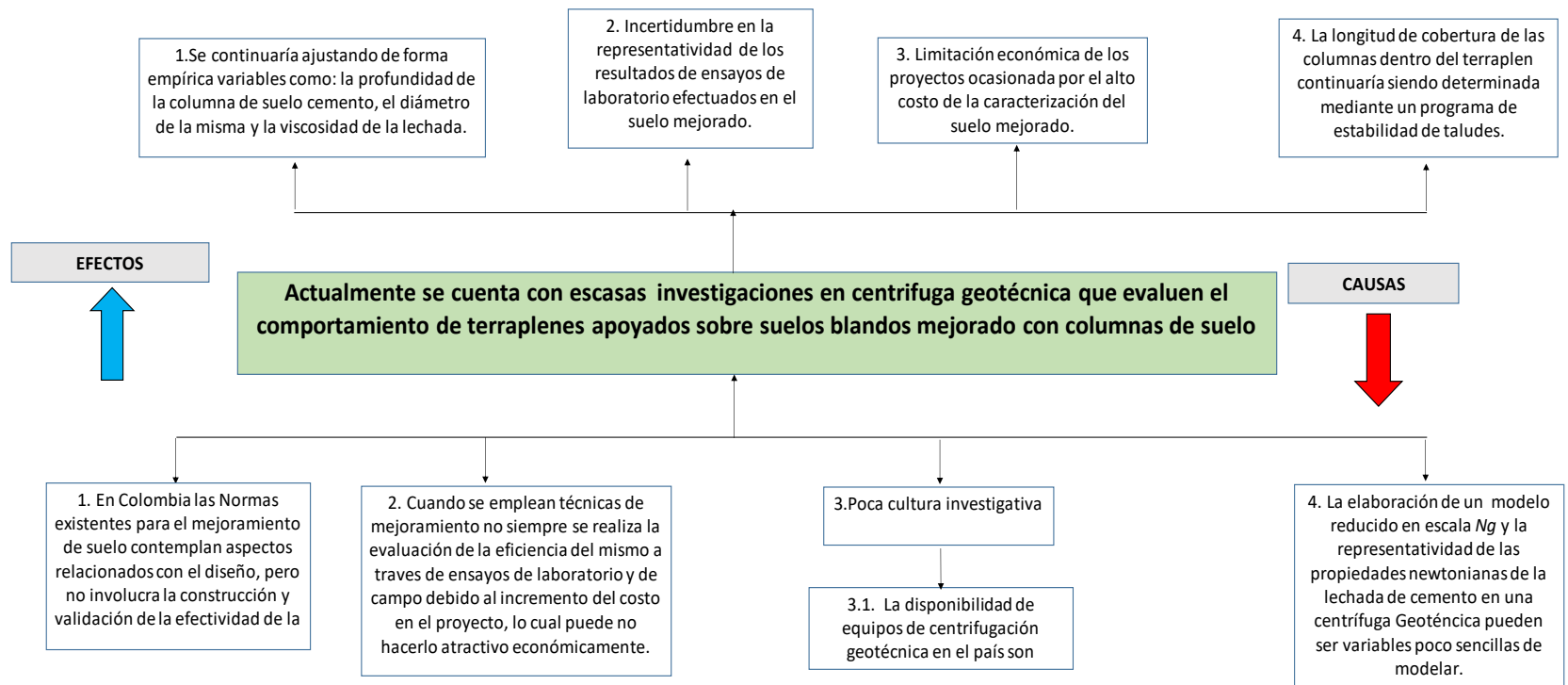


Figura 1. Árbol del problema  
Fuente: Elaboración propia



## **3 Objetivos**

### **3.1 Objetivo general**

Estudiar a través de la modelación física en centrífuga geotécnica, el efecto en la estabilidad de un terraplén cuando este se encuentra construido sobre un suelo blando mejorado con columnas de suelo cemento.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Determinar, mediante ensayos de laboratorio los parámetros de compresibilidad y resistencia del suelo de fundación sin mejora y con mejora, para evaluar el efecto de las columnas suelo cemento.
- Determinar, a través de diversos diseños de mezclas en condiciones de laboratorio, la dosificación óptima del aglutinante necesaria para alcanzar la resistencia de diseño de la lechada utilizada en la construcción de columnas de suelo cemento.
- Establecer la incidencia de la separación de las columnas suelo-cemento en la estabilidad de un terraplén con un ángulo de inclinación de  $34^\circ$  a través del análisis de imágenes de las superficies de falla utilizando velocimetría de análisis de partículas (PIV).

## 4 Marco teórico

El emplazamiento de terraplenes sobre suelos blandos de bajas características portantes y alta compresibilidad genera incrementos de esfuerzos importantes. Esto se ve reflejado en asentamientos excesivos y la modificación del comportamiento de terraplén, que además de afectar el confort en cuanto a transitabilidad se refiere, puede ocasionar impactos significativos en el sistema de movilidad. Lo anterior, genera: aumento en el costo de los proyectos derivado de nuevos estudios y diseños, deterioro de vías alternas no diseñadas para resistir el aumento de cargas dinámicas debido al tráfico, entre otras. De allí, la necesidad de implementar técnicas de mejora del suelo.

La baja capacidad portante y los grandes asentamientos esperados en el suelo son problemas comunes que suelen enfrentarse en la cimentación de obras, principalmente en infraestructura vial. Por lo anterior, el uso de técnicas de mejoramiento del subsuelo se convierte en una herramienta para abordar estos problemas, ya que permite incrementar la densidad, la capacidad de carga del suelo y la resistencia al corte. Además, acelera el proceso de consolidación, controla deformaciones y transfiere las cargas a un suelo de fundación más competente.

La selección de la técnica de mejora a utilizar depende en gran medida de la identificación clara del suelo a tratar, la profundidad de mejora requerida y los costos del proyecto. Existen varias técnicas para la mejora de suelos, que se pueden categorizar principalmente en tres tipos: mejoramiento físico, que implica precarga, drenes verticales, columnas y mezcla de suelo; mejoramiento mecánico, que incluye la compactación, vibrocompactación y compactación dinámica; y mejoramiento químico, que comprende el grouting en roca y en suelo, y el *soil mixing*.

En Colombia, el Instituto Nacional de Vías, en su Manual para el diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras, establece las pautas para el diseño de diversas técnicas de mejoramiento del suelo. Sin embargo, no se detallan los controles de calidad que deben llevarse a cabo después de la aplicación de la técnica de mejora para validar su efectividad. En el caso del mejoramiento de suelos mediante métodos físicos, se contempla el uso de columnas de soporte de terraplén, ya sea en hormigón o acero, junto con una plataforma de transferencia de carga que emplea refuerzos con geosintéticos o concreto, como se muestra en la Figura 2. Esto garantiza la transferencia de carga a un estrato competente (INVIA, 2012).

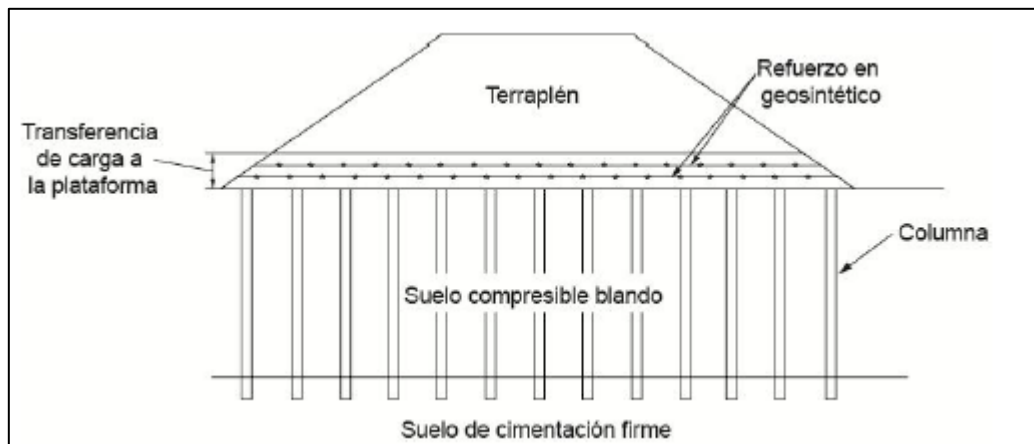


Figura 2. Columna de soporte de terraplén y plataforma de transferencia de carga  
Fuente: INVIAS (2012)

La información presentada en este capítulo se enfoca en el uso, ventajas, desventajas del *soil mixing* como técnica de mejora para suelos blandos. Además, de abordar estudios realizados por diferentes investigadores en este ámbito.

#### 4.1 Soil mixing

La técnica de mejoramiento conocida como *soil mixing* surgió en Estados Unidos en 1950, y posteriormente fue extendida y desarrollada en Japón y Suecia en 1970 (Fang et al., 2001). Fecha a partir de la cual, se empieza a mencionar en documentos técnicos. Las diferentes investigaciones en campo y laboratorio realizadas, han popularizado de forma rápida esta técnica, tanto así que actualmente existen diversas compañías que han desarrollado procesos de mezcla exclusivos, situación que ha dado lugar a diversas metodologías de instalación (Larson, 2003)

Alcanzar un aumento en la resistencia e incrementar la rigidez del suelo *in situ*, no son los únicos alcances de este método; también extiende su uso al tratamiento de suelos contaminados, por ejemplo, con lixiviados (Madhyannapu y Puppala, 2014).

El propósito principal de esta técnica es aumentar significativamente la resistencia y reducir la deformabilidad del suelo. Como resultado, se ha empleado para en el control de asentamientos de suelos, la estabilización de taludes, la mitigación de la licuefacción, la estabilización de suelos contaminados, la construcción de muros de corte de aguas subterráneas y estructuras de contención. Además, esta técnica permite el uso de columnas de diámetros que varían entre 0.4 m y 2.4 m.

El Deep Mixing (DM) lleva a cabo la incorporación de agentes aglutinantes como el cemento, la cal, la ceniza volante, entre otros. Se destaca por la construcción de columnas formadas a partir de la mezcla in situ del suelo, un agente aglutinante y, en la mayoría de los casos, agua. El diámetro de la columna dependerá del diseño y de las propiedades del suelo que se requieran mejorar, de acuerdo con las especificaciones de los proyectos en los que se utilice esta técnica. (Frikha et al., 2015). Con relación al uso de materiales cementantes, se resalta el uso de mezclas de suelo y cal para el tratamiento de suelos arcillosos en Suecia (Ryan y Jasperse, 1989).

El mejoramiento de suelos a través del *soil mixing* ha captado el interés de un número significativo de investigadores. A través de sus documentos, han evaluado, mediante ensayos de laboratorio y observación en campo, el impacto que tiene la relación agua-cemento, así como la cantidad de cemento, el tiempo de curado, la tasa de rotación utilizada en los equipos y la presión de inyección en el aumento de la resistencia a la compresión de la mezcla de suelo-cemento. Además, con dichos estudios, ha sido posible establecer una relación entre la resistencia a la compresión de la mezcla suelo-cemento desarrollada en campo y la obtenida en el laboratorio bajo condiciones controladas ( $q_f/q_{ul}$ ). El rango de variación de estas resistencias es del orden de 0.6 y 1.5 y, por supuesto, es dependiente de varios factores, entre ellos, el valor de la resistencia de diseño que se desee obtener en un proyecto determinado y el método de mezclado, es decir, húmedo o seco. En cuanto a resistencias, valores iguales o inferiores a 1.5 MPa se denominan resistencias bajas, y valores superiores a 1.5 MPa resistencias altas. (Horpbulsk et al., 2011).

Una de las ventajas de esta técnica, en comparación con otras aplicables a suelos blandos, como la precarga complementada con drenes de mecha, es la reducción de los tiempos de construcción y los costos de transporte de material de relleno. En el caso de terraplenes, la mezcla de suelo-cemento permite lograr mayores ángulos de inclinación sin comprometer los factores de seguridad necesarios para garantizar la estabilidad de los taludes. Esta ventaja se vuelve relevante cuando se consideran sobreechamientos para la colocación de señalización vertical, defensas metálicas o limitaciones prediales en un diseño.

#### **4.1.1 Métodos de mezclado en el *soil mixing***

El equipo utilizado para aplicar esta técnica de mejora consiste en un conjunto de barrenas simples o cuádruples que se acoplan a un equipo de perforación. El material estabilizante se incorpora al suelo blando o suelto mediante dos métodos: el húmedo y el método seco. Cada enfoque tiene sus

propias ventajas y aplicaciones específicas, y su elección dependerá de las condiciones del subsuelo a estabilizar y los objetivos del proyecto. La Figura 3 muestra el equipo utilizado para cada uno de los métodos antes mencionados.



Figura 3. Proceso constructivo Soil Mixing  
Fuente: Horbulsk et al. (2011)

#### 4.1.1.1 Método Húmedo

Puede ser utilizado en suelos blandos, como arcillas y limos, sin embargo, estos suelos deben tener ciertas características de humedad y plasticidad. El proceso constructivo se basa en una herramienta de mezclado que desciende desde la parte superior hacia abajo a lo largo del eje de la columna y, al mismo tiempo, realiza la perforación. En este método, la lechada se introduce mediante boquillas estratégicamente ubicadas en el extremo de la barrena. Esto garantiza que se logre una mezcla homogénea en toda la longitud del elemento. (Keller, 2019).

#### 4.1.1.2 Método Seco

Este procedimiento se aplica en suelos de consistencia que va desde blanda hasta extremadamente blanda, y que presentan contenidos de humedad elevados, como las turbas y fangos, entre otros. Debido a las propiedades de los suelos antes mencionados, se facilita la reacción química entre el material cementante adicionado en polvo y el suelo que necesita ser tratado.

La ejecución de este procedimiento comprende una etapa de perforación en la que se introduce el varillaje en el terreno, avanzando a una velocidad considerable. Una herramienta con paletas de mezclado radial, ubicada en la parte inferior de la barrena de perforación, corta el terreno y lo prepara para su posterior mezcla. Una vez alcanzada la profundidad de diseño, se bombea el

cementante con aire comprimido desde los depósitos de almacenamiento hasta el eje, donde se mezcla con el suelo

Experiencia de proveedores del mercado como Keller (2019) han permitido establecer la eficiencia de mejora de este método a profundidades que varían entre 25 m y 30m y la construcción de columnas de diámetros comprendidos entre 0.6 m y 1.20m.

#### **4.1.2 Control de calidad del *soil mixing***

Existen procedimientos normativos que regulan el diseño, el proceso constructivo y los controles de calidad del *soil mixing* para la estabilización de terraplenes. Estos procedimientos son recomendables para garantizar la efectividad de la técnica de mejora. La distribución de las columnas, las características de la lechada, ensayos de velocidad de onda y la determinación de las propiedades ingenieriles del suelo a partir de ecuaciones basadas en los resultados de la resistencia a la compresión inconfiada del suelo mejorado son algunos de los requerimientos que influyen mayormente en el éxito de la mejora. (FHWA, 2013).

Autores, como Madhyannapu R. S., Puppala, Nazarian, y Yuan (2010), han realizado estudios en los cuales, a través de la implementación de un plan de inspección y ensayos, llevan a cabo el aseguramiento de la calidad de las mezclas de suelo-cemento. Para ello, utilizan un diagrama de flujo, como se muestra en la Figura 4 para representar los procedimientos QA/QC a implementar. La interpretación de los resultados obtenidos se basó en la ejecución de los siguientes ensayos: extracción de núcleos, down-hole y análisis mineralógicos

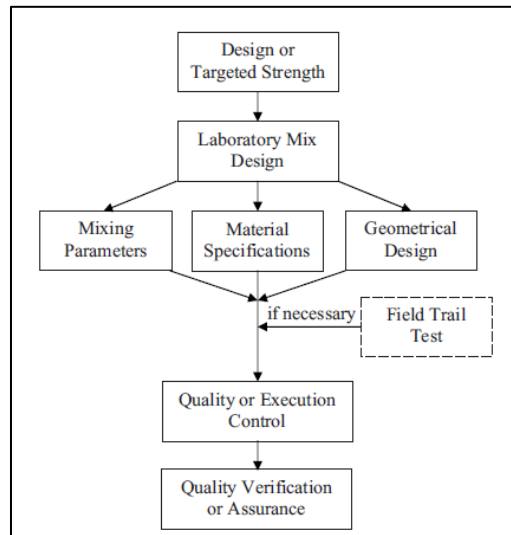


Figura 4. Diagrama de flujo para la estimación de procedimientos QA/QC en mezclas de suelo-cemento  
Fuente: Madhyannapu et al. (2010)

El programa experimental constó de muestras preparadas en el laboratorio bajo condiciones controladas y muestras en campo. Con esto, se determinó una variación de la resistencia a la compresión de las mezclas de suelo-cemento entre el 20% y el 40% entre las muestras curadas en el laboratorio y las muestras extraídas en campo, siendo estas últimas las que experimentan un menor valor. En razón de lo anterior, es válido considerar que, durante la construcción de las columnas de suelo-cemento, el personal, los equipos y los factores ambientales inciden en la eficiencia de la técnica de mejora.

Ahora bien, Para complementar lo concerniente a los controles de calidad en mezclas de suelo cemento, vale la pena considerar las recomendaciones realizadas por Keller (2019) basadas en su experiencia como proveedor.

1. Antes de comenzar la estabilización, es necesario evaluar la idoneidad del diseño de la mezcla y los materiales involucrados en el proceso.
2. Durante la construcción, se debe asegurar la verticalidad de los elementos construidos, supervisar el sistema de bombeo, controlar la presión de lodos y regular la velocidad de la herramienta de mezclado.

3. Una vez finalizada la construcción, es importante llevar a cabo instrumentación y sondeos. Si las columnas se diseñan con baja resistencia, se requiere la realización de pruebas de penetración, como modificadas y ensayos de tracción.

#### 4.1.3 Ventajas del *soil mixing*

Las ventajas de aplicar la técnica de *soil mixing* en proyectos viales, son diversas. Terratest (2020) propone entre ellas: la optimización de recursos económicos, la reducción de los plazos de construcción. Por otra parte, Fang et al. (2001) manifiesta que el *soil mixing* provee una mejora sustancial en el módulo de elasticidad promedio del conjunto suelo- Además, permite el aprovechamiento de residuos generados, ya que estos pueden ser utilizados como material de relleno en la obra, contribuyendo a la sostenibilidad del proyecto. De otro lado, la interferencia en estructuras vecinas es mínima, y la versatilidad en la configuración geométrica es notable, ya que esta técnica se adapta a diversas formas como bloques, columnas, cajones, entre otras, como se ilustra en la Figura 5.

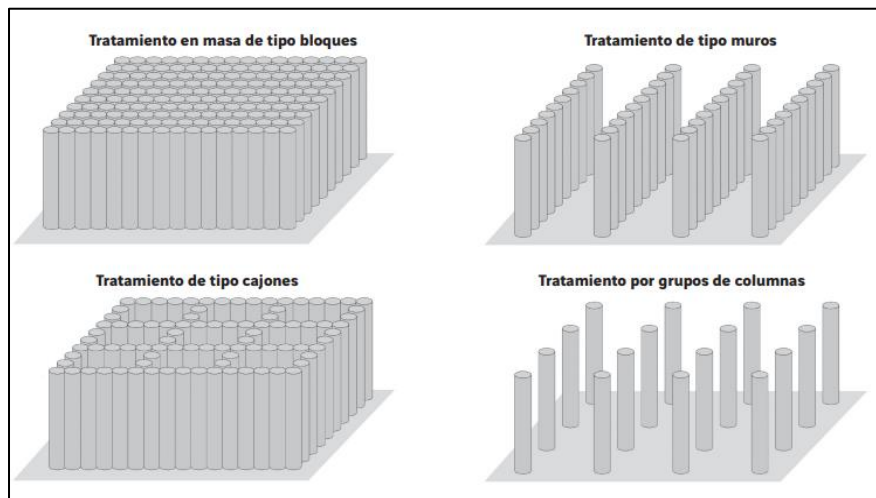


Figura 5. Geometría de elementos empleando *soil mixing*  
Fuente: Menard (2018)

#### 4.1.4 Desventajas del *soil mixing*

Debido a que esta actividad involucra el uso de maquinaria pesada y de gran tamaño, una de las limitaciones principales está relacionada con los requerimientos de espacio. Los espacios de trabajo deben ser lo suficientemente amplios para acomodar estos equipos. Además, el peso de los equipos



utilizados puede resultar problemático en suelos extremadamente débiles. Por otra parte, la aplicación de la mezcla se limita a una orientación vertical. A pesar de su costo comparativamente inferior en relación con otras técnicas de mejora, los costos de movilización de equipos pueden representar un factor significativo en el proyecto.

La profundidad de mejora está restringida y no supera los 40 metros, y no se recomienda su utilización en suelos altamente densos, rígidos o con presencia de cantos rodados. De otro lado, la geometría de los elementos construidos se encuentra limitada por el proceso de perforación.

Puede producirse una variabilidad sustancial en la resistencia del suelo tratado a diferentes profundidades.

#### **4.2 Casos de estudio de utilización del *soil mixing***

A continuación, se presentan investigaciones realizadas por varios autores que han analizado, desde el laboratorio y campo, el comportamiento y la eficacia del sistema de mejora de suelos blandos mediante la utilización de mezclas profundas, *soil mixing*:

##### **4.2.1 Modelos físicos a escala real y reducida utilizando como material aglutinante cemento.**

Ryan y Jasperse (1989) realizaron estudios centrados en las obras de estabilización de la presa del Lago Jackson en Estados Unidos, utilizando columnas de suelo-cemento como estrategia para mitigar los efectos de la licuación. Sus análisis indicaron que al reducir la relación agua-cemento y mantener constante en peso la cantidad de cemento en la mezcla, se logra un aumento notable en la resistencia a la compresión del conjunto suelo-cemento. Los ensayos de resistencia a la compresión de las muestras extraídas en campo llevaron a la conclusión de que, entre el día 6 y el día 112, la resistencia en la mezcla de suelo-cemento experimenta un incremento de aproximadamente entre un 40% y 50% del valor de diseño, aumentando de manera considerable después del día 112.

Según Andromalos et al. (2012), una relación de tratamiento del suelo en el rango del 20% al 35% ha demostrado ser eficaz para controlar de manera significativa los asentamientos excesivos en suelos blandos bajo cargas de servicio. Esta conclusión se deriva de la experiencia de campo obtenida a partir de la implementación de este sistema de mejora en diversos lugares de los Estados Unidos. Un ejemplo ilustrativo se observó en la costa sur de la isla de Oahu, Honolulu, Hawái,

donde lograron estabilizar suelos sueltos con una intervención que representó el 23% del área a mejorar. Además, en el estado de Florida, en Lakeland, se mejoró un estrato de arcilla altamente compresible y de consistencia blanda con una relación de área a tratar del 12%

De acuerdo con Zakaria et al. (2020), el período de curado desempeña un papel significativo en el desarrollo de la resistencia de la mezcla, experimentando un aumento de aproximadamente un 25% entre el día 7 y el día 28, dependiendo del contenido de cemento en kilogramos. Se establece que una relación óptima de agua/cemento corresponde a 1.0 para las mezclas preparadas en el laboratorio, según los hallazgos de esta investigación. Con relación a la reducción de los asentamientos, se determinó que la separación de las columnas es de 1.5 metros. Esta determinación se basa en la observación de pilotes con diámetros de 0.6 metros, 0.8 metros y 1.0 metro, con una longitud de 40.0 metros.

En Colombia, se han aplicado diversas técnicas de mejora del suelo en varios proyectos de ingeniería, abarcando desde obras en el sector de hidrocarburos hasta centros comerciales. A continuación, se mencionan algunos ejemplos:

**Proyecto:** centro comercial nuestro Cartago

Actividad: mejoramiento de suelos empleando columnas de agregado compactado Geopier (Centra, 2015).

**Proyecto:** tanque Bravo Petroleum. Barranquilla

Actividad: mejoramiento de suelos empleando columnas de agregado compactado Geopier (Centra, 2015).

**Proyecto:** edificio Manantial de las Garzas. Popayán

Actividad: mejoramiento de suelos empleando columnas de agregado compactado Geopier (Centra, 2015).

**Proyecto:** ampliación de la intersección de autopistas Yatí-Bodega

Actividad: mejoramiento del suelo de fundación del puente Roncador empleando drenes verticales (Menard, 2018).

**Proyecto:** intersección puente Sibaté

Actividad: mejoramiento del suelo de fundación mediante la utilización de drenes verticales y columnas de módulo controlado (Soletanche Bachy Cimas, 2021).

**Proyecto:** barreras Cerrejón- Guajira

Actividad: construcción de barreras de baja permeabilidad utilizando mezcla de suelo y bentonita (Soletanche Bachy Cimas, 2021).

#### 4.2.2 Modelos físicos en centrífuga geotécnica de mezclas profundas

Según Lee, Lee, & Dasari (2006) la eficiencia de esta técnica de mejora se ve influenciada por diversas variables que abarcan desde la densidad del suelo y la separación y diámetro de las columnas, hasta la influencia del equipamiento empleado para tal fin.

Kitazume y Maruyama (2007) realizaron un análisis exhaustivo de la estabilidad, tanto interna como externa, de las columnas de suelo-cemento. En el análisis de estabilidad interna, se identificaron tres tipos de fallas: corte, flexión y torsión. Por otro lado, en el análisis de estabilidad externa, se observó que estos elementos tienden a experimentar fallas por volcamiento. Estas conclusiones se fundamentaron en la modelación física llevada a cabo en una centrífuga geotécnica utilizando un suelo blando con un alto contenido de humedad, aproximadamente al 120%, y mejorado con columnas de suelo-cemento, las cuales, para propósitos de investigación, fueron sustituidas por tubos de acrílico.

