



Modelación física en centrifuga del efecto del tipo de raíz en la estabilidad de taludes

Yurleidy Rocha Sierra

Directora

Catalina Lozada, PhD Profesora Ingeniería civil

Escuela Colombia De Ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería

Departamento de ingeniería civil

2021



Modelación física en centrifuga del efecto del tipo de raíz en la estabilidad de taludes

TESIS DE GRADO

Realizado por

Yurleidy Rocha Sierra

Para la obtención del grado de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON ÉNFASIS EN GEOTECNIA

Directora

Catalina Lozada

PhD Ingeniera civil

Jurados

Ing. Lina Garzón Ávila

Ing. José Vicente Amórtegui Gil

Escuela Colombia De Ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería

Departamento de ingeniería civil

2021

“A Dios por su infinito amor y provisión, a mis padres y mi familia, por ser mi gran ejemplo y motivación, a mi novio por su ayuda y amor incondicional, al ing. Jairo B. por su confianza en mí. A cada una de las personas que siempre me han motivado a cumplir mis sueños... ¡Gracias infinitas!.

Oseas 14:5-6 (TLA)”

Agradecimientos

A la Escuela Colombiana Julio Garavito por su excelencia y sus altos estándares de calidad, siempre dispuestos a ser fuente de conocimiento y prestos a todas las herramientas requeridas durante el desarrollo de este trabajo de grado.

A la ingeniera Catalina Lozada por su amabilidad, dedicación, profesionalismo y motivación constante durante el proceso de elaboración de este trabajo y de todo el programa de posgrado.

A mis jurados de tesis, la ingeniera Lina Garzón y el ingeniero José Vicente Amórtegui, a ellos agradezco su excelencia y calidad humana, su profesionalismo, su constante guía y retroalimentación durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los técnicos y al personal en general del Laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito que hicieron parte de este trabajo de grado, a quienes