La Figura 6 muestra el desplazamiento lateral de las columnas de suelo-cemento utilizadas en la mejora de un suelo blando.

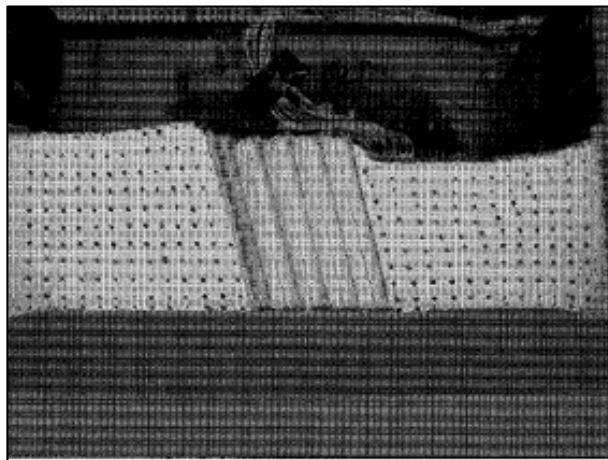


Figura 6. Falla por volteo de las columnas de suelo-cemento  
Fuente: Kitazume y Maruyama (2007)

Chen y Lee (2012) desarrollaron un modelo de mezcla de suelo en una centrífuga geotécnica, empleando una herramienta de instalación de uno y varios ejes, según se ilustra en la Figura 7, y un

sistema de muestreo en las columnas de mezcla a diferentes profundidades. El tipo de centrífuga empleada y el proceso de escalado del prototipo les permitió modelar una columna de 1.5 metros de diámetro y una longitud de 9.0 metros. Durante la investigación, se llegó a la conclusión de que la reducción de escala no representaba con precisión las fuerzas viscosas generadas por la lechada de cemento. Debido a esta limitación, se optó por emplear un trazador líquido llamado cloruro de zinc, caracterizado por tener una viscosidad menor que la lechada de cemento. Esto aseguró que las fuerzas viscosas no se vieran afectadas por la reducción de escala.

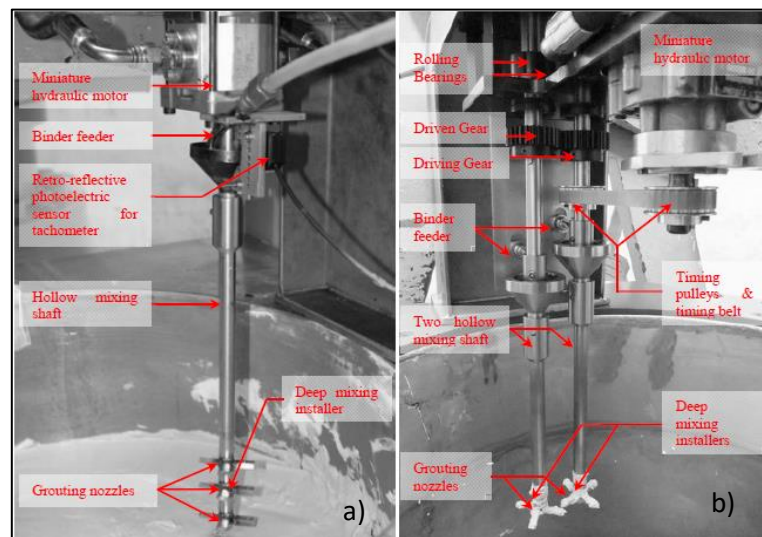


Figura 7. En a) máquina de modelo de mezcla profunda de dos ejes, en b) máquina de modelo de mezcla profunda de un eje  
Fuente: Chen y Lee (2012)

Algunos modelos físicos en centrífuga geotécnica han investigado la respuesta sísmica de suelos blandos y han propuesto mejorar la rigidez de estos mediante rejillas de mezcla de suelo-cemento. Un ejemplo destacado de esta línea de investigación es el estudio llevado a cabo por Khosravi et al. (2015), en el cual se llega a la conclusión de que los factores más influyentes en el aumento de la resistencia de la mezcla y la eficacia de la técnica de mejora del suelo, utilizando el *soil mixing*, son el tipo de cemento, las condiciones de curado y la relación agua-cemento.

En el estudio se evaluaron dos técnicas de construcción de la rejilla: la primera mediante un proceso de barrenado y la segunda utilizando zanjas de excavación, siendo esta última la más efectiva. La deformación esperada en la rejilla fue notablemente menor que la medida en el suelo, lo que sugiere que el asentamiento vertical se reducirá en cualquier estructura que se apoye sobre este tipo de rejillas.

La Figura 8 muestra grietas en dirección ortogonal a la excitación dinámica y en la unión entre los paneles de la rejilla de suelo-cemento después de las pruebas realizadas en la centrífuga geotécnica.

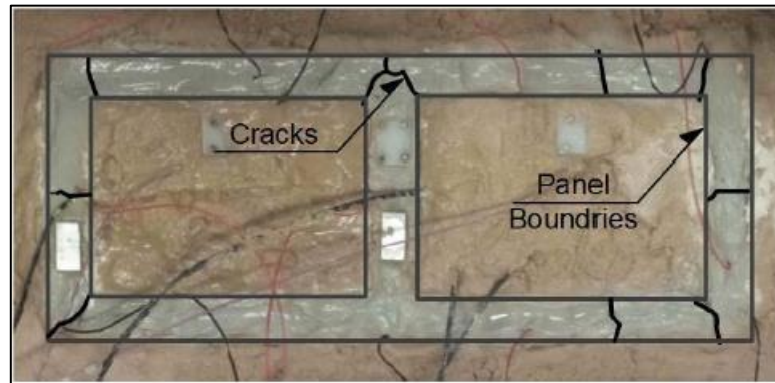


Figura 8. Grietas en rejilla de suelo cemento  
Fuente: Khosravi et al. (2015)

En la Escuela Colombiana de Ingeniería, se realizó una modelación física en una centrífuga geotécnica de un suelo blando mejorado con columnas de suelo-cemento. Sobre este suelo mejorado descansa un terraplén de 4.0 metros de altura con un ángulo de inclinación de  $45^\circ$ .

Este estudio corresponde a un proyecto de trabajo dirigido en el nivel de pregrado. Su objetivo principal fue establecer una técnica inicial para la modelación de suelos mejorados con columnas de suelo-cemento. Se construyeron dos modelos: uno de ellos representaba un suelo de fundación sin mejoramiento, como se ilustra en la Figura 9, y el otro involucraba el tratamiento con *soil mixing*, que incluía columnas de 1.0 m de diámetro (medida del prototipo), como se muestra en la Figura 10.

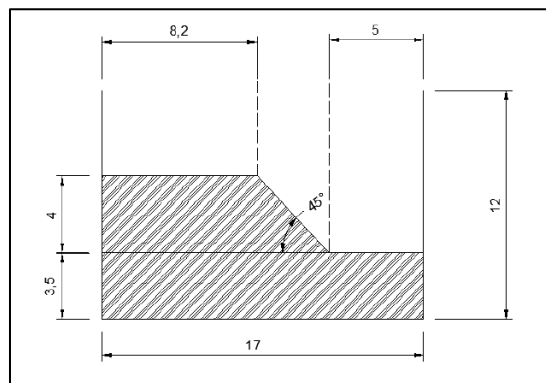


Figura 9. Modelo de suelo sin mejorar  
Fuente: Delgadillo (2022)

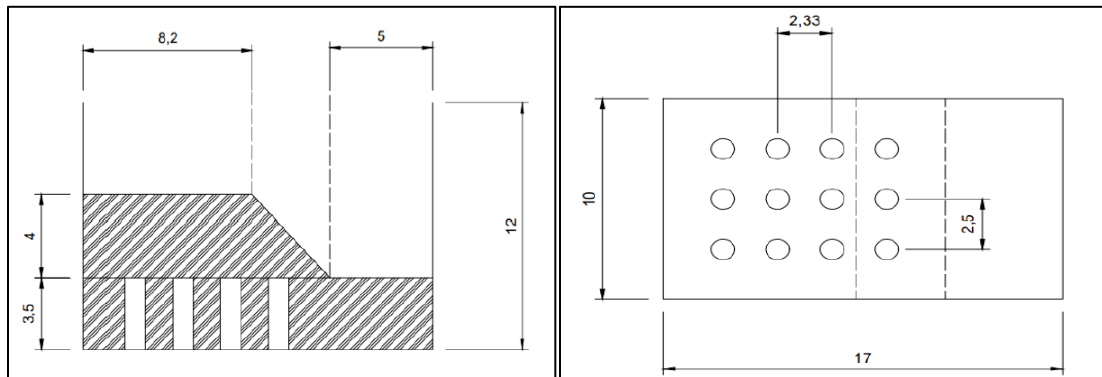


Figura 10. Modelo de suelo reforzado con columnas de suelo cemento. Distribución en planta de columnas bajo el terraplén.

Fuente: Delgadillo (2022)

De acuerdo con Delgadillo (2022), Los resultados obtenidos del ensayo en la centrífuga geotécnica a 100g del primer modelo permiten identificar tres fallas de tipo circular que se generaron en el suelo de fundación y en el terraplén cuando no se dispone de un sistema de refuerzo. Además, se observó una grieta de tracción en la corona del terraplén con una longitud de 1.45 cm en el modelo, lo que corresponde a 1.45 m en el prototipo, tal como se muestra en la Figura 11.

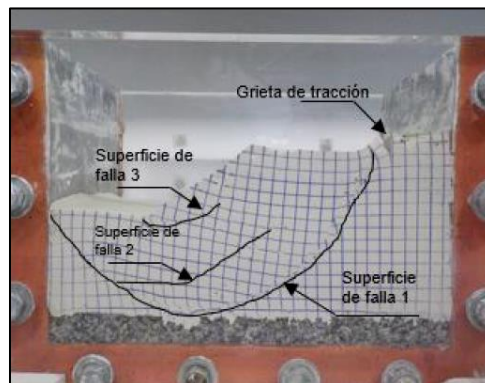


Figura 11. Superficies de falla en modelo de suelo sin mejora

Fuente: Delgadillo (2022)

En cuanto al segundo modelo, después de llevar a cabo el ensayo en la centrífuga geotécnica a 100g, se observó una falla de tipo circular en el terraplén, como se muestra en la Figura 12. Esta falla fue posiblemente causada por las diferencias en la rigidez entre el suelo mejorado con columnas de suelo-cemento y el suelo del terraplén. El suelo de fundación no mostró deformaciones significativas ni desarrollo de superficies de falla. Por lo tanto, este estudio confirma la eficacia de la técnica de mejora en suelos de consistencia blanda cuando se someten a cargas verticales.

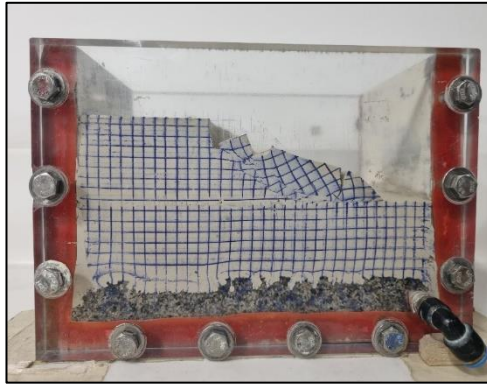


Figura 12 Superficies de falla en el modelo de suelo mejorado con columnas de suelo-cemento  
Fuente: Delgadillo (2022)

Respecto al diseño de la mezcla para la construcción de las columnas, se utilizó una dosificación compuesta por cemento, arcilla y agua en las siguientes proporciones: 1C: 1.9 Ar:3.1 A, en donde:

C = cemento

Ar= arcilla

A = agua

La inclusión de un acelerante al 3% permitió alcanzar valores de resistencia a la compresión a los 7 días del orden de los 363.12 kPa. Estos se determinaron a partir del ensayo de dos muestras de la mezcla de suelo-cemento elaborada.

#### **4.2.3 Modelos físicos en centrífuga geotécnica de mezclas profundas utilizando columnas rígidas.**

Zhou et al. (2019) realizaron una investigación que implicó la ejecución de dos modelos físicos en una centrífuga geotécnica. En este estudio, se examinó el proceso de deformación de un estrato de suelo blando inclinado bajo un terraplén de 10.8 metros de altura, y se varió las profundidades de empotramiento de las columnas rígidas utilizadas como técnica de mejora.

Los resultados de este estudio señalaron que las columnas con una mayor longitud de empotramiento presentaban una deflexión reducida, contribuyendo así a la estabilidad del sistema. La eficiencia del sistema se maximiza cuando las columnas se colocan entre la punta y el área que coincide con el espaldón del terraplén. En el caso de las columnas con una menor longitud de empotramiento, se pueden ubicar en la parte central del terraplén para reducir los costos.





modelos numéricos, proporcionando datos cruciales para la comprensión del comportamiento geotécnico de los materiales.

En la ingeniería civil, la modelación física en centrífuga geotécnica ha posibilitado la precisa determinación del comportamiento e interacción entre el suelo y la estructura. Esto es especialmente relevante en situaciones donde la geometría o las propiedades mecánicas de un problema específico no pueden analizarse de manera económica a escala real debido a su alto costo.

#### 4.3.1 Leyes de escala para modelos lineales

Permite relacionar de forma apropiada el comportamiento de un modelo físico a escala en centrífuga geotécnica con el del prototipo. Así las cosas, el cálculo del esfuerzo vertical en el modelo estará dado por la ecuación 1.

$$\sigma_{vm} = n * \rho * g * h_m \quad (1)$$

En donde,

$\sigma_{vm}$  = esfuerzo vertical del modelo

n= factor de aceleración

$\rho$  = densidad del suelo

g= aceleración de la gravedad

$h_m$  = profundidad del modelo

Los esfuerzos verticales en el prototipo con la misma densidad  $\rho$  que el modelo y a una profundidad  $h_p$ , están dados por la ecuación 2:

$$\sigma_{vp} = \rho * g * h_p \quad (2)$$

en donde:

$\sigma_{vp}$  = esfuerzo vertical en el prototipo

$h_p$  = profundidad en el prototipo.

Igualando las ecuaciones 1 y 2, se obtiene que,  $h_m * n = h_p$ , sin embargo y dado que el factor de escala entre modelo y prototipo, es igual a  $1/n$ , se tiene la ecuación 3:

$$h_p = n * h_m \quad (3)$$

Cuando se emplea un equipo de centrífuga geotécnica, se generan pequeñas variaciones de la aceleración a través de todo el modelo, esto se debe a que el campo de aceleración inercial es función del producto de la velocidad angular de rotación elevada al cuadrado y el radio de algún elemento de suelo del modelo, tal como se muestra en la ecuación 4.

$$a = w^2 * r \quad (4)$$

El radio efectivo al cual un factor de escala gravitacional  $R_e$ , está dado por la ecuación 5.

$$R_e = R_t + \frac{h_m}{3} \quad (5)$$

En donde,

$R_e$  = Radio efectivo centrífugo

$R_t$  = Radio en la parte superior del modelo

$h_m$  = Profundidad en el modelo

En la Tabla 1 se muestran los diferentes factores de escala para modelos estáticos y dinámicos de acuerdo con los parámetros más usuales:

Tabla 1. Factores de escala en la modelación centrífuga

PARÁMETRO	Factor de escala. Modelo/ Prototipo
Longitud	$1/n$ $1/n^2$
Área	$1/n^3$
Volumen	1
Esfuerzo	1
Deformación Densidad	1
Gravedad	n

PARÁMETRO	Factor de escala. Modelo/ Prototipo
Fuerza	$1/n^2$
Tiempo	$1/n^2$
Masa	$1/n^3$
Peso Unitario	N
Velocidad	N
Concentración	1

Fuente: adaptado de Madabhushi (2018)

\*n = factor de escala

La Escuela Colombiana de Ingeniería cuenta con una centrífuga geotécnica de tipo viga mostrada en la Figura 14 que presenta las siguientes características: un radio de 610 mm y un rango de aceleración entre 10 g y 200 g. A la máxima aceleración, es capaz de soportar una carga de 12 kg en cada canasta. De acuerdo con Lozada et al. (2021) este equipo está equipado con 12 sensores que permiten medir diversas propiedades, como la presión de agua de poros, el desplazamiento, la temperatura y la aceleración, mediante un software de adquisición de datos denominado Labview. Además, cuenta con cinco consolidómetros neumáticos utilizados en el proceso de preparación de suelos finos, y cajas para la preparación de modelos con las siguientes dimensiones: 17 cm de largo, 10 cm de ancho y 15 cm de alto. Estas cajas se pueden complementar con placas de extensión que permiten aumentar el ancho y la altura de las mismas.

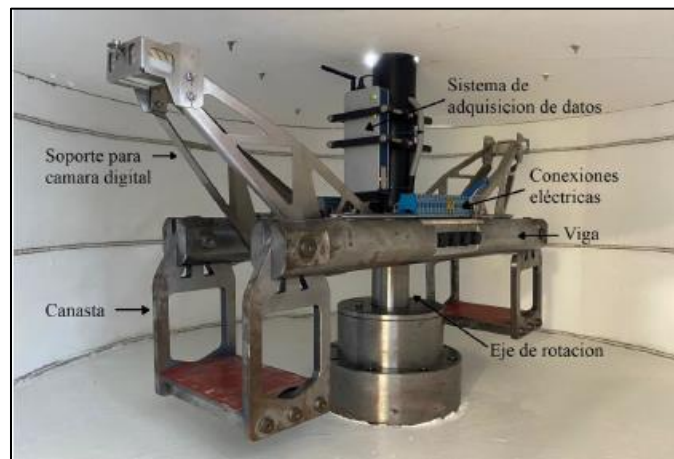


Figura 14. Centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería  
Fuente: Vasquez (2023)

#### **4.4 Análisis de imágenes mediante PIV**

El análisis de imágenes, utilizando la técnica de la Velocimetría de imágenes de partículas (PIV), ha sido utilizada como una importante herramienta en trabajos de investigación geotécnica hace más de 15 años (Stanier et al., 2015).

La visualización e interpretación de las deformaciones en el suelo, son obtenidas a partir de fotografías o fotogramas digitales. Cuando estas imágenes son analizadas con PIV, se obtienen vectores de desplazamiento resultantes que describen detalladamente el movimiento del suelo bajo ciertas condiciones de carga (White et al., 2003). Esta información es realmente útil cuando se trata de modelos físicos ensayados en la centrífuga geotécnica, en donde la comparación de imágenes anterior y posterior a la falla, le permite al geotecnista cuantificar las deformaciones y caracterizar la tipología de la falla presentada en el suelo. Con base en esto es posible proponer soluciones específicas para cada problema de ingeniería.

## 5 Metodología

Para alcanzar el objetivo principal de este trabajo de grado, se diseñó una metodología que involucra una serie de etapas interrelacionadas y cuidadosamente planificadas.

### 5.1 Revisión bibliográfica

En esta fase se llevó a cabo la revisión e interpretación de la literatura técnica y los estudios previos relacionados con la técnica de columnas de suelo cemento y su dosificación.

### 5.2 Configuración geométrica de los modelos

Antes de dar inicio a las labores que conforman la etapa experimental y empleando las leyes de escala inherentes a la modelación física en centrífuga, se establecieron los siguientes modelos bajo una gravedad de 100 *g*. Dicha magnitud gravitatoria posibilitó la simulación de un prototipo con las siguientes características:

- Suelo de fundación de espesor 6.5 m
- Terraplén de 3.5 m de altura
- Columnas de suelo-cemento con los siguientes diámetros: 0.6 m, 1.0 m y 1.4 m
- Separación entre centros de las columnas dos veces el diámetro (2D)

La Tabla 2 presenta la relación de escala para el dimensionamiento de los modelos realizados.

Tabla 2. Dimensiones de los modelos en centrífuga geotécnica

Descripción	Dimensión en el modelo	Dimensión del prototipo
Suelo de fundación	65 mm	6.5 m
Altura Terraplén	35 mm	3.5 m
Corona del terraplén para un ángulo de inclinación de 45°	85 mm	8.5 m
Corona del terraplén para un ángulo de inclinación de 34°	68.1 mm	6.81 m
Berma	50 mm	5.0 m
Diámetro de columna 1.	6 mm	0.6 m
Diámetro de columna 2.	10 mm	1.0 m
Diámetro de columna 3.	14 mm	1.4 m
Separación columna diámetro 1	12 mm	1.2 m
Separación columna diámetro 2	20 mm	2.0m
Separación columna diámetro 3	28 mm	2.8 m

Fuente: elaboración propia

Conocidas las dimensiones a tener en cuenta en la modelación y las variables que influyen en los análisis a realizar, se planteó la construcción de ocho modelos con las siguientes características:

**Modelo 1-2.** Comprende un suelo homogéneo sin refuerzo y un terraplén con un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  y  $34^\circ$  respectivamente, tal como se indica en la Figura 15.

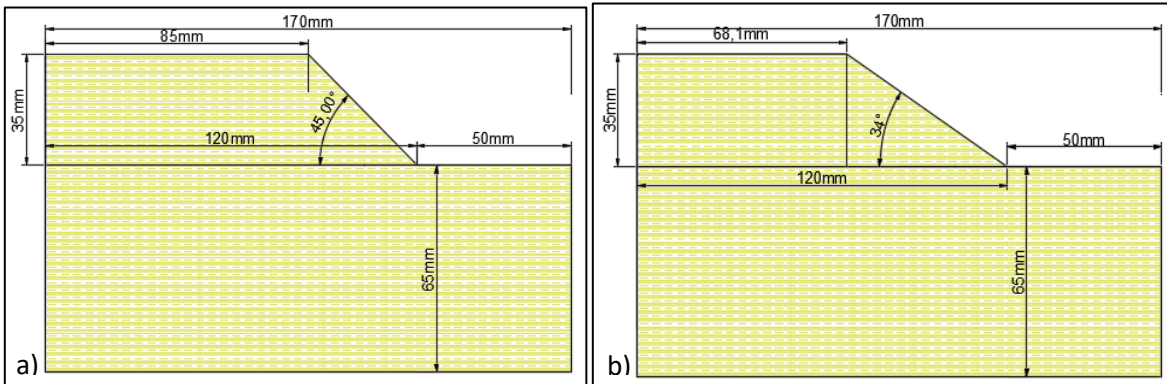


Figura 15. En a) modelo físico de suelo homogéneo sin mejora con ángulo de  $45^\circ$  y en b) modelo físico de suelo homogéneo sin mejora con ángulo de  $34^\circ$

Fuente: elaboración propia

**Modelo 3 – modelo 5.** Comprende un terraplén con un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  y un suelo de fundación reforzado mediante columnas de suelo cemento con diámetros de 0.6 m, 1.0 m y 1.4 m, como se indica en la Figura 16 hasta la Figura 18.

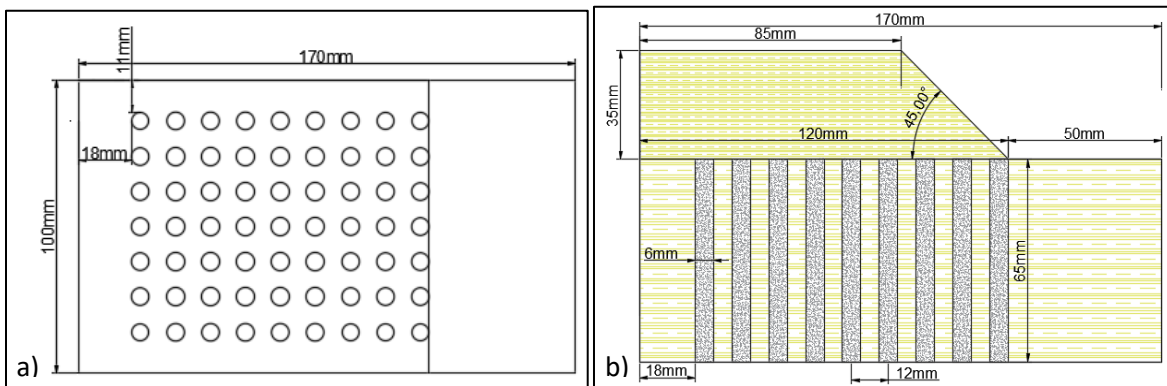


Figura 16. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 0.6 m en el prototipo

Fuente: elaboración propia

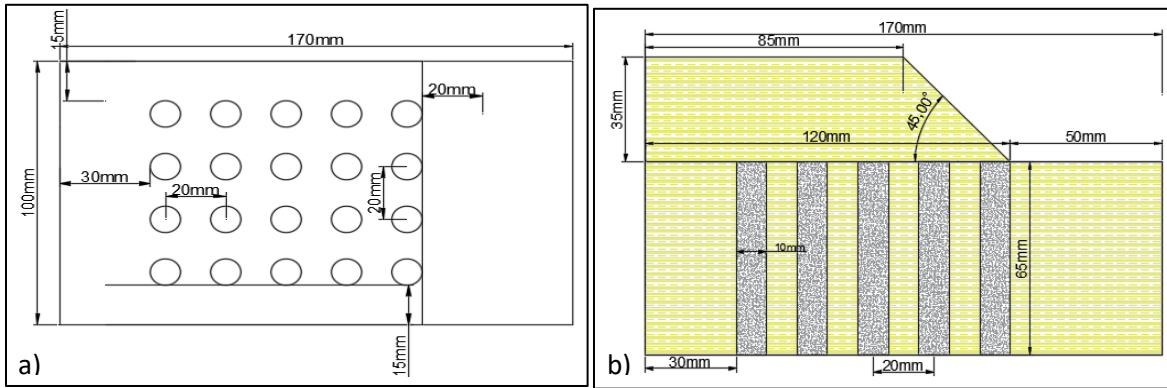


Figura 17. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 1 m en el prototipo  
Fuente: elaboración propia

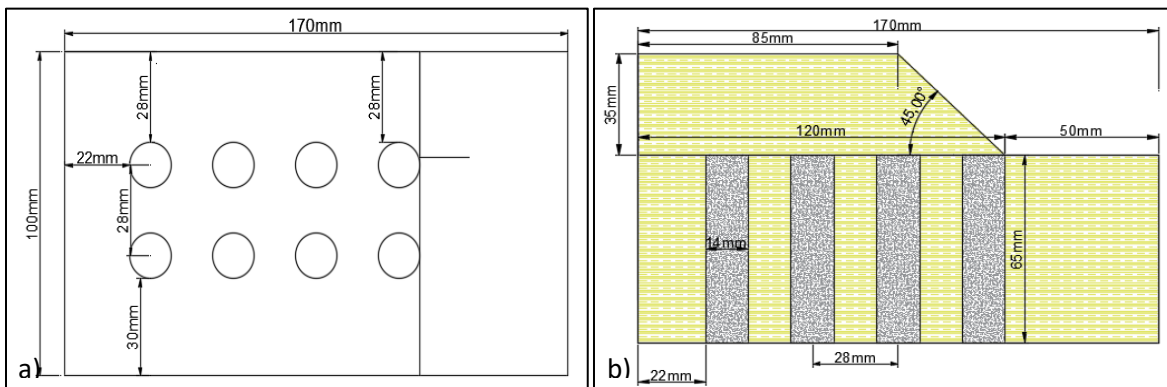


Figura 18. En a) vista en planta, en b) sección transversal de la distribución de columnas de suelo cemento de diámetro 1.4 m en el prototipo  
Fuente: elaboración propia

En los modelos representados en la Figura 16, Figura 17 y Figura 18 se planteó implementar un espacio de seguridad de 15 mm o más en las paredes de la caja con el fin de prevenir la manifestación del efecto de borde generado por la acción de la centrifuga geotécnica. Esta separación adicional tiene como objetivo la reducción del desconfinamiento del suelo de fundación durante la simulación del proceso de perforación empleado para la incorporación de la mezcla suelo-cemento.

Considerando que las dimensiones de la berma se mantienen invariables, la disposición de las columnas de suelo cemento en planta para los modelos 6, 7 y 8 no experimenta alteraciones respecto a lo mostrado en la Figura 16, Figura 17 y Figura 18. Por lo tanto, en el caso de un

terraplén con un ángulo de inclinación de  $34^\circ$ , únicamente se indicará la sección transversal asociada a cada diámetro de columna, tal como se representa en la Figura 19.

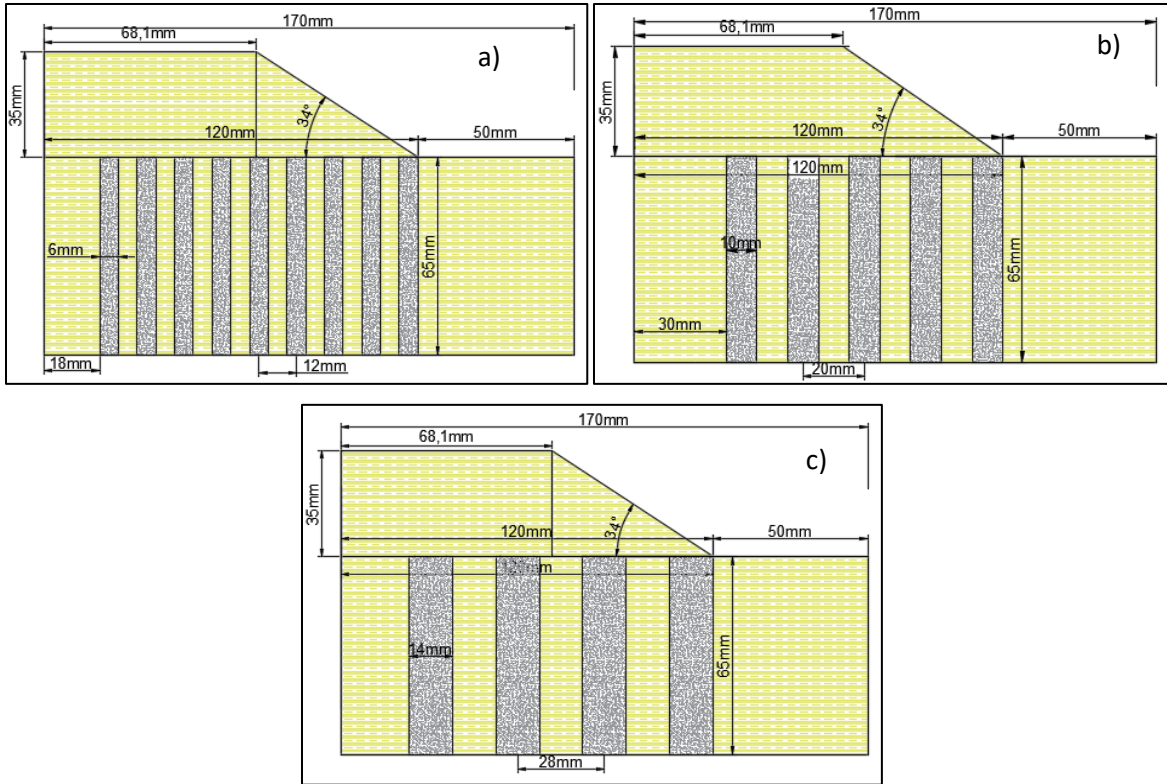


Figura 19. Sección transversal de columnas de suelo cemento a) diámetro 0.6 m, b) diámetro 1.0m y c) diámetro 1.4 m en el prototipo y un terraplén con ángulo de inclinación de  $34^\circ$

Fuente: elaboración propia

### 5.3 Caracterización de las propiedades de los materiales de construcción de los modelos

Para establecer una representación gráfica y organizada de la secuencia de actividades y procesos que conformaron la etapa de laboratorio en esta investigación, se construyó el diagrama de flujo mostrado en la Figura 20. Este diagrama posibilitó la identificación de ajustes requeridos en los modelos físicos ejecutados.



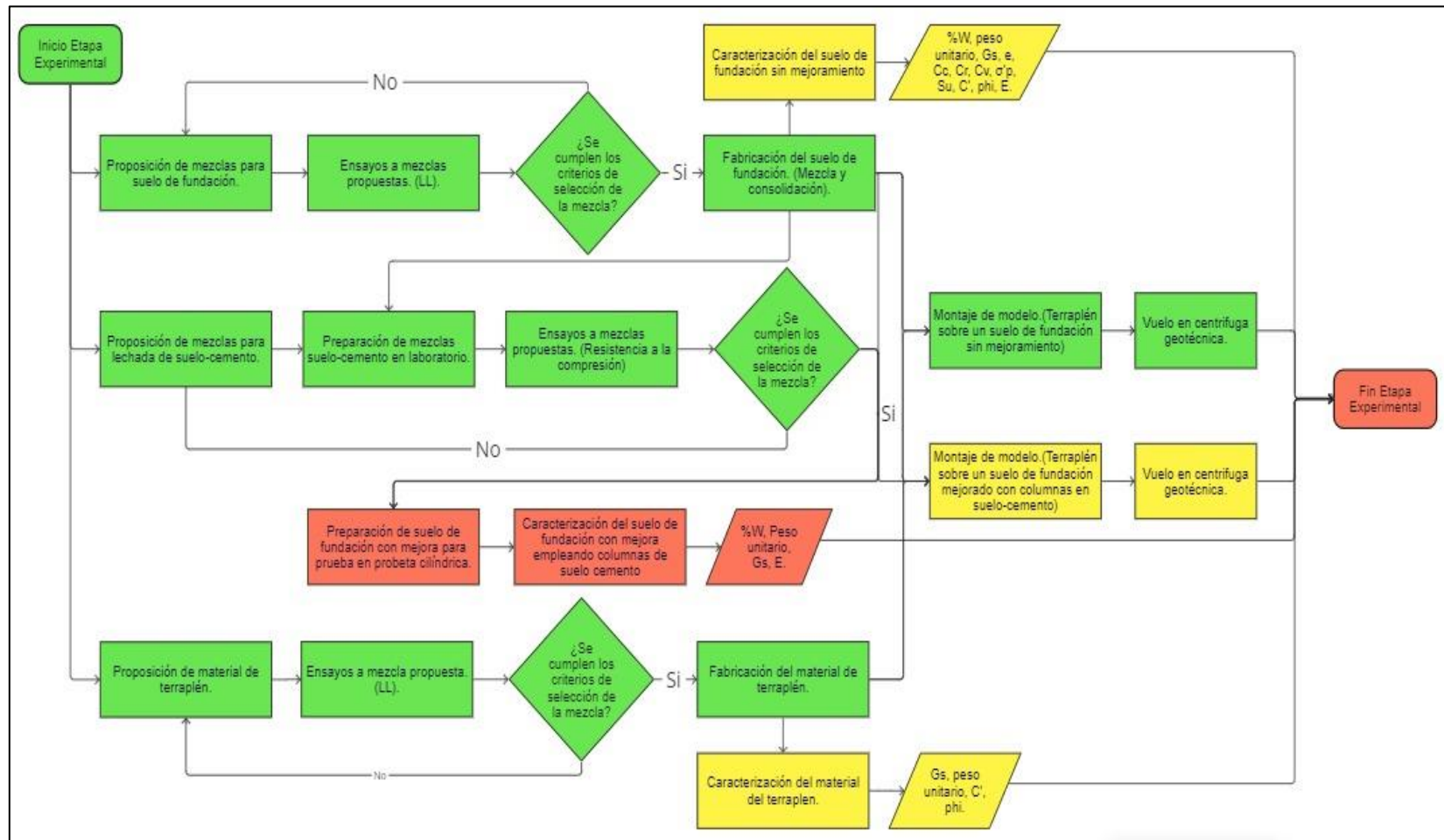


Figura 20. Diagrama de flujo para el desarrollo de la etapa experimental  
Fuente: elaboración propia

### 5.3.1 Suelo de fundación sin mejoramiento

Para la fabricación del suelo de fundación, se planteó como paso inicial la determinación del Límite Líquido para diferentes mezclas de caolín y bentonita como se indica en la Tabla 2.

Tabla 3. Dosificación para fabricación del suelo de fundación.

No. Mezcla	Proporción		LL (%)
	Bentonita	Caolín	
1	100%	0%	533
2	70%	30%	429
3	60%	40%	340
4	50%	50%	279
5	40%	60%	224
6	30%	70%	173
7	0%	100%	85
8	20%	80%	134

Fuente: elaboración propia

Inicialmente se estableció como criterio de selección de las mezclas aquellas que presentaran un límite líquido comprendido entre el 100% y el 140%. No obstante, después de analizar los resultados obtenidos entre las distintas combinaciones planteadas, se determinó que la mezcla 6, compuesta por un 70% de caolín y 30% de bentonita, es la elección óptima para la fabricación del suelo de fundación dado que se ajusta mejor a las características geotécnicas de los suelos en la sabana de Bogotá.

Una vez definidas las proporciones de bentonita y caolinita a utilizar en la fabricación del suelo de fundación, se continuó con los ensayos de caracterización: gravedad específica, consolidación, humedad, peso unitario, y compresión inconfiada. Sin embargo, es preciso aclarar que, para los tres últimos ensayos mencionados el procedimiento de muestreo se realiza cuando el suelo de fundación haya finalizado el ciclo de carga, es decir, cuando esté consolidado.

#### 5.3.1.1 Consolidación unidimensional de suelos

El ensayo de consolidación se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la norma INVE 151-13, método B. El suelo fue preparado al 1.5 LL, y se estimaron los siguientes incrementos de carga teniendo en cuenta la consistencia blanda del suelo: 3.0 kPa, 6.25 kPa, 12.5 kPa, 25.0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa.

A partir de los datos recopilados, se construyó la curva de compresibilidad mostrada en la Figura 21. Esta curva muestra la forma en la que cambia el volumen del suelo en función de la carga aplicada.

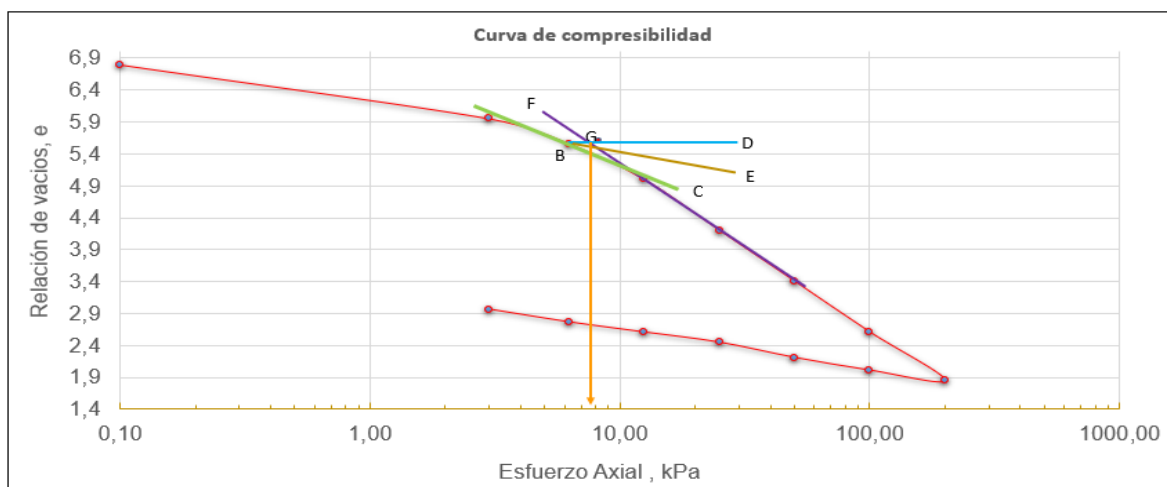


Figura 21. Curva de compresibilidad para caracterización del suelo de fundación  
Fuente: elaboración propia

Luego de elaborar la curva de compresibilidad, se empleó el método gráfico de Casagrande para determinar el esfuerzo de preconsolidación. Los parámetros obtenidos de este procedimiento se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros de compresibilidad suelo de fundación

Parámetro	Valor
e	6.79
Cc	2.65
Cr	0.73
$\sigma_p$ (kPa)	7.90

Fuente: elaboración propia

### 5.3.1.2 Gravedad específica, $G_s$

Para el suelo de fundación el valor de  $G_s=2.89$ , y se obtuvo siguiendo el procedimiento estipulado en la norma INVE 128-13 y mostrado en la Figura 22.



Figura 22. Ensayo gravedad específica, Gs. Suelo de fundación  
Fuente: elaboración propia

### 5.3.1.3 Peso unitario, $\gamma$

El peso unitario fue calculado con base al método “B” de la norma ASTM D7263. Para el suelo de fundación el valor obtenido fue de 13,37 kN/m<sup>3</sup>.

### 5.3.1.4 Compresión inconfiada

Para determinar la resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ) del suelo de fundación, se utilizó la norma INVE 151-13. La Figura 23 muestra la gráfica de esfuerzo vs. Deformación de la muestra, lo cual generó el tipo de falla indicado en la Figura 24. A su vez, la Tabla 5 resume los resultados obtenidos del ensayo.

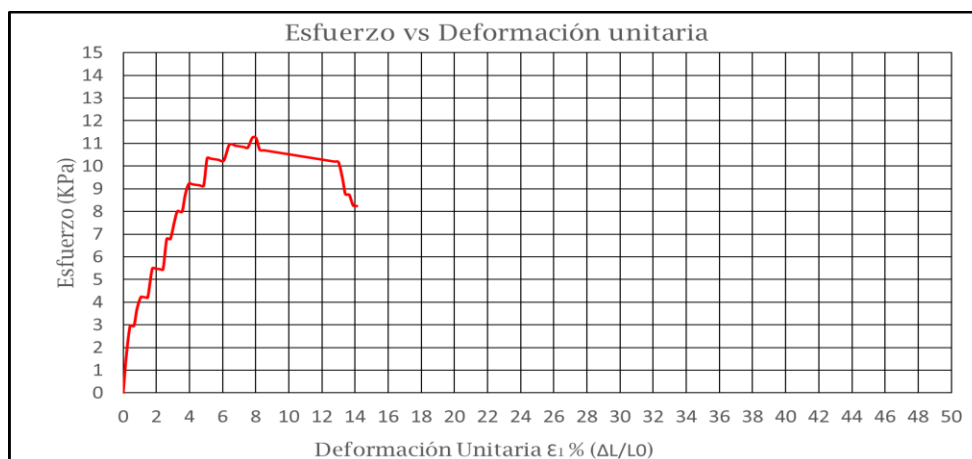


Figura 23. Gráfica de esfuerzo Vs. Deformación unitaria en ensayo de compresión inconfiada para el suelo de fundación

Fuente: elaboración propia

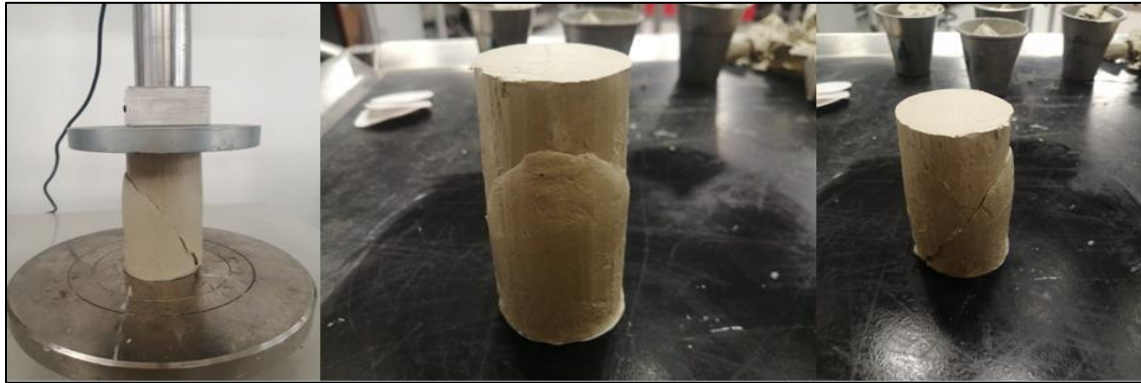


Figura 24. Falla de la muestra en ensayo de compresión inconfiada  
Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Resultado de la resistencia al corte no drenado en ensayo de compresión inconfiada para el suelo de fundación sin mejora

Parámetro	Unidad	Valor
Resistencia a la compresión inconfiada, $q_u$	kPa	11.27
Deformación unitaria, $\epsilon$	%	7.8
Resistencia al corte no drenada, $S_u$	kPa	5.64

Fuente: elaboración propia

### 5.3.1.5 Ensayo de humedad, %W

Se realizó un ensayo de humedad en el suelo de fundación en cuatro de los ocho modelos proyectados, obteniéndose un valor promedio del 143.95%. Se consideró importante determinar esta propiedad en el suelo para verificar que los modelos ensayados no presentaran variaciones significativas durante su fabricación.

### 5.3.2 Lechada de suelo cemento

En este numeral, se realiza la descripción del proceso de caracterización de las mezclas de suelo cemento propuestas, así como el análisis de los resultados obtenidos en función de las diferentes dosificaciones planteadas.

El valor objetivo de resistencia a la compresión será de 1.0 MPA, el cual se encuentra dentro del rango de valores de resistencia (entre 0.1 MPA y 28 MPA) establecido por FHWA (2013) para mezclas de suelo cemento utilizando el método húmedo. Se adoptó una relación agua/cemento constante de 1, siguiendo la recomendación de Zakaria et al. (2020), ya que este valor proporcionará

una mezcla con una mayor trabajabilidad. Inicialmente, se incrementó la cantidad de cemento en peso para obtener relaciones suelo/cemento que varíen entre 0.4 y 1,2 con el propósito de evaluar el incremento en la resistencia de la mezcla, tal como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Dosificaciones propuestas para la lechada de suelo cemento

N° Mezcla	Mezcla (partes en peso)			Relación agua-cemento	Relación Suelo- Cemento
	Suelo (Bentonita-Caolinita)	Agua	Cemento		
1	1	1	1	1,00	1
2	1	1,25	1,25	1,00	0,80
3	1	1,67	1,67	1,00	0,60
4	1	2,5	2,5	1,00	0,40
*5	1	0,83	0,83	1,00	1,2

Fuente: elaboración propia

\*Esta dosificación fue incluida posteriormente con el fin de obtener una representación estadística completa de la resistencia desarrollada para cada uno de los diseños sugeridos.

Para preparar la lechada, se utilizaron varios materiales, incluyendo el suelo de fundación, agua, cemento y un acelerante en una proporción que no excediera el 3% del peso del cemento en la mezcla. Con el acelerante se permitió el desarrollo de la resistencia de diseño deseada en un plazo de siete días.

En la Figura 25 se presenta un ensayo de fluidez realizado con la lechada correspondiente a la mezcla N°4. A partir de los registros obtenidos en el ensayo, se demostró que la mezcla posee las propiedades de fluidez requeridas en este proyecto de grado. Esta característica es particularmente beneficioso en la práctica, ya que garantiza que la mezcla fluya adecuadamente a través de las mangueras de inyección sin obstrucciones y sin interrupciones en la continuidad del elemento inyectado.



Figura 25. Ensayo de fluidez para la mezcla N°4 de suelo cemento

Fuente: elaboración propia

El proceso de curado se realizó en agua a edades diferentes; específicamente a los 3 y 7 días. Para cada diseño de mezcla, se prepararon 9 cubos: tres se ensayaron a los 3 días, otros tres a los 7 días, y se mantuvieron tres elementos como testigos en caso de que alguno de los resultados presentara alta dispersión.

La determinación de la resistencia de las mezclas de suelo cemento proyectadas se llevó a cabo siguiendo las pautas de la norma colombiana NTC 297, titulada "Cemento. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros". La Figura 26 muestra un ensayo realizado para una de las mezclas propuestas.



Figura 26. Ensayo de resistencia a la compresión a los siete días para la mezcla N°2 de suelo cemento  
Fuente: elaboración propia

El registro de los ensayos de resistencia para cada diseño de mezcla se encuentran tabulados en la Tabla 7 y representados graficamente en la Figura 27.

Tabla 7. Resultado de resistencia a la compresión de las mezclas de suelo cemento

# Mezcla	Resistencia a compresión 3 días (MPa)	Resistencia a compresión 7 días (MPa)	Relación S/C
1	0,830	1,170	1
2	1,080	1,380	0,8
3	1,320	1,580	0,6
4	1,510	1,910	0,4
5	0,700	0,980	1,2

Fuente: elaboración propia

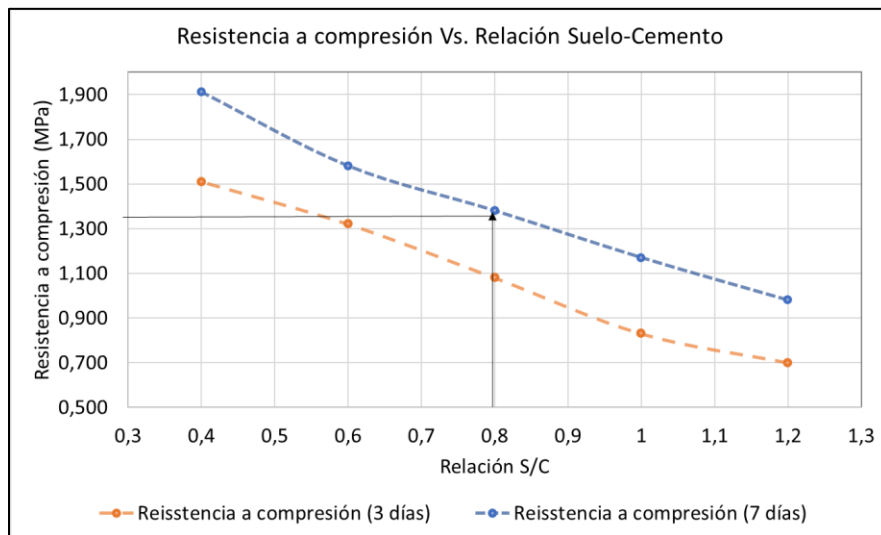


Figura 27. Resistencia a la compresión Vs. Relación suelo / cemento de los diseños de mezcla  
Fuente: elaboración propia

El análisis de los resultados de las resistencias a la compresión obtenidas llevó a la selección de la mezcla de diseño N°2 detallada en la Tabla 7. Esta elección se basa en investigaciones relevantes, como la efectuada por Suksun et al, (2012). En su estudio se describe que, en el caso de mezclas con baja resistencia, es decir, inferiores a 1.5 MPa, el desarrollo de la resistencia de la mezcla en campo suele variar entre 0.6 y el 1.5 veces la resistencia obtenida en laboratorio. Por lo anterior, la resistencia obtenida en la mezcla N°2 permite cumplir con la resistencia de diseño planteada aun cuando en campo se pudiesen presentar las fluctuaciones anteriormente mencionadas. De otro lado, los autores también evidenciaron que para mezclas de suelo cemento de baja resistencia, la velocidad de instalación de las columnas no incide en la resistencia final alcanzada por la mezcla.

### 5.3.3 Suelo del terraplén

Inicialmente, la caracterización del material destinado para el terraplén involucró la utilización de caolín con un límite líquido de 85%, al que se le adicionó arena del Guamo con el fin de acercarse de manera sutil a la textura del material usado en campo cotidianamente. La combinación de estos dos materiales estaba sujeta a criterios de selección precisos y explicados a continuación: obtener un peso unitario igual o superior a 1.2 veces el del suelo de fundación y un índice de plasticidad (IP) superior a 7. Sin embargo, debido a razones evidentes, la incorporación de la arena del Guamo no generó ninguna variación en la plasticidad del material, lo que hizo que cumplir con los criterios de selección previamente establecidos resultara imposible.



En consecuencia, se optó por sustituir el caolín original por uno de la marca Corona. Los ensayos de plasticidad, peso unitario y gravedad específica realizados a este nuevo material arrojaron los resultados mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados ensayos de laboratorio material para terraplén

Ensayo	Unidad	Valor
Límite líquido	%	29.0
Límite plástico	%	20.0
Índice de plasticidad	%	9.0
Peso unitario	kN/m <sup>3</sup>	15.96
Gs	-	2.70

Fuente. Elaboración propia

Como se puede apreciar en lo que respecta a la plasticidad, este caolín se ajusta adecuadamente a los requisitos establecidos en las especificaciones del INVIAS, específicamente en la sección 220-22, numeral 220.2.2.1. Suelos seleccionados, y en cuanto al peso unitario se satisface el criterio de selección definido. En razón de lo anterior, se consideró viable la utilización de este material para la fabricación de los modelos objeto de este proyecto de grado.

El caolín utilizado para la construcción del terraplén debido a su baja plasticidad puede tener características relativamente bajas de permeabilidad. En este caso, las condiciones drenadas son más realistas y representativas del comportamiento en campo. Por ello se planteó la ejecución de un ensayo de corte, CD, utilizando una velocidad de 0.1 mm/min. La selección de la velocidad de ensayo se basó en análisis estadísticos de velocidades de corte para ensayos, CD, realizados por Bek et al. (2021) en suelos similares a los analizados en esta tesis.

Los esfuerzos normales aplicados durante el ensayo fueron de 80 kPa, 160 kPa y 240 kPa. En la Figura 28 se muestra el proceso del ensayo. Posteriormente, en la Figura 29 y Figura 30 se indican las gráficas del ensayo. A partir de estas, se calculó el valor del ángulo de fricción interna  $\phi' = 25.3^\circ$  y un valor para el intercepto de cohesión de  $C' = 4.25$  kPa.



Figura 28. Ensayo de corte directo, CD, para muestra M1 con un esfuerzo vertical de 80 kPa  
Fuente: elaboración propia

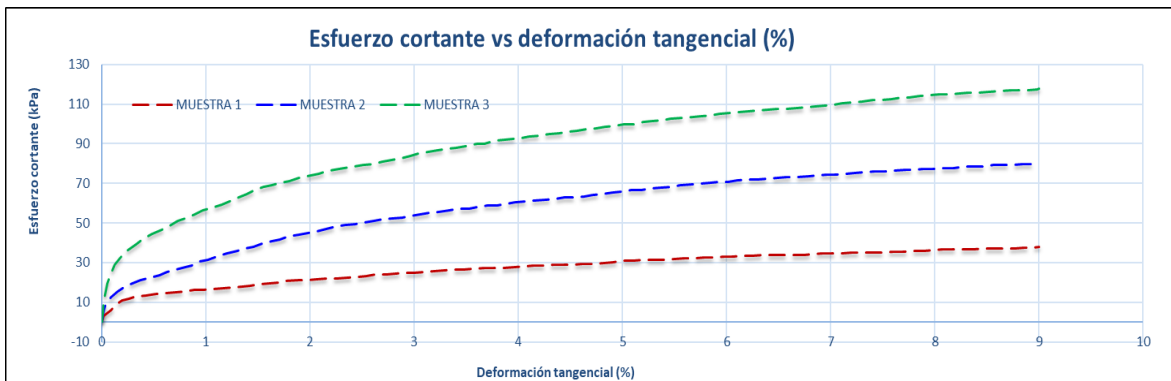


Figura 29. Gráfica de esfuerzo cortante Vs. Deformación tangencial en ensayo de corte, CD, para terraplén  
Fuente: elaboración propia

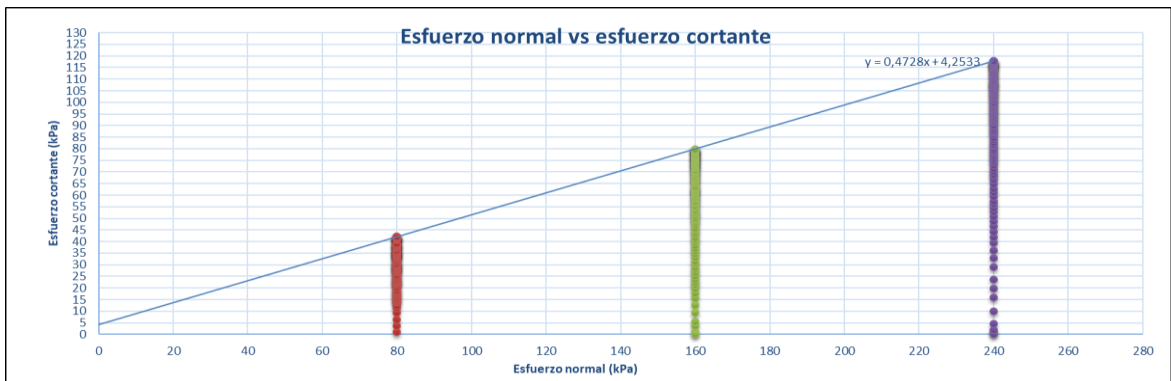


Figura 30. Gráfica de esfuerzo normal Vs. Esfuerzo cortante para ensayo de corte, CD, para terraplén  
Fuente: elaboración propia

### 5.3.4 Suelo mejorado con columnas de suelo cemento

Para llevar a cabo la caracterización del suelo de fundación mejorado con las columnas de suelo-cemento, inicialmente se planteó la ejecución de tres ensayos triaxiales, utilizando arreglos con columnas de diámetros de 0.6 m, 1.0 m y 1.4 m. Sin embargo, estos ensayos no se realizaron puesto que, la máquina triaxial no estaba en funcionamiento. Los triaxiales fueron cambiados por ensayos de compresión inconfiada y corte directo no drenado en arreglos de columnas de 0.6 m de diámetro, variando la separación entre las columnas desde 2D hasta 4D, donde 'D' corresponde al diámetro de la columna. Con lo anterior, se espera establecer la tendencia de la variación del valor de la resistencia al corte no drenada a medida que se incrementa la separación de las columnas.

#### 5.3.4.1 Ensayo de compresión inconfiada para el suelo de fundación mejorado con columnas de suelo cemento.

Para realizar este ensayo, se llevó a cabo en primer lugar la implantación de la disposición de las columnas de suelo-cemento de 0.6 m de diámetro, en el prototipo, en muestras de ensayo de 3.9 cm, tal como se detalla en la Figura 31.

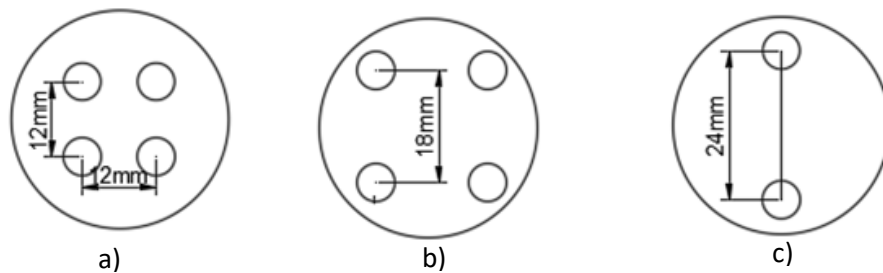


Figura 31. Implantación de columnas de suelo cemento para ensayo de compresión inconfiada. En a) separación  $S= 2D$ . En b) separación  $S= 3D$  y en c) separación  $S= 4D$

Fuente: elaboración propia

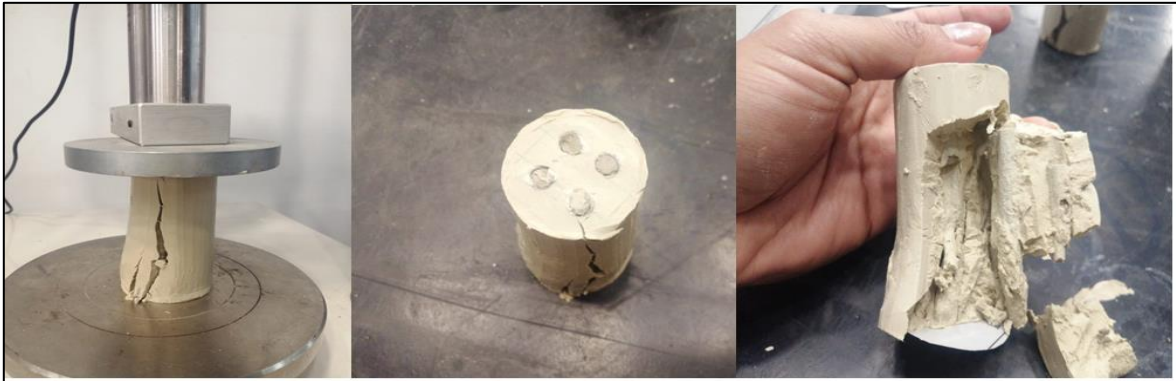


Figura 32. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación  $S= 2D$   
Fuente: elaboración propia



Figura 33. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M2 con separación  $S= 2D$   
Fuente: elaboración propia

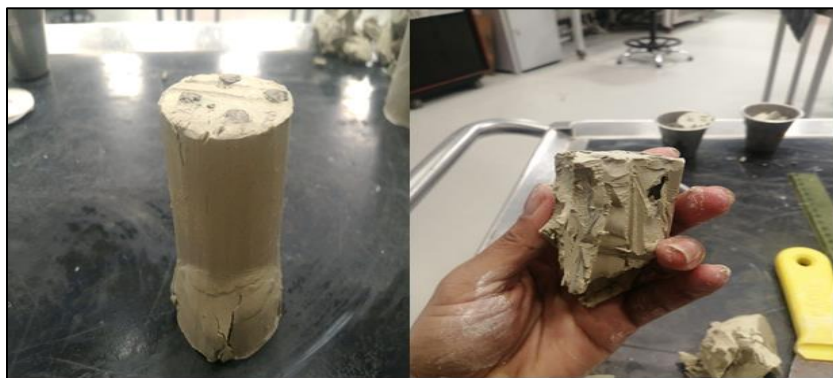


Figura 34. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación  $S= 3D$   
Fuente: elaboración propia



Figura 35. Ensayo de resistencia a la compresión inconfiada de muestra M1 con separación S= 4D  
Fuente: elaboración propia

Los resultados de los ensayos de compresión inconfiada para las muestras analizadas se resumen en la Tabla 9 y se representan gráficamente en la Figura 36.

Tabla 9. Resultados resistencia al corte no drenada para caracterización de suelo de fundación mejorado con columnas de suelo cemento

Separación de las columnas	Diámetro de la muestra (cm)	Altura de la muestra (cm)	Compresión inconfiada, $q_u$ (kPa)	Resistencia al corte no drenada $S_u$ (kPa)
2D (M1)	3,95	7,89	21,70	11,80
2D (M2)	3,94	8,36	23,60	10,85
3D (M1)	4,00	8,02	11,97	5,99
4D (M1)	4,02	7,98	10,21	5,11

Fuente: elaboración propia

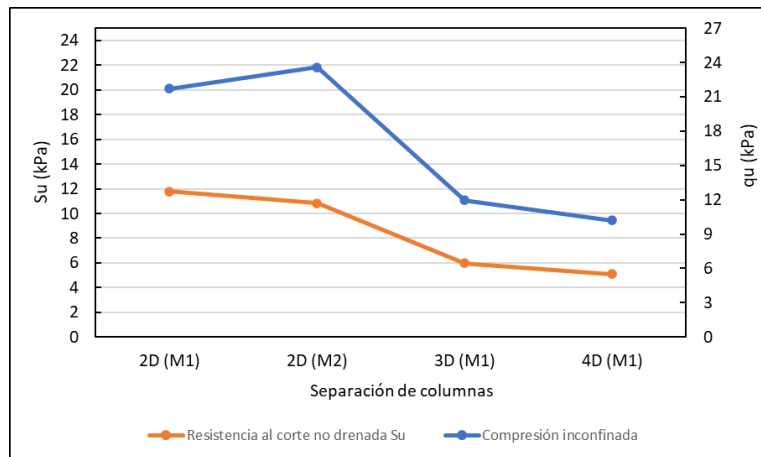


Figura 36. Gráfica de resultados de ensayos de compresión inconfiada vs. Separación entre centros de columnas

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, a medida que aumenta la distancia de separación, es decir, a 3D y 4D, la resistencia al corte no drenado se acerca considerablemente a la del suelo de fundación sin mejora. Esto confirma que la eficiencia de la mejora está directamente relacionada entre otras cosas con el espaciamiento entre las columnas de suelo cemento.

#### 5.3.4.2 Corte directo para suelo de fundación mejorado con columnas de suelo cemento.

En el ensayo de corte directo (CU), se determinaron los niveles de esfuerzos normales a los que se sometería la muestra. Se seleccionaron tres valores de esfuerzo, de acuerdo con la consistencia del material: 50 kPa, 100 kPa y 150 kPa. La velocidad de ensayo se definió en 0.04 mm/min. En la Figura 37, se proporciona una descripción detallada de la preparación de la muestra de ensayo.

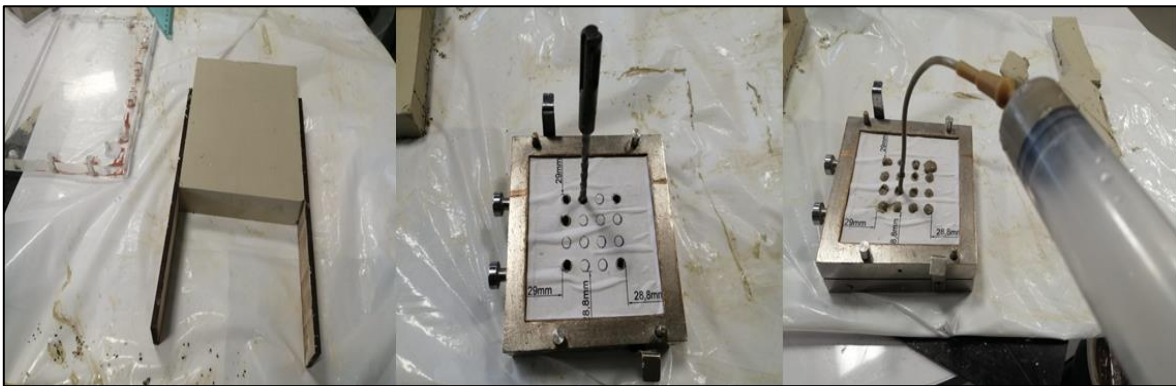


Figura 37. Preparación de muestra para ensayo de corte directo, Cu.  
Fuente: elaboración propia

Con el registro de los datos correspondientes a la deformación tangencial y vertical realizado para los tres esfuerzos verticales se construyó la gráfica de esfuerzo cortante Vs. Deformación tangencial mostrada en la Figura 38 y la gráfica de esfuerzo normal Vs. esfuerzo cortante. Con esta última, se obtuvo un valor del ángulo de fricción interna  $\phi_u = 12.77^\circ$  y un valor para el intercepto de cohesión de  $C_u = 4.638$  kPa. La discusión acerca de la representatividad de estos ensayos dentro de la investigación será abordada en el capítulo 6.

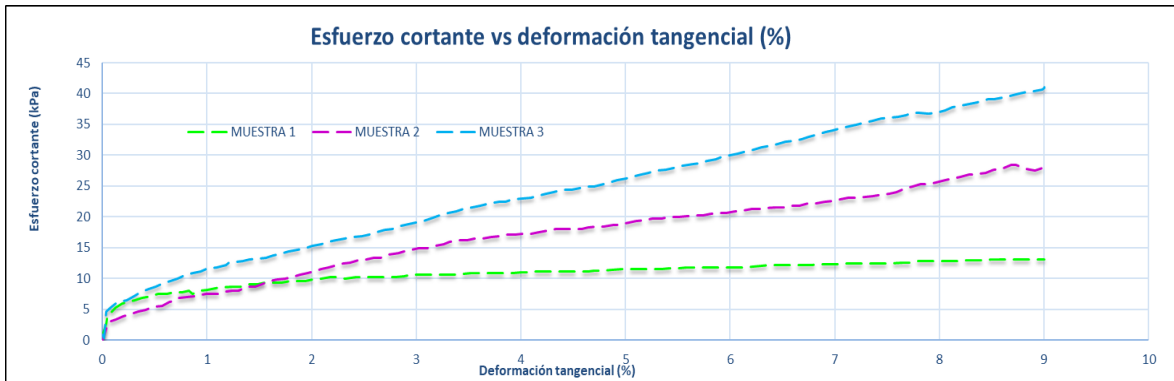


Figura 38. Gráfica de esfuerzo cortante Vs. Deformación tangencial en ensayo de corte, Cu, para suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro  
Fuente: elaboración propia

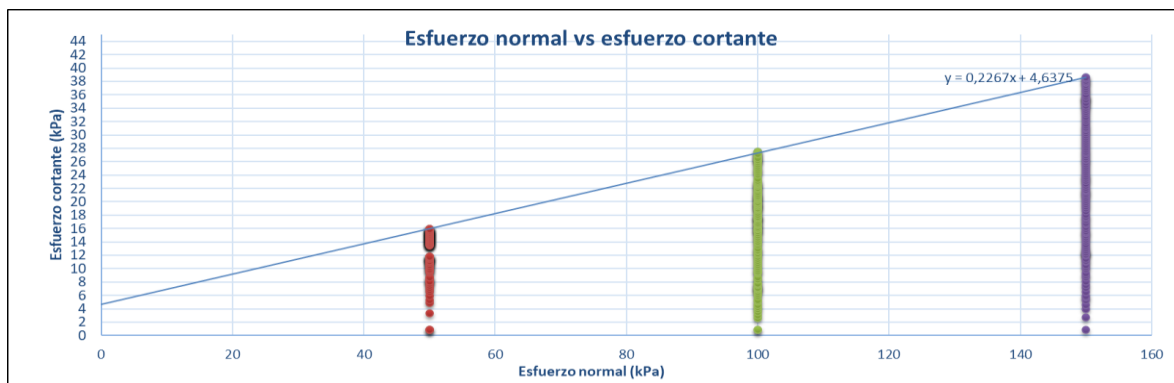


Figura 39. Gráfica de esfuerzo normal Vs. Esfuerzo cortante para ensayo de corte, Cu, para suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro.  
Fuente: elaboración propia

## 5.4 Preparación y ensayo de los modelos sin mejoramiento en la centrífuga geotécnica

En esta sección se detalla la preparación y ensayo de dos modelos sin mejoramiento, cada uno con terraplenes de diferentes ángulos de inclinación: 34° y 45°. Se describen las características del equipo empleado, los esfuerzos de consolidación aplicados tanto al suelo de fundación como al terraplén y las condiciones de vuelo en la centrífuga geotécnica.

### 5.4.1 Preparación modelos sin mejoramiento

Para la preparación de los modelos sin mejoramiento, se hizo uso de dos cajas para la modelación en la centrífuga geotécnica, las cuales incorporaron placas de extensión ilustrados en la Figura 40.

Esto con el propósito de asegurar que, tras el proceso de consolidación, el suelo base alcanzase un espesor de 6.5 m en el prototipo.

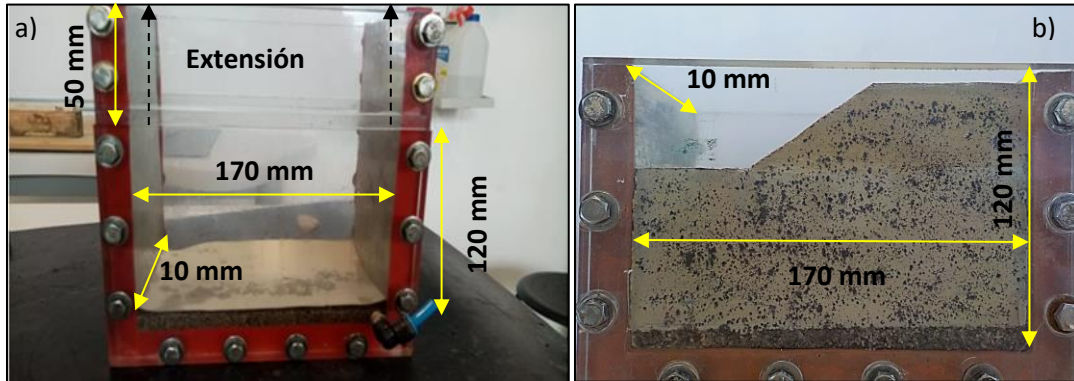


Figura 40. En a) características de la caja de la centrífuga geotécnica con extensiones, en b) dimensiones de la caja de la centrífuga geotécnica sin extensiones  
Fuente: elaboración propia

Para la construcción de estos modelos, en primer lugar, se realizó la preparación de la mezcla de caolín, bentonita y agua con un índice de liquidez del 1.5 LL hasta lograr la integración de todos los materiales. Posterior al mezclado, se colocó una capa de arena limpia y saturada, y papel filtro al fondo de la caja sin exceder los 10 mm de espesor, con esto se garantizó el drenaje inferior en el suelo. A continuación, se llenó la caja hasta quedar 10 mm por debajo del borde superior, lo que permitió la posterior colocación del papel filtro y la placa acrílica perforada para simular el drenaje superior del suelo. Finalmente, se colocó la placa de transferencia de carga y se llevó a cabo la consolidación del suelo de fundación en los consolidómetros neumáticos.

Se aplicaron cuatro incrementos de carga sucesivos: 3.12 kPa, 6.25 kPa, 12.5 kPa hasta alcanzar los 25 kPa. Los cambios de carga fueron controlados mediante el método de Taylor, a partir de la elaboración de gráficas de deformación vs. raíz de tiempo, donde se obtuvo el valor del  $t_{90}$ . Con base en este valor, se estimó el tiempo necesario para que el suelo alcanzara el 90% de la consolidación primaria.

El proceso de carga para cada modelo duró aproximadamente 8 días y, el espesor del suelo una vez culminada la consolidación fue de aproximadamente 9.5 m en el prototipo. Luego, se realizó un corte con sierra de hilo para asegurar los 6.5 m de altura del suelo de fundación en el prototipo.



Validado esto, se continuó con el montaje y consolidación del suelo del terraplén. Para finalizar, se ajustó la geometría de los terraplenes en los dos modelos, como se representa en la Figura 41.

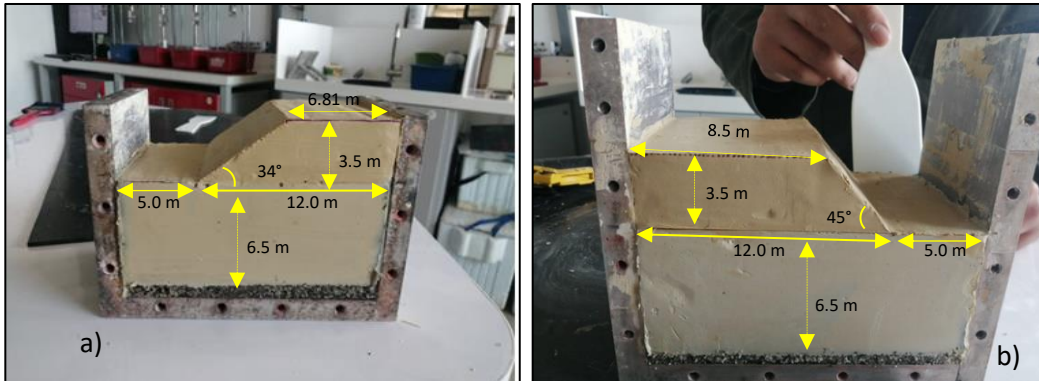


Figura 41. Conformación geométrica del terraplén en el prototipo en a)  $34^\circ$  de inclinación y en b)  $45^\circ$  de inclinación

Fuente: elaboración propia

#### 5.4.2 Vuelo en la centrifuga geotécnica.

Para llevar a cabo esta fase, se trazó una cuadrícula de 50 mm x 50 mm en las caras frontal y posterior de los modelos utilizando azul de metileno. Este proceso permite visualizar y analizar las superficies de falla después del vuelo.

Acorde con lo anterior, se colocaron los modelos diseñados para terraplenes con ángulos de inclinación de  $34^\circ$  y  $45^\circ$  en la centrifuga geotécnica y, se dio inicio al proceso de vuelo a 100 g durante un período de 10 minutos.

Para el terraplén con  $34^\circ$  de inclinación, se observa una superficie de falla en forma de cuña. El suelo de fundación debido a la carga transmitida por el terraplén se desplazó en dirección hacia la berma, y tanto el suelo de fundación, como el terraplén experimentaron deformación. La Figura 42 muestra la superficie de falla del modelo.

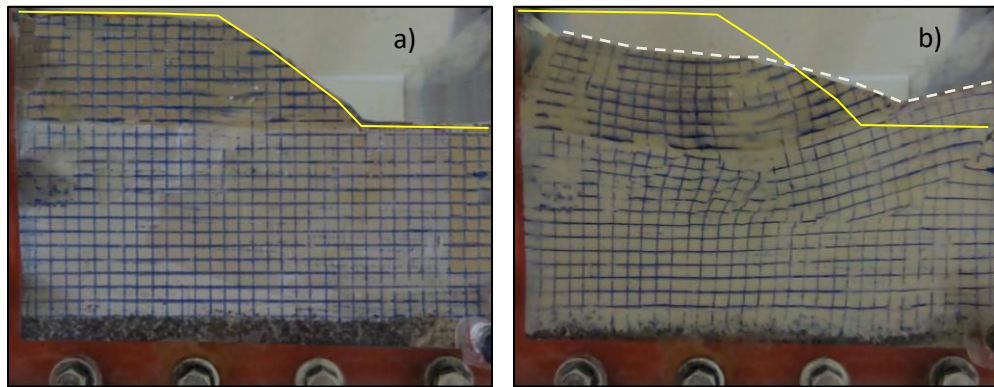


Figura 42. Modelo de terraplén con ángulo de inclinación de  $34^\circ$  en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo en centrífuga geotécnica  
Fuente: elaboración propia

Con relación al terraplén con una inclinación de  $45^\circ$ , se destaca la falla que se produjo en la zona de inclinación del terraplén casi inmediatamente después de iniciado el vuelo en la centrífuga geotécnica. Lo anterior, se indica en la Figura 43.

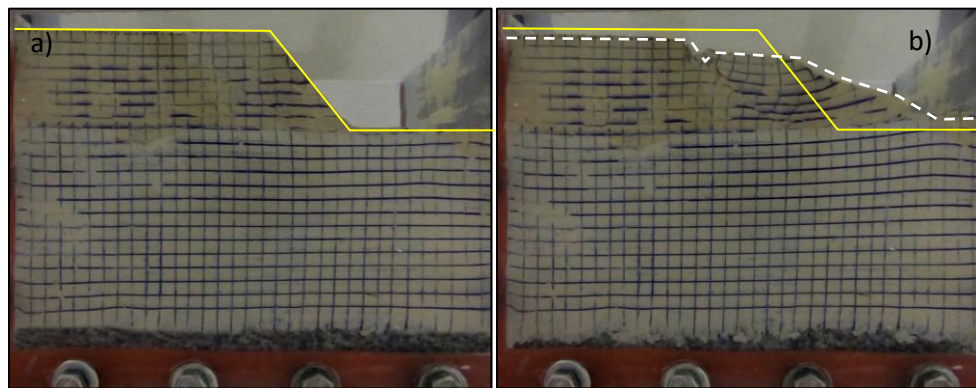


Figura 43. Modelo de terraplén con ángulo de inclinación de  $45^\circ$  en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo en centrífuga geotécnica  
Fuente: elaboración propia

La extrema inclinación del terraplén lleva a que el suelo no pueda soportar la carga impuesta por él. Esto, a su vez, conduce a la falla del terraplén, con consecuencias graves para la infraestructura y la seguridad, en el caso de que se construyan terraplenes con tales inclinaciones en situaciones reales. Desde una perspectiva geotécnica, el uso de inclinaciones extremas en los terraplenes resulta poco práctico y arriesgado debido a la inestabilidad y la pérdida de capacidad de carga del suelo. Estos hechos respaldan el motivo por el cual las especificaciones de construcción de carreteras en

Colombia limitan las pendientes de los terraplenes, a fin de garantizar siempre la estabilidad en los mismos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se descartó el análisis de terraplenes con ángulos de inclinación diferentes a  $34^\circ$ . En consecuencia, el ensayo de los modelos físicos fue replanteado.

Por otra parte, se evaluó la resistencia al corte no drenada del suelo de fundación en los modelos utilizando una miniveleta y, los valores resultantes de estas pruebas se situaron alrededor de los  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ , equivalente a  $9.8 \text{ kPa}$ . La Figura 44 detalla el proceso.

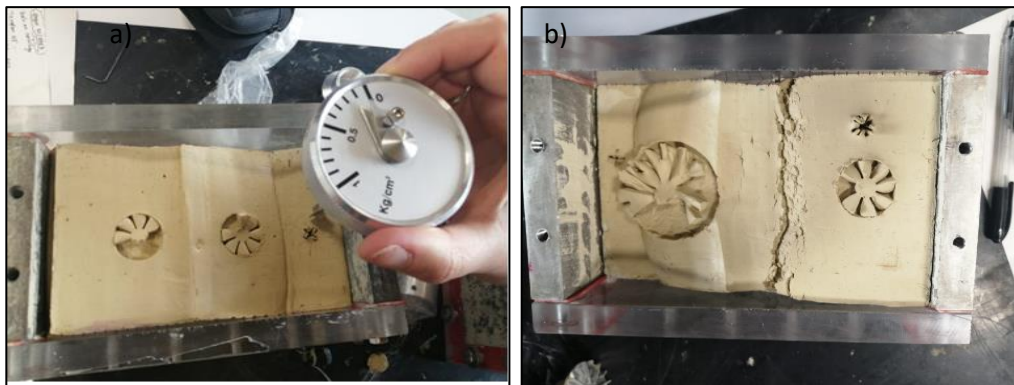


Figura 44. Ensayo con miniveleta en a) modelo de terraplén con ángulo de inclinación de  $34^\circ$ , en b) modelo de terraplén con ángulo de inclinación de  $45^\circ$ .

Fuente: elaboración propia

## 5.5 Preparación y ensayo de los modelos con mejoramiento

En la construcción de los modelos presentados en este numeral, se siguió el proceso de fabricación tanto del suelo de fundación como del terraplén detallado en el numeral anterior.

Con relación a la lechada de suelo cemento, la mezcla de diseño corresponde a una dosificación 1 S:1.25 W:1.25 C, como se especificó en el numeral relacionado con la caracterización de materiales.

### 5.5.1 Modelo $D= 0.6\text{m}$ , $S= 2D$ y terraplén con ángulo de inclinación de $34^\circ$ .

En este numeral, se detalla el proceso de preparación y ensayo del modelo. Se mencionan los elementos utilizados en el proceso de perforación e inyección de la lechada. Además, se realiza la descripción visual el estado de las columnas de suelo cemento posterior al vuelo.

### 5.5.1.1 Preparación

Para la preparación de este modelo se utilizó una plantilla sobre el suelo de fundación con la configuración geométrica de las columnas. A partir de este punto, se inició la simulación del proceso de perforación de las columnas utilizando una broca de 6.0 mm de diámetro manteniendo constante la rotación de la misma. En este modelo se consideró un total de 63 columnas. Lo anterior se muestra en la Figura 45.

Para este modelo, se determinó una separación de 18 mm entre las columnas y las áreas que se encuentran en contacto con las paredes de la caja.

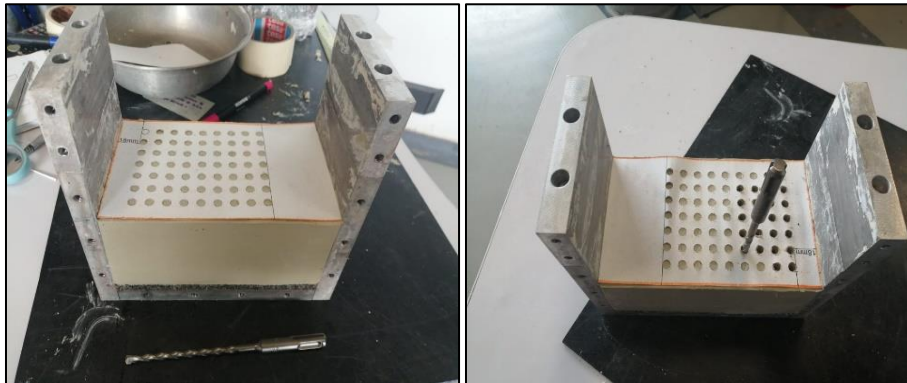


Figura 45. Perforación de columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro,  $S=2D$   
Fuente: elaboración propia

El proceso de perforación y posterior inyección (realizado con una jeringa) se llevó a cabo de forma manual. Aunque esta limitación no compromete la validez del estudio, es importante tener en cuenta que no se fue posible controlar variables relevantes relacionadas con la forma de las paletas de mezclado, la presión de inyección de la lechada y la velocidad de rotación durante la perforación.

Durante el proceso de inyección de la lechada, se observó una fractura y un ensanchamiento lateral del suelo, tal como se ilustra en la Figura 46. Aunque estos factores pueden analizarse desde una perspectiva técnica mediante el control de las variables asociadas a los equipos que influyen en la perforación y la inyección en la técnica del *soil mixing*, en este trabajo de grado se propondrán algunas posibles explicaciones basadas en observaciones puramente experimentales.

Como se mencionó previamente, la inyección de la lechada se realizó con una jeringa de 5 ml. Esto implica que, debido a su área transversal, la presión ejercida para impulsar la lechada y, por ende,

formar la columna, posiblemente superó la resistencia del suelo lateral. Esto puede explicar la fractura y el ensanchamiento observado en el modelo.

Una vez completado el proceso de inyección, se inició el proceso de curado que se extendió durante 7 días. Transcurrido el tiempo de curado, se realizó al montaje del material para el terraplén para finalmente llevar a cabo el vuelo.

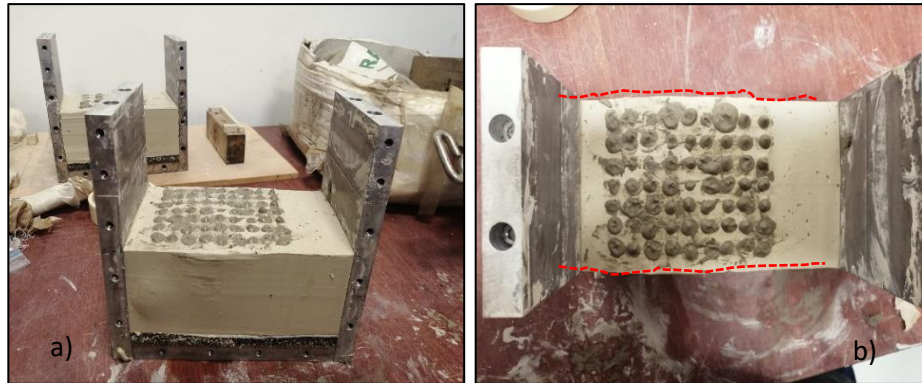


Figura 46. En a) Inyección de lechada de suelo cemento para columnas de 0.6m de diámetro,  $S=2D$ , en b) ensanchamiento del suelo de fundación

Fuente: elaboración propia

### 5.5.1.2 Vuelo en centrífuga geotécnica

El vuelo fue realizado a 100 g durante 10 minutos. Después del vuelo, no se observaron superficies de fallas, sin embargo, el modelo experimentó una deformación, tal como se indica en la Figura 47.

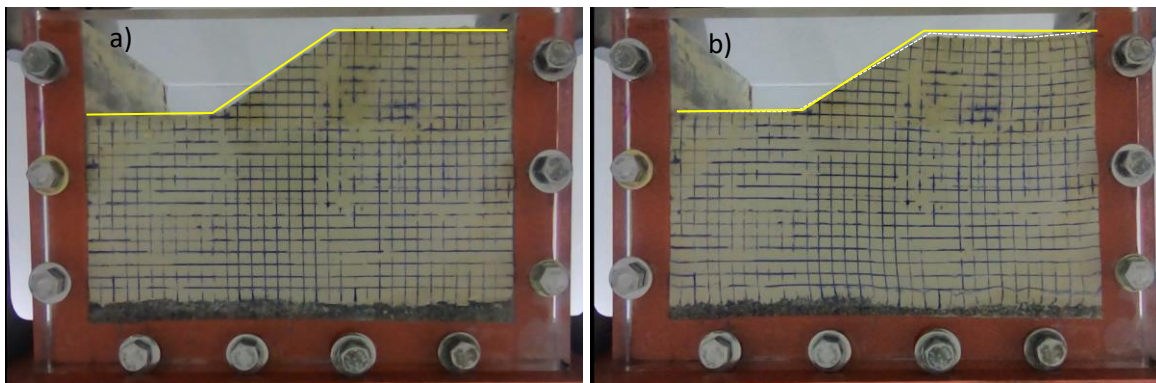


Figura 47. Modelo de columnas de suelo cemento de  $D=0.6m$ ,  $S= 2D$  en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo.

Fuente: elaboración propia

Con el propósito de evaluar posibles afectaciones en las columnas de suelo cemento o la presencia de fracturas internas en el suelo retiró la capa correspondiente al terraplén del modelo, y se realizó a la revisión del estado de las columnas de suelo cemento identificando lo siguiente:

1. La continuidad de las columnas no se garantizó en la mayoría de los elementos, lo cual podría estar estrechamente relacionado con la aplicación excesiva de presión en la lechada durante el proceso de inclusión, explicando a su vez la poco significativa deformación presentada en el suelo de fundación.
2. En algunos casos, el diámetro de las columnas no se mantuvo constante a lo largo de su profundidad, evidenciándose un ensanchamiento aproximadamente a dos tercios de su altura, como se indica en la Figura 48
3. En la zona de inclinación del terraplén, se observó un desplazamiento lateral de las columnas, resaltado de color rojo en la Figura 48. Esto valida lo propuesto por Kitazume et al. (2006), quienes sugirieron en su investigación que, en un análisis de estabilidad interna, las columnas pueden fallar por cortante, a flexión y torsión, mientras que en un análisis de estabilidad externa, tienden a fallar por volcamiento. Estos planteamientos se basaron en la modelación física en la centrífuga geotécnica de un suelo blando con una humedad cercana al 120%, una condición que se asemeja a la de nuestro caso de estudio. Con propósitos experimentales, los investigadores optaron por sustituir las columnas de suelo-cemento por tubos de acrílico. En lo que respecta a la capacidad de resistencia, tanto la tipología presentada en las columnas analizadas por los autores previamente mencionados, como la que se ha investigado en este estudio muestran similitudes significativas, independientemente del material constitutivo de las columnas utilizado en el estudio.

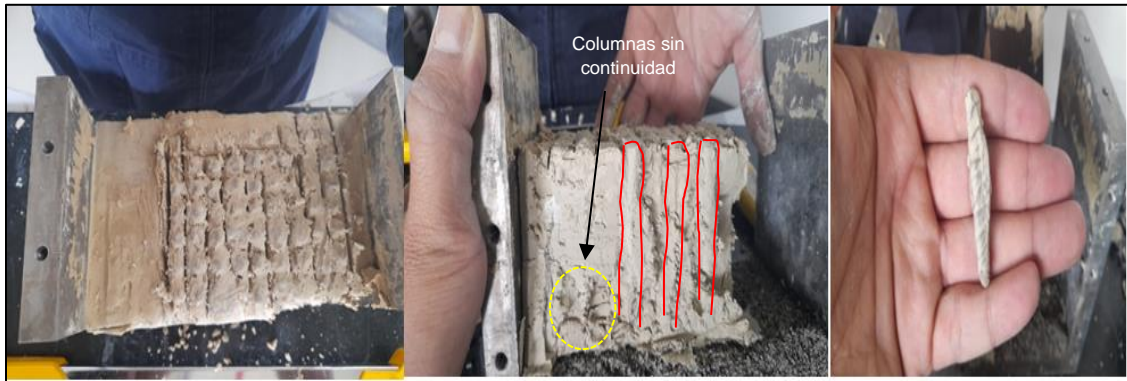


Figura 48. Auscultación de las columnas en el modelo de  $D=0.6\text{m}$  ,  $S= 2D$  después del vuelo en centrífuga geotécnica  
Fuente: elaboración propia

### 5.5.2 Modelo $D= 1.0\text{ m}$ , $S= 2D$ y terraplén con ángulo de inclinación de $34^\circ$

Uno de los aspectos de mayor importancia en la aplicación de técnicas de mejora en suelos blandos es el costo económico. Por lo tanto, la evaluación de la eficiencia de la técnica de *soil mixing* en función del diámetro de los elementos a incorporar se vuelve relevante. A continuación, se describen aspectos importantes relacionados con la preparación y ensayo del modelo con  $D=1.0\text{m}$  y  $S=2D$ .

#### 5.5.2.1 Preparación

De forma similar al modelo anterior, se diseñó la disposición geométrica de las columnas en una malla cuadrada. A continuación, se realizó el proceso de perforación de las columnas utilizando una broca de  $3/8''$  de diámetro como se detalla en la Figura 49. En este modelo, se consideró un total de 20 columnas.



Figura 49. Perforación y construcción de columnas de suelo cemento de 1.0 m de diámetro, S=2D  
Fuente: elaboración propia

Con relación a la inyección de la lechada, en este modelo también se evidenció la formación de grietas en el suelo en diferentes puntos de la zona tratada. Además, la jeringa utilizada no aseguraba el suministro de la lechada hasta el fondo de la perforación, lo que requirió la aplicación de una mayor presión desde la superficie para que la lechada alcanzara la profundidad necesaria.

### 5.5.2.2 Vuelo en centrífuga geotécnica

Finalizado el vuelo no se detectaron superficies de falla en el terraplén, no obstante, visualmente se observaron desplazamientos verticales. Esta deformación, sin embargo, no se encuentra estrictamente relacionada con las condiciones de resistencia del suelo, sino que presuntamente fue causada por factores externos como, una pequeña fuga de material en el orificio de instalación del record de la caja. Aunque esta fuga fue rápidamente corregida en los primeros 2 minutos del vuelo, durante este periodo de tiempo, el modelo alcanzó a deformarse. A continuación, en la Figura 50 se muestra el estado de los modelos antes y después del vuelo en la centrífuga geotécnica.



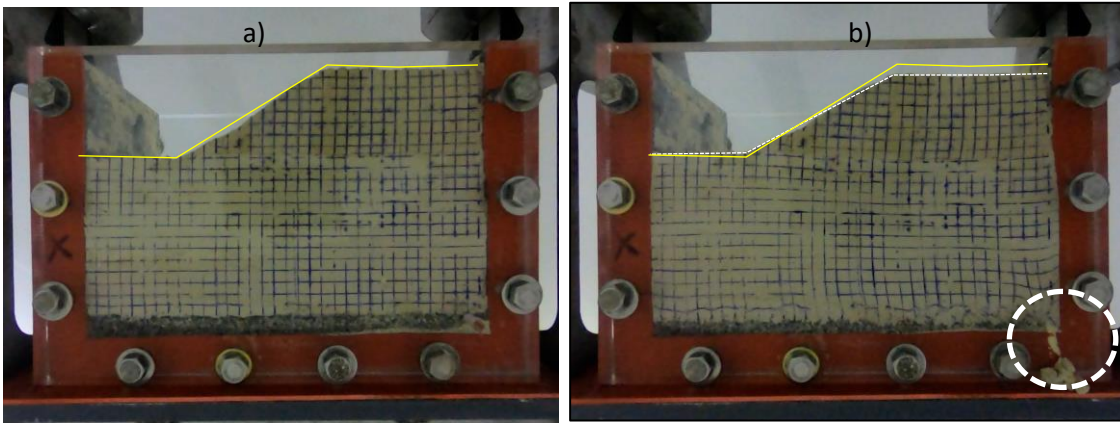


Figura 50. modelo de columnas de suelo cemento de  $D=1.0m$ ,  $S= 2D$  en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo

Fuente: elaboración propia

En la inspección del modelo después del vuelo, se observó que cinco de las 20 columnas implantadas, no conservaron una longitud continua, de hecho, no alcanzaron ni siquiera el 50% de la profundidad de diseño. Por otra parte, aproximadamente el 10% del total de las columnas presentaron vacíos internos debido a la inyección de la lechada con exceso de presión. Lo anterior se indica en la Figura 52.



Figura 51. Auscultación de columnas de suelo cemento de  $D= 1.0m$  y  $S= 2D$

Fuente: elaboración propia



Figura 52. Reducción del diámetro efectivo de columnas de suelo cemento  $D= 1.0\text{m}$  y  $S= 2D$   
Fuente: elaboración propia

A pesar de las anomalías que se presentaron en algunas columnas de suelo-cemento, principalmente atribuibles al método de inyección, el modelo no mostró superficies de falla. Esto sugiere que un aumento en el diámetro de las columnas de suelo-cemento garantiza la eficiencia de la técnica de mejora. Además, incluso en caso de presentarse problemas constructivos, no se anticipa un impacto directo en el comportamiento del suelo mejorado.

Al analizar detalladamente el modelo que emplea columnas de suelo cemento con un diámetro de 0.6 m, y el modelo que utiliza columnas de 1.0 m de diámetro, no se observa diferencias relevantes en términos de patrones de falla en el terraplén o de deformación en el suelo de fundación. Esto significa que se obtienen resultados similares en cuanto al comportamiento del suelo. Sin embargo, desde un punto de vista económico, el análisis sugiere que la utilización de diámetros mayores a 0.6 m conlleva un sobre costo significativo para el proyecto, lo cual, en la práctica, lo hace inviable.

Así las cosas, los modelos desarrollados en los siguientes numerales estarán enfocados al análisis del efecto que tiene la variación de la separación entre columnas de suelo-cemento de 0.6 m de diámetro en la mejora del suelo de fundación.

### **5.5.3 Modelo $D= 0.6$ m, separación $S= 3D$ y un ángulo de inclinación del terraplén de $34^\circ$ .**

Como se mencionó en los numerales anteriores, el elemento utilizado para la inyección de la lechada de suelo-cemento ocasionó excesos de presión, generando la fractura del suelo de fundación y la falta de garantía en la continuidad de los elementos tipo columna en los modelos. En razón de

lo anterior, en la preparación del modelo se realizaron ajustes en el equipo de inyección. De igual manera, el ensayo del modelo permitió identificar las superficies de falla presentadas y la inspección visual del estado de las columnas al interior del modelo. Aspectos que se tratarán con mayor detalle a continuación.

### 5.5.3.1 Preparación

Teniendo en consideración los efectos de la presión de inyección en el modelo, la preparación del modelo presentó algunas variaciones. La primera consistió en la adaptación de una manguera de 15 cm de longitud, con la que se permitió la evacuación gradual de la lechada desde el fondo del estrato a mejorar hasta la superficie. La segunda fue modificar la separación de las columnas en los bordes de la caja y así evitar el ensanchamiento lateral del modelo. La perforación y posterior construcción de las columnas se muestra en la Figura 53.

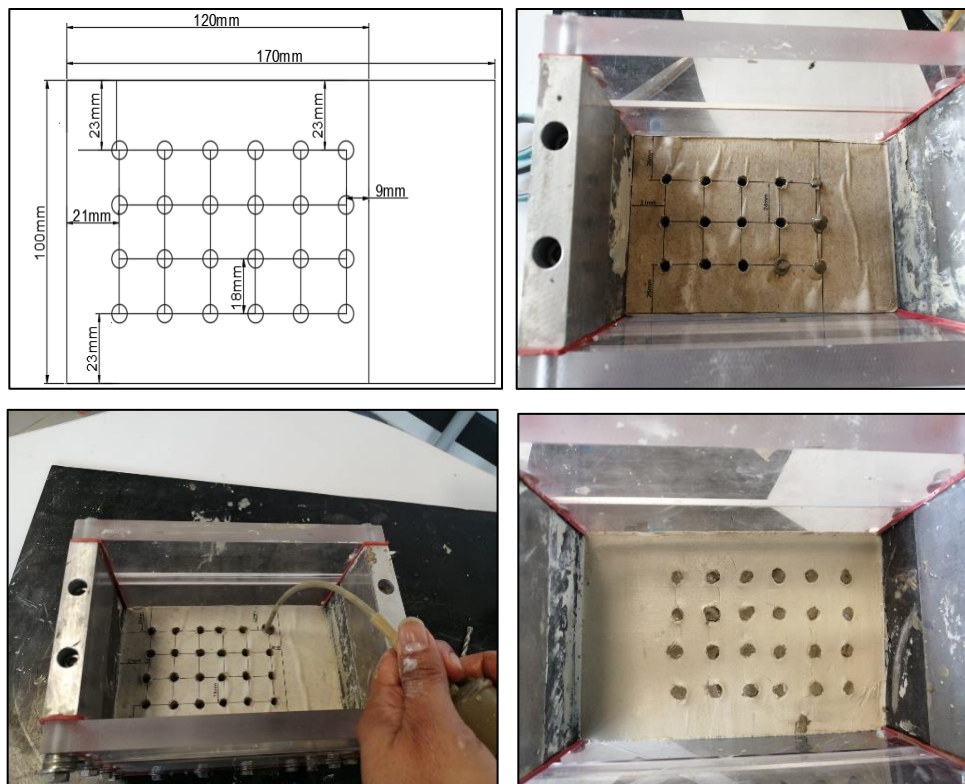


Figura 53. Perforación y construcción de columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y  $S=3D$   
Fuente: elaboración propia

### 5.5.3.2 Vuelo en centrífuga geotécnica

El modelo experimentó una deformación evidente en el suelo de fundación, acompañada de una falla circular prácticamente circunscrita hasta la profundidad del estrato mejorado, como se muestra en la Figura 54. En la parte superior del terraplén, no se observaron fracturas, pero se evidenció asentamiento en la estructura del mismo. Se realizó el registro fotográfico del estado de los modelos antes y después como se muestra en la Figura 54.

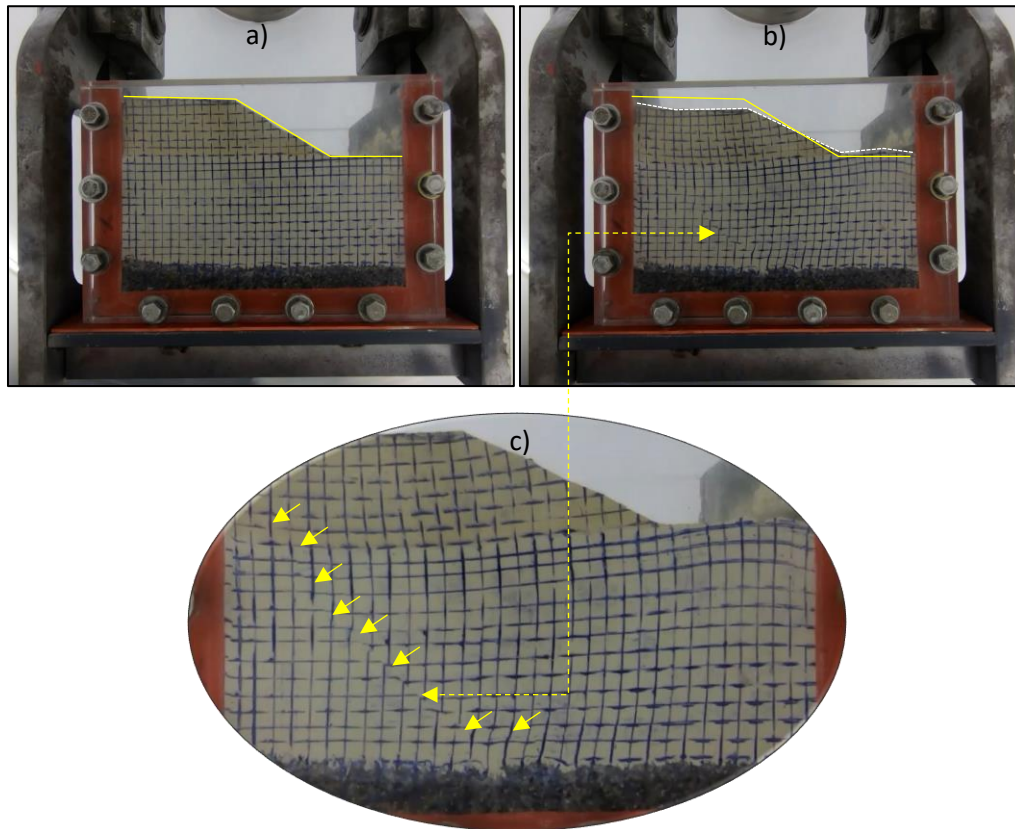


Figura 54. Modelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y  $S= 3D$ . en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo, en c) zoom de la superficie de falla presentada.

Fuente: elaboración propia

Después de cada vuelo de los modelos con mejoramiento del suelo de fundación, se observó una fina lámina de agua, la cual se disipa rápidamente, como se ilustra en la Figura 55. Este fenómeno podría atribuirse, entre otras cosas, a la posibilidad de desplazamiento del agua y la lechada de suelo-cemento durante la vibración y aceleración generadas en la centrífuga geotécnica.

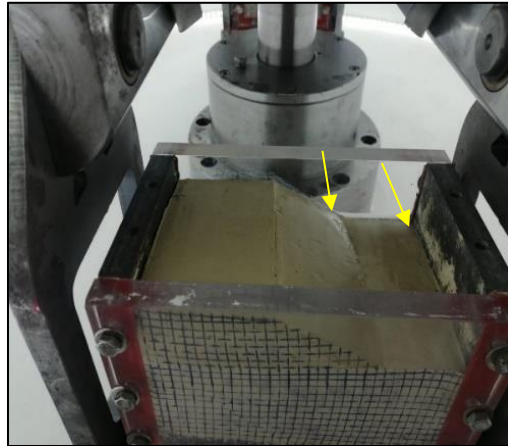


Figura 55. Lámina de agua en la superficie del modelo de suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y  $S= 3D$  posterior al vuelo.  
Fuente: elaboración propia

También se determinó la resistencia al corte no drenada del suelo de fundación. Para ello, se utilizaron dos miniveletas, cuyo posicionamiento se muestra en detalle en la Figura 56. Los valores resultantes de estas pruebas se situaron alrededor de los  $0.1 \text{ kg/cm}^2$ , equivalente a  $9.8 \text{ kPa}$ .

A pesar de que estos resultados pueden parecer algo distantes de los valores informados en ensayos de compresión inconfiada,  $S_u=5.64 \text{ kPa}$ , presentados en la Tabla 5. Estas mediciones proporcionan una aproximación de la resistencia al corte no drenada en el suelo de fundación sin las mejoras implementadas.



Figura 56. Ensayo de resistencia al corte no drenado con miniveleta sobre el suelo de fundación sin mejora en el área de berma del modelo con  $D=0.6\text{m}$  y  $S= 3D$ .  
Fuente: elaboración propia

En cuanto a las columnas de suelo cemento, se pudo constatar de manera satisfactoria la continuidad de todos los elementos hasta alcanzar la profundidad de diseño. Esto indica que la

modificación realizada al equipo de inyección resultó acertada. Además, el diámetro de las columnas se mantuvo sin alteraciones a lo largo de la profundidad.

De manera similar a los modelos previamente ensayados, las columnas experimentaron un desplazamiento lateral hacia el talud del terraplén y, adicionalmente, se evidenció una falla por cortante a dos tercios de su profundidad. Las fracturas de las columnas se muestran en la Figura 57.

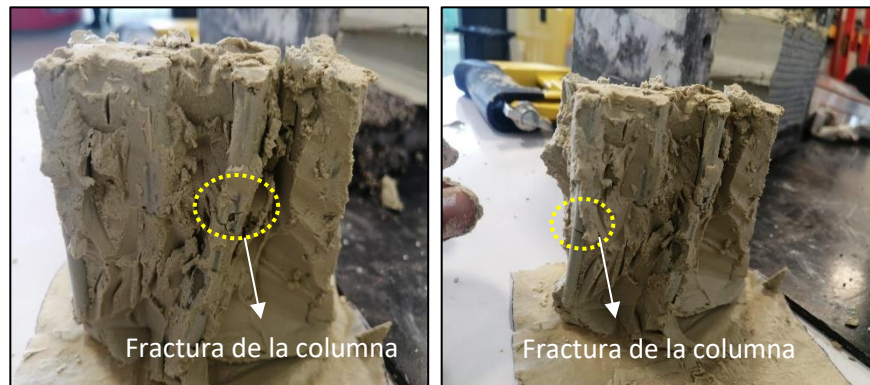


Figura 57. Fractura en columnas de suelo cemento en modelo con  $D=0.6\text{m}$  y  $S= 3D$ .  
Fuente: elaboración propia

#### **5.5.4 Modelo $D= 0.6\text{ m}$ , separación $S= 4D$ y un ángulo de inclinación del terraplén de $34^\circ$ .**

A continuación, se mencionan los aspectos más relevantes de la preparación y ensayo del modelo con  $S=4D$ . Con este y los modelos descritos en los numerales anteriores, será posible establecer la relación existente entre la separación de las columnas de suelo-cemento y la estabilidad del terraplén.

##### **5.5.4.1 Preparación**

En este modelo se realizó la perforación y posterior construcción de quince columnas de suelo-cemento como se indica en la Figura 58. De la misma manera que en los modelos anteriores, en este se mantuvo constante el periodo de curado y las condiciones de consolidación y construcción tanto del suelo de fundación como del terraplén.

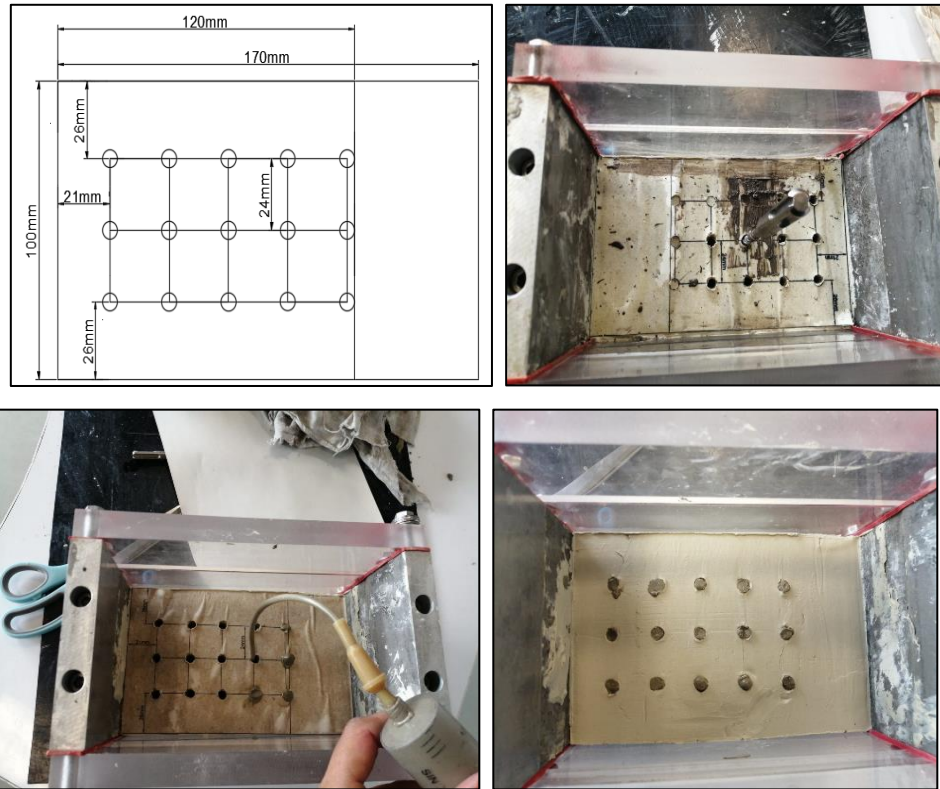


Figura 58. Implantación, perforación y construcción de columnas de suelo cemento en modelo con  $D=0.6m$  y  $S= 4D$ ,  
Fuente: elaboración propia

#### 5.5.4.2 Vuelo en centrífuga geotécnica

Visualmente en este modelo, las superficies de falla y la deformación presentada en el suelo de fundación son notablemente similares a las que se obtendrían en un suelo sin mejora. En otras palabras, cuando la separación entre los centros de las columnas de suelo-cemento es igual o mayor a 3 veces el diámetro de dichas columnas ( $3D$ ), el comportamiento del suelo es prácticamente indistinguible del de un suelo sin tratamiento de mejora. No obstante, con el análisis de imágenes presentado en el numeral 6.4.3 estas afirmaciones serán validadas. El registro fotográfico del estado de los modelos antes y después del vuelo como se muestra en la Figura 59.

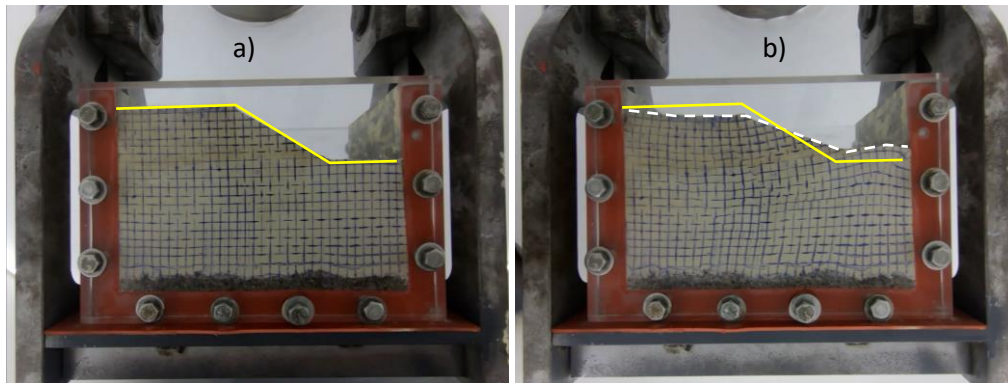


Figura 59. Modelo de suelo mejorado con columnas de suelo cemento de 0.6 m de diámetro y  $S=4D$ . en a) antes del vuelo, en b) después del vuelo.

Fuente: elaboración propia

En este modelo también se realizaron ensayos de resistencia al corte no drenada con minivileta. Los resultados obtenidos fueron de 9.8 kPa.

Tras retirar la capa superior del terraplén en el modelo, se confirmó la continuidad de todas las columnas de suelo cemento hasta la profundidad de diseño. Sin embargo, se observó que algunos de estos elementos presentaban un ensanchamiento en su diámetro a mayor profundidad. Esto se debe a que, a medida que la lechada se desplaza hacia abajo en las columnas, es posible que experimente cierta expansión lateral y esto podría resultar en un ensanchamiento del diámetro de las columnas en esas áreas específicas.

Se mantuvo el desplazamiento lateral de las columnas, como se había observado en modelos anteriores. Además de esto, se identificó una falla por cortante en ciertos elementos ubicada a aproximadamente  $1/3$  y  $2/3$  de su altura, como se representa en la Figura 60. Una posible explicación para sustentar la aparición de fallas por cortante a  $1/3$  y  $2/3$  de la altura de algunas columnas podría estar vinculada a la distribución desigual de las tensiones en el suelo, generando zonas de debilidad en esos puntos específicos de las columnas.



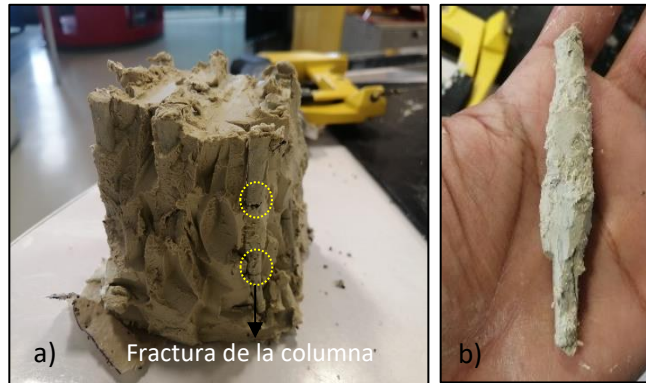


Figura 60. En a) falla por cortante en columna de suelo-cemento a  $1/3H$  y  $2/3H$ , en b) ensanchamiento del diámetro de columna de suelo-cemento a profundidad  
Fuente: elaboración propia

### 5.5.5 Modelos complementarios para el suelo de fundación con mejora

Se han propuesto dos modelos adicionales conservando un diámetro de columna de 0.6 m, pero se varía la distribución de las columnas dentro del terraplén. En otras palabras, la intención de estos modelos consistió en evaluar el impacto en la mejora del suelo cuando las columnas se construyen únicamente bajo el cuerpo del terraplén y cuando se combinan con un sistema de pantalla en la zona del talud. Los detalles y resultados de estos modelos se presentan en los siguientes numerales.

#### 5.5.5.1 Modelo $D=0.6m$ , $S=2D$ y distribución solo en el cuerpo del terraplén

A continuación, se mencionan aspectos de la preparación y ensayo del modelo. Se mencionan los elementos utilizados en el proceso de perforación e inyección de la lechada. Además, se realiza la descripción visual del estado de las columnas de suelo cemento posterior al vuelo.

##### 5.5.5.1.1 Preparación.

El suelo de fundación y el terraplén fueron preparados siguiendo el procedimiento descrito en los modelos anteriores. Para la construcción de las columnas, se utilizó una plantilla con una distribución cuadrada de 30 columnas, ubicadas únicamente bajo el cuerpo del terraplén. Posteriormente, se inyectó la lechada y se cumplió el periodo de curado correspondiente a 7 días. El proceso de construcción de las columnas de suelo cemento, se indica en la Figura 61.

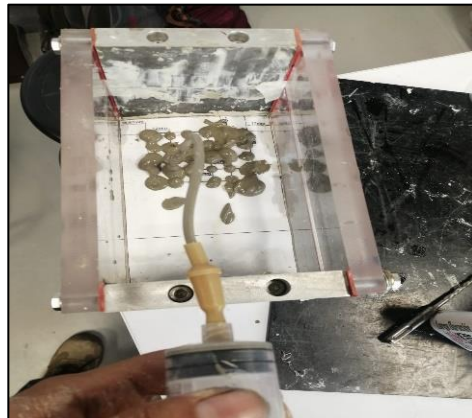
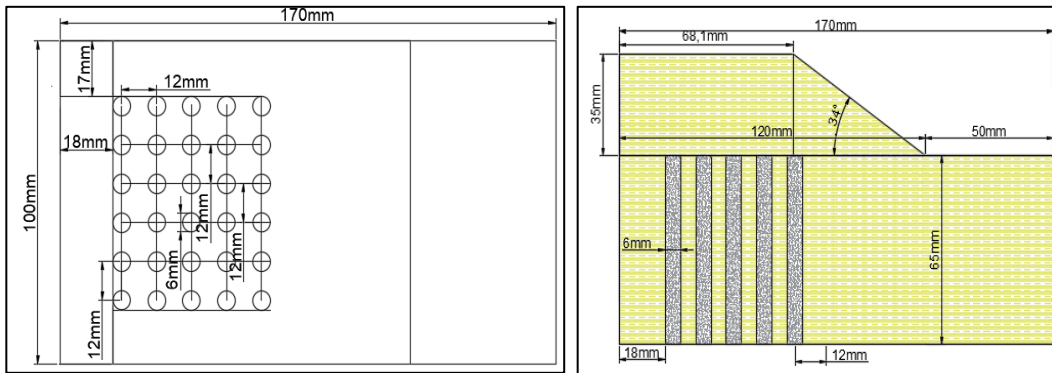


Figura 61. Construcción de columnas de suelo cemento de  $D= 0.6m$ ,  $S= 2D$  en el cuerpo del terraplén  
Fuente: elaboración propia

#### 5.5.5.1.2 Vuelo en centrifuga geotécnica

En este modelo debido a la ausencia de soporte o rigidez en el suelo de fundación en la zona del talud del terraplén, este experimentó la falla del terraplén en el primer minuto de iniciado el vuelo a 100 g, lo anterior se ilustra en la Figura 62. Con relación al suelo de fundación, no se observaron deformaciones evidentes tras la finalización del vuelo.

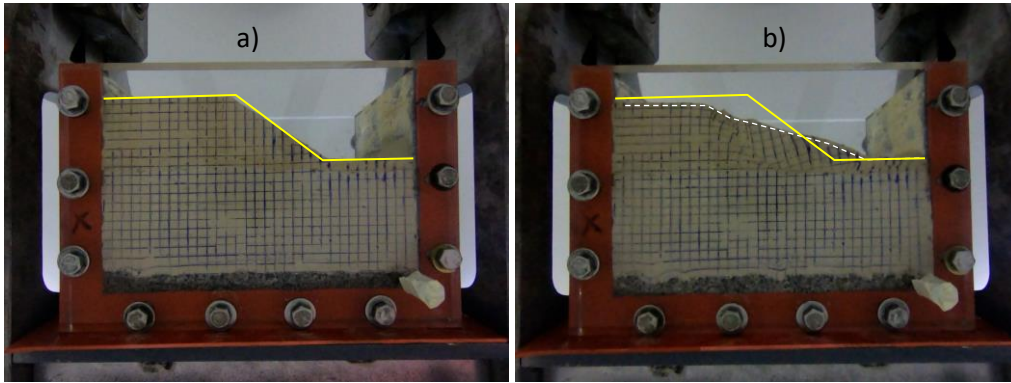


Figura 62. Modelo con columnas de suelo cemento con  $D=0.6m$ ,  $S=2D$  distribuidas en el cuerpo del terraplén antes del vuelo, en a) antes del vuelo y en b) después del vuelo. Fuente: elaboración propia

Después de retirar la capa superior del terraplén en el modelo, se observó que no se garantizó la continuidad de todas las columnas de suelo cemento hasta la profundidad de diseño, como se muestra en la Figura 63. También se notó que el desplazamiento lateral de las columnas se mantuvo constante, similar a los otros modelos. A pesar de la ausencia de refuerzo en la zona del talud del terraplén, la separación entre las columnas de  $S=2D$  proporciona la rigidez necesaria al suelo para evitar su fallo.



Figura 63. En a) continuidad de la columna y en b) inclinación de la columna para el modelo  $D=0.6m$ ,  $S=2D$  y columnas bajo el cuerpo del terraplén. Fuente: elaboración propia

### 5.5.5.2 Modelo $D=0.6m$ , $S=3D$ con distribución de columnas en el cuerpo y pantallas en el talud del terraplén.

La correspondiente a la disposición de las columnas y pantallas bajo el terraplén, se llevó a cabo siguiendo recomendaciones del FHWA (2013). Este manual sugiere que bajo el cuerpo del terraplén

se dispongan columnas con una separación centro a centro definida de acuerdo a los requerimientos del proyecto, y en la zona de inclinación del terraplén, se proyecte la construcción de un sistema de pantalla mediante columnas contiguas.

#### **5.5.5.2.1 Preparación**

Después de definir la disposición de las 15 columnas y las 5 pantallas en el modelo, se continuó con el proceso de perforación e inyección de la lechada de suelo cemento, el proceso de indica en la Figura 64. Cada pantalla se diseñó considerando la incorporación de seis columnas sin separación entre sus centros. Esto resultó en un ensanchamiento de los elementos en la parte inferior de las perforaciones. En la inyección de lechada, se presentó una pequeña fractura del suelo, tal como se ilustra en la Figura 65. Además, algunos elementos aparentaron estar completamente llenos, pero en realidad el llenado no fue uniforme.

A raíz de esta experiencia, en futuras investigaciones se sugiere modificar el proceso de construcción de las columnas. Se propone verter la lechada en columnas intermedias en una etapa inicial y luego, después del fraguado, proceder con la perforación e inyección de lechada en las columnas restantes. Esto garantizará la continuidad en todos los elementos y la uniformidad del proceso constructivo, aunque requiera aumentar el tiempo de construcción de los modelos.

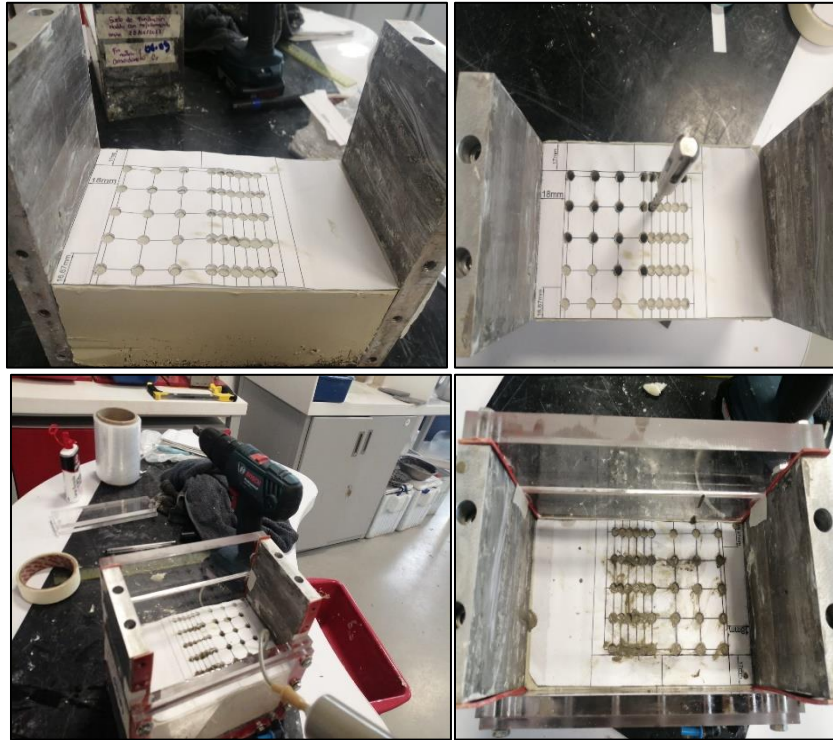


Figura 64. Construcción de columnas de suelo cemento con  $D= 0.6m$ ,  $S= 3D$  distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud.  
Fuente: elaboración propia



Figura 65. Inicio de curado de las columnas de suelo cemento con  $D= 0.6m$ ,  $S= 3D$  distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud.  
Fuente: elaboración propia

#### 5.5.5.2.2 Vuelo en la centrífuga geotécnica

El vuelo fue realizado a  $100 g$  durante 10 minutos y una vez concluido, se realizó el registro fotográfico del estado del modelo antes y después del vuelo como se detalla en la Figura 66. La inspección visual realizada permitió identificar deformación en el suelo de fundación y el terraplén así como la aparición de superficies de falla.

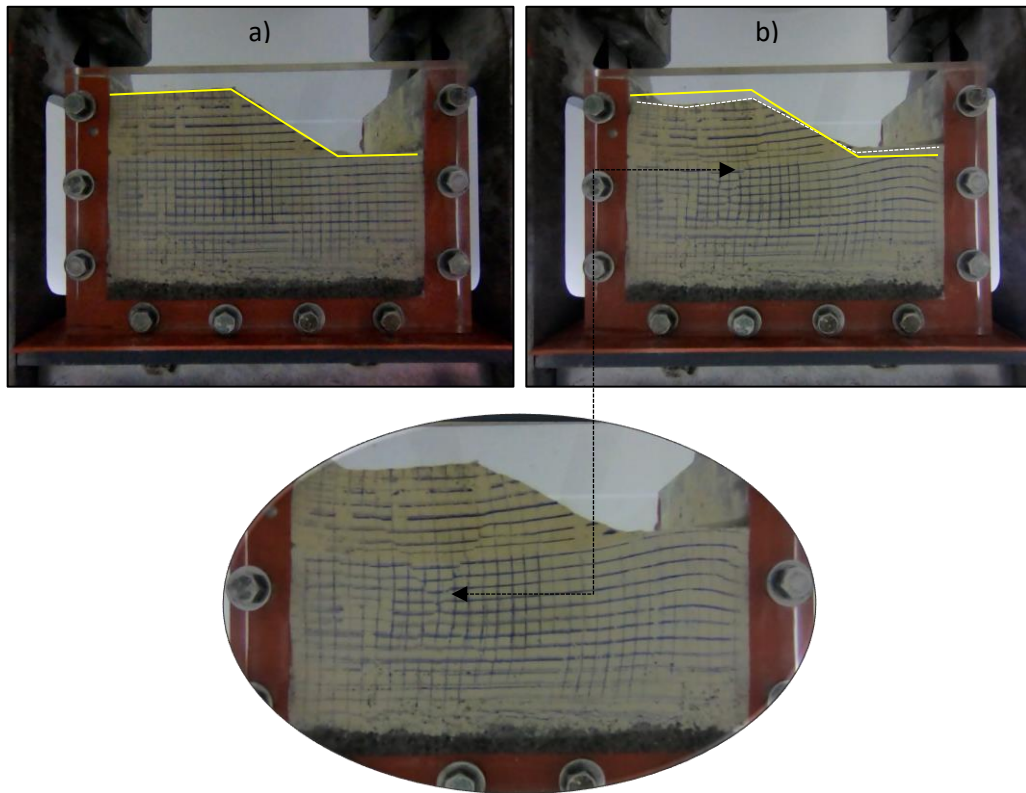


Figura 66. Modelo con columnas de suelo cemento con  $D=0.6m$ ,  $S=3D$  distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud, en a) antes del vuelo, b) después del vuelo y c) zoom de la superficie de falla presentada.

Fuente: elaboración propia

El análisis visual de las superficies de falla y la deformación observada en el suelo de fundación sugiere similitud con las que se presentan en un suelo sin ningún tipo de mejora. En otras palabras, dos factores impactan la eficacia del proceso de mejora en este modelo. En primer lugar, como se discutió previamente, las separaciones mayores a  $S=2D$  no proporcionan la rigidez necesaria que el suelo requiere para soportar las cargas aplicadas. En segundo lugar, la construcción de las pantallas plantea desafíos, ya que la falta de continuidad en los elementos, junto con la no uniformidad de la mezcla dentro de los elementos, no contribuyó a la mejora del suelo en la zona del talud del terraplén. Lo anterior se muestra en la Figura 67.

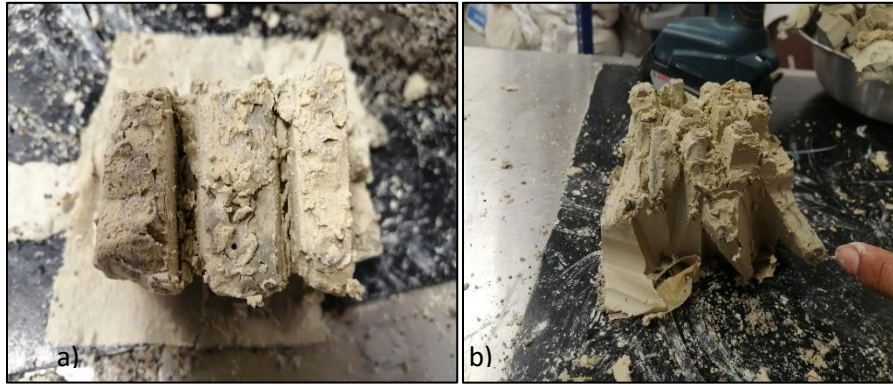


Figura 67. En a) Estado de las pantallas, en b) estado de las columnas de suelo cemento con  $D= 0.6m$ ,  $S= 3D$  distribuidas en el cuerpo del terraplén y pantallas en el talud después del vuelco  
Fuente: elaboración propia

## 6 Análisis de resultados

En este capítulo, se realiza la discusión de los análisis de resultados de los ensayos de resistencia, el cálculo del área tratada, la determinación de asentamientos teóricos y el análisis de imágenes para los modelos con suelo de fundación sin mejora, y los modelos mejorados con columnas de suelo-cemento para separaciones  $S=2D$ ,  $S=3D$  y  $S=4D$ .

### 6.1 Condiciones de drenaje en ensayos de resistencia, CD

Para evaluar la estabilidad de terraplenes apoyados sobre suelos blandos, es recomendable entender el comportamiento de la presión de poros durante y después de la etapa de construcción. Es por tal razón que definir apropiadamente los análisis en condición drenada, o no drenada resultan fundamentales para garantizar el cumplimiento de los factores de seguridad normativos. (Gerscovich, 2015).

Considerando que la situación más crítica en terraplenes sobre suelos blandos ocurre al final de la etapa constructiva, desde el punto de estabilidad, las condiciones no drenadas de resistencia son las ideales. Bajo esta situación, se entiende que al final de la construcción los factores de seguridad disminuyen debido al incremento de la presión de poros y a medida que esta se disipa, se logra un aumento del FS. Con lo anterior, se soporta la ejecución del ensayo de corte directo (CU) realizado.

Para determinar la velocidad del ensayo de corte (CU), se consultaron diversas fuentes en busca de orientación. Un estudio experimental previamente realizado por Frikha et al. (2017) en el contexto de la mejora de suelos blandos en Túnez mediante la instalación de columnas de suelo cemento con un diámetro de 0.6 m, llevó a cabo ensayos triaxiales CU bajo esfuerzos de confinamiento de 100 kPa, 150 kPa y 200 kPa, aplicando una velocidad de falla de 0.03 mm/min, respectivamente.

Por otro lado, se encontró un estudio relacionado en el que se efectuó un ensayo de corte a gran escala en una muestra de suelo mejorado con columnas de grava, realizado por Majid et al. (2019). Lo anterior se ilustra en la Figura 68. Aunque este estudio no define explícitamente la velocidad del ensayo, las condiciones de ejecución guardan similitud con las aplicadas en el presente estudio. Por consiguiente, se adoptó una velocidad de corte de 0.04 mm/min. Esta elección se basa en valores similares utilizados en investigaciones previas y se justifica por la naturaleza del ensayo, que busca



evitar el drenaje del agua en la muestra. En consecuencia, el uso de velocidades más altas carecería de sentido dadas las condiciones de consolidación no drenada que se pretenden simular.

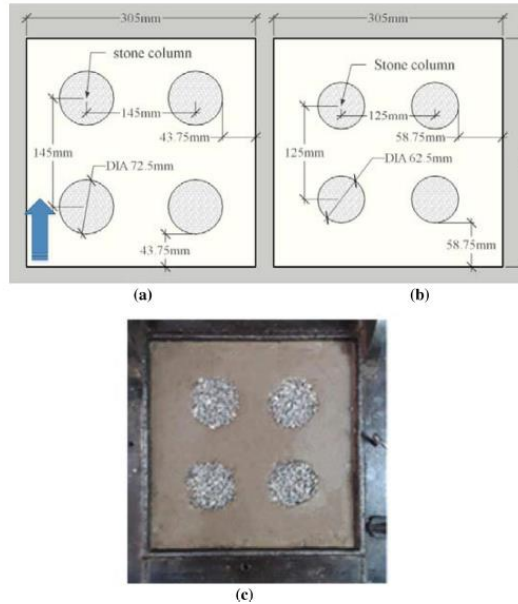


Figura 68. En a) área de tratamiento del 17.7% y en b) con un área de tratada del 13.3%, y en c) muestra de suelo mejorado con columnas de grava para ensayo de corte CU

Fuente: Majid , Javad , y Ganjian (2019)

En cuanto a los resultados, la Tabla 10 presenta una comparativa de los valores del ángulo de fricción interna no drenado y del intercepto de cohesión, tanto para el ensayo triaxial CU realizado por Frikha et al. (2017) como para el ensayo de corte CU efectuado por Majid et al. (2019).

Tabla 10. Comparativa de ensayos de corte directo y triaxial en investigaciones previas

Tipo de mejora	Ensayo	Autor	$\phi_{cu}$ (°)	$C_{cu}$ (kPa)
Columnas de suelo cemento con D= 0.6m	Triaxial CU	Frikha et al. (2017)	18.0	6.5
Columnas de grava	Corte directo a gran escala, CU	Majid et al. (2019).	10.0	11.0
Columnas de suelo cemento con D= 0.6m, S=2D	Corte directo, CU	Presente estudio	12.77	4.63

Fuente: elaboración propia

Esta comparación es esencial para evaluar la consistencia de nuestros resultados con investigaciones anteriores, considerándose aceptables para este trabajo de grado.

Por otro lado, cuando la separación entre los centros de las columnas de suelo cemento es igual o mayor a tres veces el diámetro de dichas columnas (3D), se observa que el comportamiento del suelo se asemeja significativamente al de un suelo sin tratamiento de mejora. En el próximo numeral, se presenta el cálculo de los porcentajes del área de suelo tratada en relación con el espaciamiento de las columnas. Esto permite establecer una relación inversamente proporcional entre la separación y la rigidez del suelo, lo que enfatiza la importancia de la separación entre las columnas en el proceso de mejora de suelos blandos.

## 6.2 Cálculo del área tratada para el suelo de fundación mejorado

El cálculo del área tratada desempeña un papel fundamental en la evaluación de la efectividad de cualquier método de mejora de suelos, por lo que en el contexto de esta investigación determinar el área afectada por la mejora es de suma importancia. El área tratada no solo se relaciona con la eficacia de la técnica de estabilización, sino que también tiene implicaciones directas en términos de costos, sostenibilidad y rendimiento a largo plazo de la obra.

Madhyannapu y Puppala (2014) presentaron las ecuaciones para calcular el área tratada en configuraciones de columnas para el mejoramiento del suelo, tanto en malla cuadrada como en malla triangular. La ecuación utilizada y correspondiente a una configuración cuadrada es la mostrada a continuación.

$$ar = \frac{\left(\frac{\pi * d_{col}^2}{4}\right)}{S_{c/c} * S_{e/e}} \quad (6)$$

En donde,

ar= área tratada

$d_{col}$  = diámetro de la columna

$S_{c/c}$  = separación medida entre centros de columnas

$S_{e/e}$  = separación de las columnas medida desde la esquina de cada elemento

Para una mejor interpretación, los valores de  $S_{c/c}$  y  $S_{e/e}$  corresponden a la zona del suelo achurada que se muestra en la Figura 69.

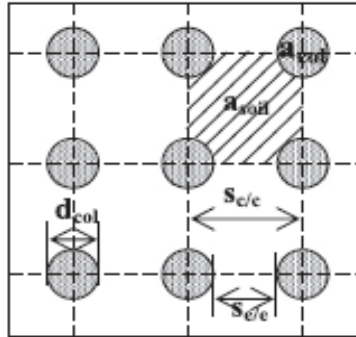


Figura 69. Representación gráfica del área tratada del suelo a través de columnas de suelo cemento en malla cuadrada

Fuente: Madhyannapu y Puppala (2014)

La Tabla 11 que se presenta a continuación proporciona el cálculo del área tratada para los modelos analizados, considerando columnas con un diámetro de 0.6 m y separaciones de  $S=2D$ ,  $S=3D$  y  $S=4D$ . Para una mejor comprensión de los datos presentados en esta tabla, la Figura 70 ilustra un ejemplo específico correspondiente al modelo con una separación de  $S=3D$ .

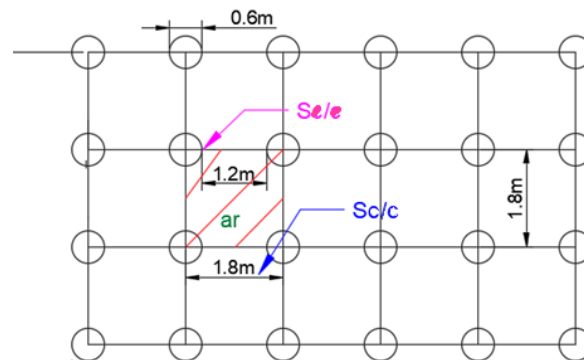


Figura 70. Determinación del área tratada para un modelo con  $S=3D$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 11. Cálculo de área tratada para modelos con  $D= 0.6m$  y  $S=2D$ ,  $S= 3D$ ,  $S= 4D$

$D_{col}$ (m)	Separación	S (m)	$A_{col}$ (m <sup>2</sup> )	$s_{c/c}$	$S_{e/e}$	Área de la malla (m <sup>2</sup> )	Área tratada (%)
0,6	2D	1,2	0,282	1,2	0,6	0,72	39%
0,6	3D	1,8	0,282	1,8	1,2	2,16	13%
0,6	4D	2,4	0,282	2,4	1,8	4,32	7%

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, el uso de columnas con un diámetro de 0.6 m y separaciones  $S=2D$  en nuestro modelo ha permitido obtener un área de suelo tratado del 39%. Este valor no es ajeno a los obtenidos en otras investigaciones, como las realizadas por Madhyannapu y Puppala (2014). Estos autores llevaron a cabo mejoras en suelos con características contracto expansivas utilizando la técnica de *soil mixing* en dos ubicaciones distintas a lo largo de la autopista I-20, al norte de Texas. En ambos sitios, se emplearon columnas de suelo cemento de 0.6 metros de diámetro, con longitudes de 3.0 a 3.6 metros y una separación de 1.06 metros para el primer sitio y de 0.9 metros para el segundo sitio. Se instalaron un total de 44 columnas en el primer sitio y 65 columnas en el segundo sitio.

En cuanto al número de columnas, es relevante señalar que nuestro modelo construido con una separación de  $S=2D$ , incluyó un total de 63 elementos. Por lo tanto, los resultados obtenidos en términos de estabilidad son congruentes con las conclusiones de otras investigaciones en este campo. Esto respalda la eficacia de la técnica de estabilización de suelos blandos con columnas de suelo cemento, incluso cuando se considera una configuración específica como la empleada en este estudio.

### **6.3 Cálculo de asentamientos teóricos**

En este numeral se llevará a cabo la determinación de los asentamientos teóricos para el suelo de fundación sin mejora, y mejorado a partir de los modelos con separaciones  $S=2D$ ,  $3D$  y  $4D$ . Para ello, se consideró la carga impuesta por el terraplén, el área tratada, los parámetros de compresibilidad del suelo sin mejora y el módulo de elasticidad del suelo mejorado y sin mejorar.

#### **6.3.1 Asentamientos en el suelo sin mejora**

Debido a las cargas impuestas por el terraplén, el suelo de fundación sin mejora experimentó un asentamiento por consolidación de 1.24 m en el prototipo. Para calcularlo, se consideró el incremento de esfuerzo a profundidad de la carga transmitida por el terraplén  $\Delta\sigma_z$ , una condición saturada del suelo y los parámetros de compresibilidad referidos en la Tabla 4.

Se realizó la subdivisión del estrato correspondiente al suelo de fundación en capas,  $h_i=1.0$  m y, se identificó que el material en los primeros 2.0 m estaba sobreconsolidado. Esto puede explicarse debido a las condiciones de construcción del modelo, ya que después de la consolidación del suelo

de fundación a 25 kPa, se colocó el material para el terraplén sometiéndolo a un esfuerzo de 40 kPa.

La determinación del esfuerzo final y el asentamiento, se realizó teniendo en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$\sigma'_{final} = \sigma'_{v} + \Delta\sigma_z \quad (7)$$

$$\Delta Z = \frac{H_0}{1 + e_0} Cc \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_{v}} \quad (8)$$

$$\Delta Z = \frac{H_0}{1 + e_0} \left( Cr \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v}} + Cc \log \frac{\sigma'_{final}}{\sigma'_p} \right) \quad (9)$$

### 6.3.2 Asentamientos en el suelo mejorado

Al llevar a cabo la mejora del suelo mediante el método de soil mixing, una manera de determinar los asentamientos en el suelo mejorado y, por ende, en las estructuras construidas sobre él, es realizar controles topográficos en campo. Con base en la información proporcionada por los puntos de control, se calcula la tasa y el valor de la deformación en el suelo. Sin embargo, según el FHWA (2013), el asentamiento en la zona tratada, se puede evaluar asumiendo condiciones similares de deformación tanto en el suelo de la mezcla suelo-cemento, como en el suelo adyacente sin tratamiento. Basado en estos planteamientos, el manual propone en primer lugar determinar un módulo compuesto  $M_{comp}$  a través de una fórmula conservadora, y con base en este determinar el asentamiento del suelo mejorado con columnas de suelo-cemento, tal como se muestra a continuación:

$$M_{comp} = ar * E_m + (1 - ar) * M_s \quad (10)$$

$$\Delta h_{dm} = H_{dm} * \frac{q}{M_{comp}} \quad (11)$$

En donde,

$M_{comp}$  = Módulo compuesto de la zona tratada

$q$  = esfuerzo total debido al terraplén en la superficie del suelo mejorado, (t/m<sup>2</sup>)

H<sub>dm</sub>= espesor del estrato mejorado, (m)

E<sub>m</sub> = módulo de elasticidad de la mezcla suelo cemento (t/m<sup>2</sup>)

a<sub>r</sub>= índice de reemplazo o área tratada

M<sub>s</sub> = módulo de elasticidad del suelo sin mejorar, (t/m<sup>2</sup>). Se utiliza como referencia un valor de 100 t/m<sup>2</sup> sugerido por el FHWA (2013) para suelos blandos.

Para obtener el módulo de elasticidad del suelo mejorado, se utiliza la siguiente correlación propuesta en el FHWA (2013).

$$E_m = 300q_u \sim 1000q_u \quad (12)$$

En donde,

E<sub>m</sub> = módulo de elasticidad secante del suelo mejorado. Se adopta el valor de 300 q<sub>u</sub>

q<sub>u</sub>= resistencia a la compresión inconfiada del suelo mejorado.

Se realizó el cálculo de los asentamientos del suelo mejorado con columnas de suelo cemento para separaciones 2D, 3D y 4D. Los resultados, se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Asentamientos teóricos del suelo mejorado

S <sub>col</sub>	a <sub>r</sub>	M <sub>s</sub> , t/m <sup>2</sup>	H <sub>dm</sub> (m)	q <sub>u</sub> (suelo mej.) kPa	E <sub>m</sub> (t/m <sup>2</sup> )	q <sub>1</sub> (t/m <sup>2</sup> )	M <sub>comp.</sub> t/m <sup>2</sup>	Δh <sub>1</sub> (m)
2D	0,39	100	6,5	21,7	651	5,7	314,89	0,12
3D	0,13	100	6,5	11,97	359,1	5,7	133,683	0,28
4D	0,07	100	6,5	10,21	306,3	5,7	114,441	0,32

Fuente: elaboración propia

Dado que la ecuación asume valores basados en correlaciones, es posible que, al compararlos con la información proporcionada por el análisis de imágenes, se observen diferencias.

#### 6.4 Análisis de imágenes modelos sin mejora y con mejora

Se llevó a cabo el análisis de imágenes utilizando la velocimetría de imagen de partículas (PIV) con el objetivo de definir los vectores de desplazamiento proyectados tanto en el suelo de fundación como en el terraplén. Para este fin, se emplearon fotografías tomadas antes y después del vuelo en la centrífuga geotécnica para el modelo sin mejoramiento, y los tres modelos mejorados con

columnas de 0.6 m de diámetro y separaciones 2D, 3D y 4D. Estos modelos permiten identificar la influencia de la separación de las columnas en la estabilidad del terraplén proyectado, cumpliendo así con uno de los objetivos específicos de este trabajo de grado.

La Tabla 13 resume las principales características con respecto a la distribución de columnas bajo el cuerpo del terraplén en los modelos a los que se les realizó el análisis de imágenes.

Tabla 13. Información de modelos seleccionados para el análisis de imágenes

Separación (D)	Diámetro de col. (m)	# Columnas	Área tratada %
Sin mejora	-	-	-
2D	0.6	63	39
3D	0.6	30	13
4D	0.6	15	7

Fuente: elaboración propia

#### 6.4.1 Suelo de fundación sin mejora

En el modelo ensayado, se identifica un mecanismo de falla caracterizado por el desplazamiento descendente del terraplén, generando una compresión en el suelo de fundación. Esta compresión provocó que el suelo adquiriera un comportamiento similar al de una cuña pasiva, siendo desplazado hacia la superficie debido a la carga vertical aplicada por el terraplén. El procesamiento de imágenes, realizado utilizando MATLAB permitió obtener la Figura 71, la cual ilustra la trayectoria de los vectores de desplazamiento para este modelo.

En la figura, se observa que la mayor parte de los vectores se concentran en el cuerpo y hombro del terraplén, para luego desplazarse hacia el suelo de fundación hasta llegar a la superficie de falla, que se encuentra a una distancia de 6.4 metros medida desde la corona del terraplén.

Posteriormente, en cuanto a deformación se refiere, en el sentido vertical, se observaron puntos que se desplazaron verticalmente un máximo de 1.37 m, medidos desde la corona del terraplén.

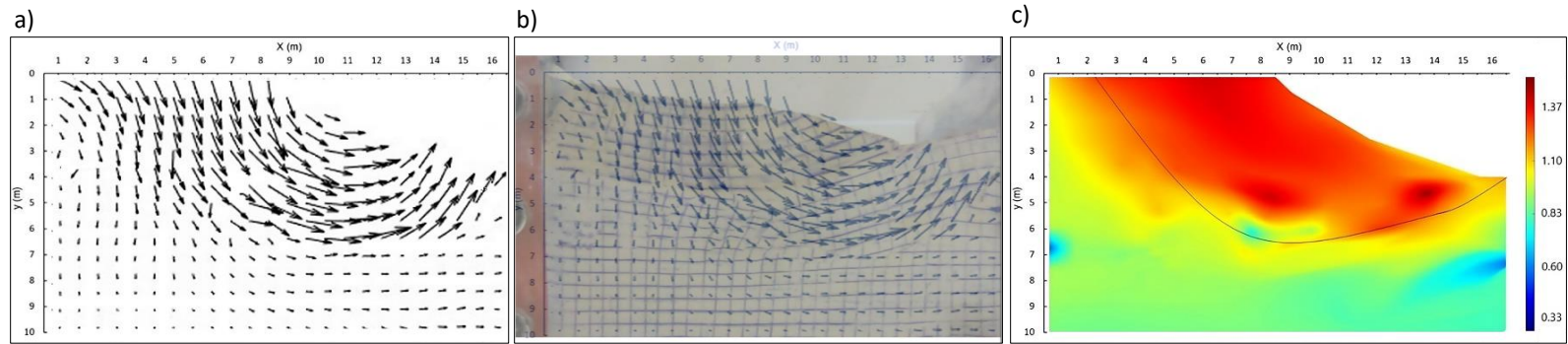


Figura 71. Análisis de imágenes modelo sin mejora en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrífuga geotécnica, c) desplazamiento vertical  
Fuente: elaboración propia



#### **6.4.2 Suelo de fundación mejorado con S= 2D**

La Figura 72 representa un modelo con un área de tratamiento o mejora del 39% y vectores de desplazamiento que suscriben una variación mínima en su dirección. A través del análisis de imágenes, se pudo identificar particularmente en la parte central del terraplén y hasta una profundidad de 2.8 m en el prototipo, desplazamientos máximos de 0.30 m.

#### **6.4.3 Suelo de fundación mejorado con S= 3D**

Figura 73 representa un modelo con un área de tratamiento del 13%, en donde los vectores de desplazamiento suscriben una superficie de falla circular, sin variaciones atípicas en la dirección de los vectores. La superficie de falla alcanza su máxima curvatura a los 9.0 m, medidos desde la cresta del terraplén, desarrollándose por completo hasta la berma del modelo.

Con relación a los desplazamientos, se presentaron valores máximos de 0.62 m en los primeros 2.0 m de profundidad para la zona del tercio central de la corona del terraplén, siendo estos los valores más críticos. A partir de esta profundidad y hasta los 8.0 m los desplazamientos decrecieron hasta alcanzar un valor de 0.31 m.

#### **6.4.4 Suelo de fundación mejorado con S= 4D**

La Figura 74 representa un modelo con un área de tratamiento del 7%, en donde los vectores de desplazamiento resultantes indican dos superficies de falla circulares. En el primer caso, la superficie de falla alcanza una profundidad de 6.0 m en su punto de mayor curvatura, los cuales son medidos desde la corona del terraplén. En esta zona, la falla ocasionó el desplazamiento o empuje del suelo de fundación hacia la superficie de manera similar a lo ocurrido con el modelo sin mejoramiento. Con relación a la segunda superficie de falla, esta se presenta a los 8.5m de profundidad tomando como referencia la corona del terraplén.

En este modelo el desplazamiento vertical máximo fue de 0.81 m, el cual coincide con la zona en donde se desarrolla la superficie de falla 1.

Con relación a las superficies de falla, se podría inferir que estas coinciden con la zona donde las columnas fallan por cortante, lo cual ocurre entre  $1/3$  y  $2/3$  de la longitud de las columnas, según la auscultación visual realizada a los modelos y explicada en el capítulo de metodología.

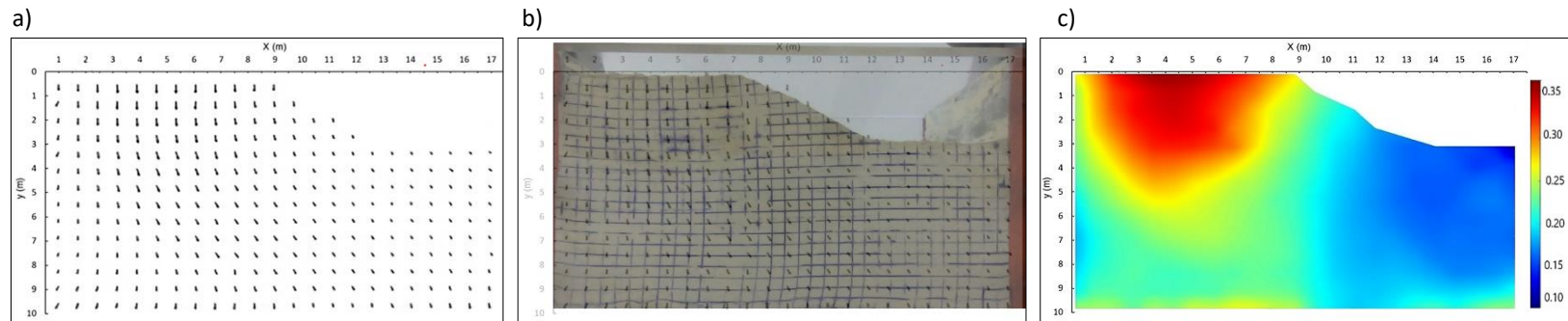


Figura 72. Modelo 3. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y  $S=2D$  en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrifuga geotécnica, c) desplazamientos resultantes, Fuente: elaboración propia

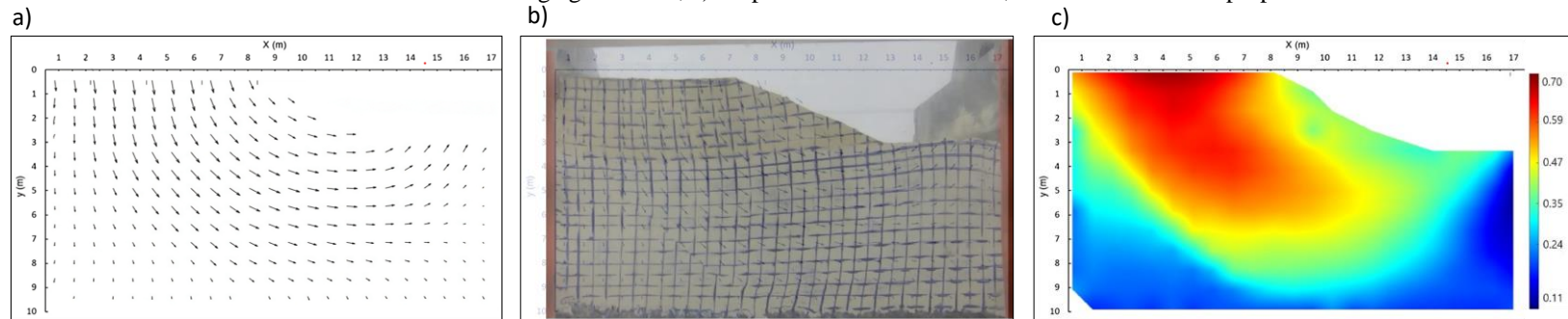


Figura 73. Modelo 5. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y  $S=3D$  en a) vectores de desplazamiento, en b) superposición de vectores en el modelo de la centrifuga geotécnica, c) desplazamientos resultantes. Fuente: elaboración propia

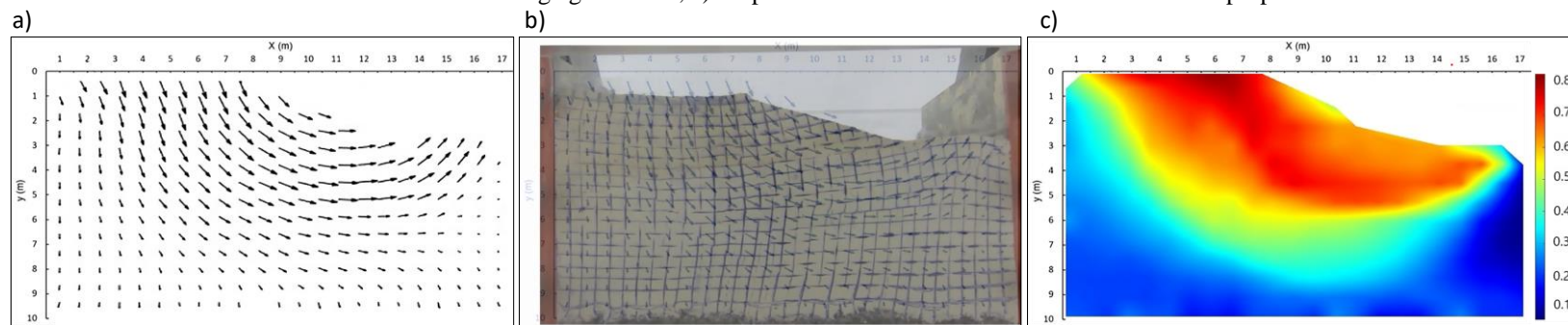


Figura 74. Modelo 6. Columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y  $S=4D$  en a) vectores de desplazamiento, en b) desplazamientos resultantes y en c) superposición de vectores en el modelo de la centrifuga geotécnica. Fuente: elaboración propia

Las Figura 72, Figura 73 y Figura 74 representa los vectores de desplazamiento resultantes (movimientos horizontales y verticales) de los modelos con mejoramiento ensayados. No obstante, para establecer una comparación entre los asentamientos teóricos y los obtenidos mediante el análisis de imágenes, fue necesario determinar los desplazamientos generados únicamente en la componente vertical. Lo anterior, se muestra en la Figura 75.

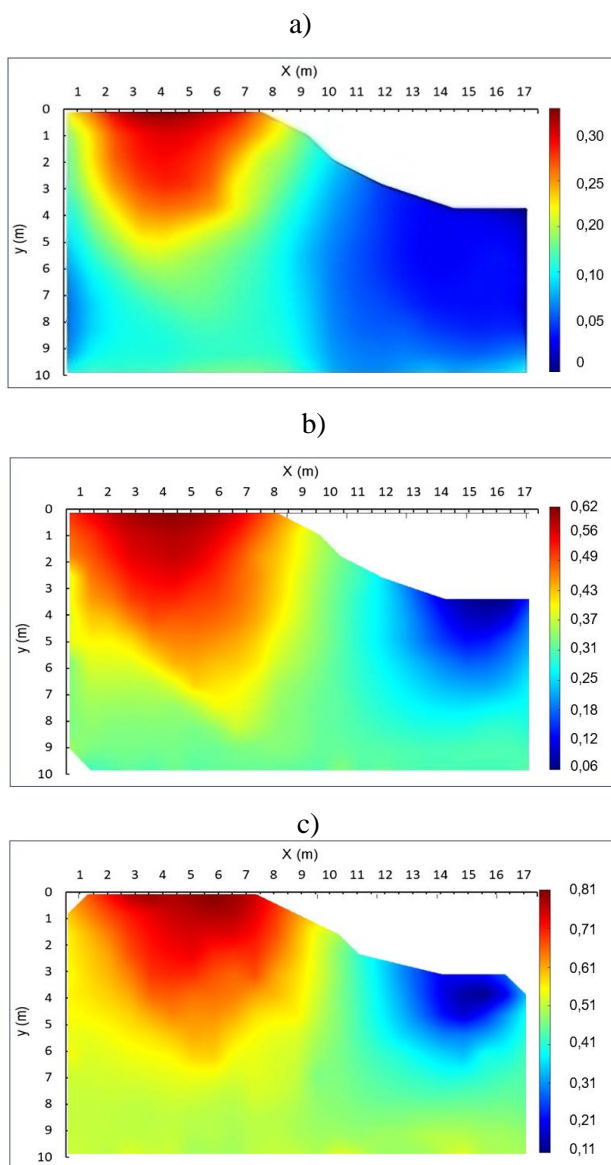


Figura 75. Vectores de desplazamiento verticales en a) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=2D en b) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=3D y c) Modelo con columnas de suelo cemento de 0.6m de diámetro y S=4D

Fuente: elaboración propia

Ahora bien, se hace necesario aclarar que para el suelo sin mejora en la Figura 71, se presentan los desplazamientos verticales, dado que estos gobiernan el comportamiento del suelo ante la carga impuesta por el terraplén.

Con los desplazamientos verticales obtenidos a partir del análisis de imágenes efectuados para los cuatro modelos ensayados, se realizó la gráfica mostrada en la Figura 76. En la cual, se aprecia la relación existente entre la separación de las columnas y el desplazamiento máximo del modelo medido desde la parte central de la cresta del terraplén. Información que se resume en la Tabla 14. Así mismo, se calculó el factor de reducción de asentamiento para las diferentes separaciones de acuerdo con la siguiente expresión.

$$Fra = 1 - \frac{\Delta sm}{\Delta ssm} \quad (13)$$

En donde,

Fra = factor de reducción de asentamiento

$\Delta sm$  = desplazamiento máximo del suelo mejorado con columnas de suelo-cemento

$\Delta ssm$  = desplazamiento del suelo de fundación sin mejorar

Tabla 14. Desplazamiento máximo y cálculo del factor de reducción de asentamientos

Material	Separación, S	Separación (m)	Desplaz. Max (m)	Fra
Suelo sin mejora	N.A	N.A	1,37	-
Suelo mejorado	2D	1,2	0,30	0.78
Suelo mejorado	3D	1,8	0,62	0.55
Suelo mejorado	4D	2,4	0,81	0.41

Fuente: elaboración propia

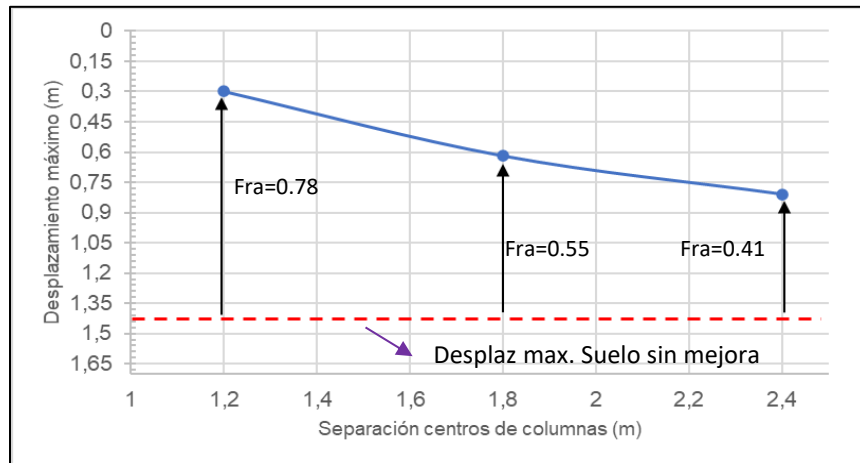


Figura 76.Desplazamientos máximos obtenidos con análisis de imágenes  
Fuente: elaboración propia

Además de lo anterior, se realizó la comparación de los desplazamientos del suelo de fundación obtenidos a través del análisis de imágenes, y los calculados de forma teórica en el numeral 6.3. Estos desplazamientos fueron tomados a partir de la base del terraplén. Esta información se representa gráficamente en la Figura 77 y se resume en la Tabla 15.

Tabla 15.Desplazamientos teóricos y con análisis de imágenes para el suelo de fundación

Material	Separación, S	Separación (m)	$\Delta z$ Análisis de imágenes (m)	$\Delta z$ Teórico (m)	Diferencia en $\Delta z$ . (m)
Suelo sin mejora	N.A	N.A	1,20	1,24	0,04
Suelo mejorado	2D	1,2	0,27	0,12	0,15
Suelo mejorado	3D	1,8	0,53	0,28	0,25
Suelo mejorado	4D	2,4	0,67	0,32	0,35

Fuente: elaboración propia

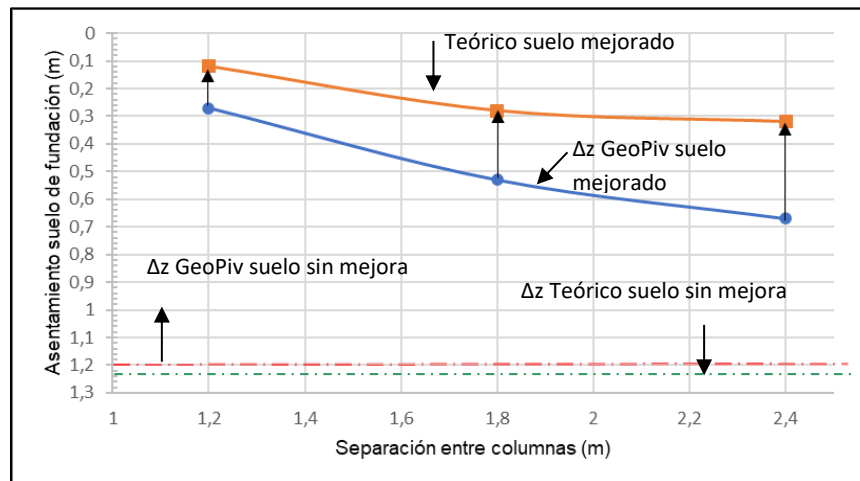


Figura 77.Desplazamientos teóricos y obtenidos con análisis de imágenes para el suelo de fundación  
Fuente: elaboración propia

En la Figura 77 se puede observar que los asentamientos teóricos y los obtenidos con análisis de imágenes para el suelo de fundación sin mejora, son aproximadamente iguales. Sin embargo, este no es el caso para los modelos con mejora en el suelo de fundación y separaciones S=2D, S=3D y S=4D, en donde los asentamientos determinados con análisis de imágenes fue en promedio un 48% mayor a los teóricos.

Ahora, si bien es cierto que para el modelo con separación S=2D, se presentaron deformaciones mayores a las calculadas teóricamente, también lo es el hecho de que esta configuración de columnas excluyendo afectaciones por proceso constructivo, mejora sustancialmente las propiedades geotécnicas del suelo de fundación reduciendo aproximadamente en un 74% los asentamientos esperados en un suelo sin mejora. Por lo tanto, la utilización del soil mixing como tratamiento de suelos blandos para proyectos de ingeniería con características similares a las evaluadas en este trabajo de grado, ofrece una equilibrada relación costo / beneficio.

## 7 Conclusiones

Se estudió a través de la modelación física en centrífuga geotécnica, el efecto en la estabilidad de un terraplén cuando este se encuentra construido sobre un suelo blando mejorado. Los resultados se compararon con los modelos físicos realizados en un suelo sin mejora, donde los desplazamientos máximos obtenidos fueron de 1.37 m. La mejora se realizó con columnas de suelo cemento de  $D=0.6$  m y separaciones de 2D, 3D y 4D, y se identificó una reducción del asentamiento en el suelo en cada separación de 78%, 55% y 41% respectivamente. Lo anterior demuestra que esta técnica mejora el comportamiento geotécnico de un suelo blando ante cargas verticales aplicadas.

Los análisis de imágenes realizados para los modelos con mejora mediante la incorporación de columnas de suelo cemento con  $D=0.6$  m y separaciones de 2D, 3D y 4D, permitieron identificar superficies de falla de tipo circular. Además, se observaron variaciones en los desplazamientos verticales en el suelo de fundación, medidos desde la base del terraplén, que oscilan desde los 0.27 m para una separación de 2D hasta 0.67 m en el modelo con separación de 4D. Con lo anterior se evidencia que existe una relación directa entre la separación de las columnas y el desplazamiento vertical del suelo de fundación.

En los modelos ensayados, se obtuvieron áreas de tratamiento de 39 %, 13 % y 7 % para suelos mejorados con columnas de suelo cemento separadas 2D, 3D y 4D respectivamente. Al comparar estos resultados con investigaciones previas, se puede afirmar que porcentajes de área tratada mayores al 30 %, aportan la rigidez suficiente al suelo de fundación para disminuir sustancialmente las deformaciones en el mismo.

La construcción de terraplenes con ángulos de inclinación de  $45^\circ$  incrementa el riesgo de deslizamiento y colapso. Por esta razón, en este trabajo de grado, se excluyó el análisis de suelos mejorados con columnas de suelo cemento como soporte para terraplenes con dicha inclinación.

Se realizaron ensayos de laboratorio para determinar los parámetros de compresibilidad y resistencia de suelo de fundación sin mejora y con mejora, evaluando el aporte de las columnas de suelo cemento. Para el caso específico de la resistencia al corte no drenado,  $S_u$ , varió de 5.64 kPa en un suelo sin mejora a 11.80 kPa en un suelo mejorado con columnas de suelo cemento y una  $S=2D$ .



En otras palabras, el aumento de la resistencia,  $S_u$ , fue de aproximadamente dos veces. Mientras que para separaciones 3D y 4D,  $S_u$ , fue de 5.99 kPa y 5.11 kPa, es decir, valores similares al de un suelo sin mejoramiento. Como se puede observar, el valor de  $S_u$  para el modelo mejorado con S=4D resulta menor que el del suelo sin mejora, por lo que es válido inferir que esta diferencia podría obedecer a factores asociados al remoldeo de la muestra.

Se realizaron cinco diseños diferentes para la mezcla de suelo cemento y se sometieron a ensayos de compresión. Se identificó que una proporción suelo cemento S/C=0.6 garantiza una resistencia a la compresión de 1.38 MPa a los 7 días. El valor obtenido para la mezcla S/C=0.6 concuerda con la descripción dada por Suksun, Runglawan, y Apichat, 2012 de una mezcla de baja resistencia, es decir,  $q_u < 1.5$  MPa. De hecho, aun cuando se presentaran variaciones en el desarrollo de la resistencia de campo respecto a la de laboratorio, esta dosificación permite cumplir con el criterio de diseño establecido de mínimo 1.0 MPa.

Respecto al método de inyección, se estableció una modificación en el equipo empleado para modelar de mejor manera la construcción de las columnas de suelo cemento. De esta forma, se logró evacuar de forma gradual y uniforme la lechada desde el fondo del estrato a mejorar hasta la superficie.

Los aumentos de presión de inyección de la lechada no garantizan la continuidad del diámetro, ni la longitud de la columna de suelo-cemento a profundidad. Estos factores hacen que los asentamientos esperados en el suelo, sean mayores que los calculados teóricamente.

Una relación agua/cemento de 1.0 permite la inclusión de la lechada sin obstruir los conductos de inyección. Esto se pudo validar con el ensayo de fluidez realizado en el laboratorio. No obstante, cuando se incluye acelerante es importante controlar los tiempos de inyección para evitar el fraguado temprano de la mezcla dentro de la manguera de inyección.

## 8 Recomendaciones

Para futuros estudios, se recomienda tener en consideración los siguientes aspectos:

Construir un dispositivo mecánico y/o electrónico que simule el proceso de perforación e inyección para verificar con estos el impacto de la variación de la tasa de perforación y mezcla, y la presión de inyección y su relación con la separación centro a centro de las columnas de suelo cemento. De esta manera se podrá reproducir y fidelizar el proceso constructivo del *soil mixing*, especialmente si se desean analizar mezclas de suelo cemento con una resistencia superior a 1.5 MPa.

Realizar el análisis numérico de un suelo mejorado con columnas de suelo cemento, utilizando los parámetros obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados en esta tesis y las características de los modelos físicos propuestos. Con esto, se podrá llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de modelos físicos realizados en la centrífuga geotécnica con aquellos alcanzados mediante programas computacionales.

Reemplazar el cemento como material aglutinante por otros, como la cal o ceniza volante para poder de esta manera estimar variaciones en el desarrollo de la resistencia a la compresión de la mezcla suelo/aglutinante y de la eficiencia de la mejora en suelos blandos.

Extender la aplicación de modelos físicos en centrífuga geotécnica en el *soil mixing* a otro tipo de estructuras, como: muros de contención, presas, entre otros.

## Bibliografía

- Andromalos, K., Hegazy, Y., & Jasperse, B. (2012). stabilization of soft soils by soil mixing. The American Society of Civil Engineers , 10.
- Anja Bek, Goran Jeftić, Stjepan Strelec, & Jasmin Jug. (25 de 11 de 2021). INFLUENCE OF SHEAR RATE ON THE SOIL'S SHEAR STRENGTH. doi:<https://doi.org/10.37023/ee.8.1-2.6>
- Caicedo, B. (2003). Modelación en centrífuga geotécnica. 1. Recuperado el 19 de 02 de 2022
- Centra. (2015). Obtenido de <http://www.centraic.com/projects/>
- Chen, J., & Lee, F. (2012). Development of a deep mixing model system on centrifuge platform. American Society of Civil Engineers, 4.
- Delgadillo Otálora, L. C. (2022). Modelación física en centrífuga geotécnica de un suelo mejorado con columnas de suelo-cemento: aplicación terraplén. Bogotá.
- Fang, Y. S., Chung, Y. T., Yu, F. J., & Chen, T. J. (2001). Properties of soil-cement stabilised with deep mixing method. Ground Improvement, 5, 69-74. doi:10.1680/grim.5.2.69.39982
- FHWA. (2013). Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. Recuperado el 05 de 03 de 2022
- Frikha, W., Zargayouna, H., Boussetta, S., & Bouassida, M. (2015). Experimental study of tunis soft soil improved by deep mixing column. Geotechnical and Geological Engineering , 360. doi:10.1007/s10706-016-0151-2
- Gerscovich, D. (2015). Estabilidad de taludes. Bogotá: Lemoine editores. Recuperado el 17 de 09 de 2023
- Horpbulsk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., & Chinkulkijniwat, A. (2011). Strength development in cement admixed bangkok clay: laboratory and field investigations. Soils and Foundations, 51(2), 239. doi:doi.org/10.3208/sandf.51.239.
- Horpibulsuk, S., Miura, N., Koga, H., & Nagaraj, T. S. (2004). Analysis of strength development in deep mixing:. Ground Improvement, 8(2), 67. doi:10.1680/grim.2004.8.2.59
- INVIAS. (2012). Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras. En INVIAS, Manual de diseño de cimentaciones superficiales y profundas para carreteras (pág. 790).
- Keller. (2019). Soil mixing / Mezcla de suelos. Recuperado el 29 de 04 de 2022, de <https://www.keller.com.es/sites/keller-es/files/2019-04/e-catalogo-soilmixing-keller.pdf>

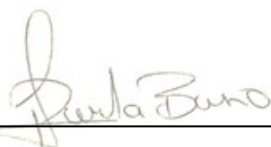
- Khosravi, M., Boulenger, R., Tamura, S., Wilson, D., Wang, Y., & Olgun, G. (2015). Dynamic centrifuge test on soft clay reinforced by soil-cement grids. American Society of Civil Engineers.
- Kitazume, M., & Maruyama, K. (2007). Internal Stability of Group Column Type Deep Mixing Improved Ground Under Embankment Loading,. 47(3), 437-455. doi:doi.org/10.3208/sandf.47.437.
- Larson, S. (2003). Mixing processes for ground improvement by deep mixing. Recuperado el 18 de 03 de 2022
- Lee, F. H., Lee, C. H., & Dasari, G. R. (2006). Centrifuge modelling of wet deep mixing processes in soft clays. Géotechnique, 56(10). Recuperado el 24 de 04 de 2022
- Lozada, C., Garzón, L. X., & Campagnoli, S. (2021). Geotechnical centrifuge applications in the teaching of applied soil. Revista educación en ingeniería, 3.
- Madabhushi, G. (2018). Centrifuge modelling for civil engineers. 41.
- Madhyannapu, R. S., Puppala, A. J., Nazarian, S., & Yuan, D. (2010). Quality assessment and quality control of deep soil mixing. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1,2. Recuperado el 09 de 08 de 2023
- Madhyannapu, R., & Puppala, A. (2014). Design an construction guidelines for deep soil mixing to stabilize expansive soils. American Society of Civil Engineers.
- Majid , A., Javad , N., & Ganjian, N. (2019). Experimental Study on Shear Strength of Cohesive Soils. Geotechnical and Geological Engineering , 2172.
- Menard. (2018). Volumen de negocios de gestión 359. 7.
- Phoon, K. K., & Kulhawy, F. (1999). Characterization of geotechnical variability. 612-624.
- Ryan , C., & Jasperse, B. (1989). Deep soil mixing at the Jackson Lake Dam. The American Society of Civil Engineers, 10-12.
- Soletanche Bachy Cimas. (2021). Obtenido de <https://soletanche-bachy.com.co/project/interseccion-puente-sibate/>
- Stanier, S. A., Blaber, J., Take, W. A., & White, D. J. (30 de 10 de 2015). Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications. Canadian Geotechnical Journal. doi:doi: 10.1139/cgj-2015-0253

- Suksun, H., Runglawan, R., & Apichat, S. (2012). State of the art in strength development of soil-cement columns. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 209.
- Terratest. (2020). Catálogo soil mixing.
- Vasquez, P. A. (2023). Modelación física en maquina centrífuga para análisis en 2D de estabilidad de taludes de suelos binarios. Tesis de Maestría, Bogotá. Recuperado el 08 de Noviembre de 2023
- White, D. J., Take, W. A., & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, 53(7). doi:<https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.7.619>
- Zakaria, M. M., Hafez, K. M., El Kamash, H. W., & Moubarak, A. H. (2020). Stabilization of Soft Clay Soil by Deep Mixing. *Life ScienceJournal*, 15.
- Zhou, Zhou, H., Yang, X., Yu, X., & Zhang, T. (2019). Performance of embankments with rigid columns embedded in an inclined.

**Fecha de recepción**

**15 de diciembre de 2023**

---



**Firma del Estudiante**

---

**Firma del director del Trabajo de Grado**

**(ESPACIO RESERVADO)**

**Fecha de presentación: 15 de diciembre de 2023**

**a) Aprobado: \_\_\_\_\_ Aplazado: \_\_\_\_\_ Rechazado: \_\_\_\_\_**

**Jurado 1: \_\_\_\_\_**

**Jurado 2: \_\_\_\_\_**

**b) Observaciones:**

---

---

---

---

---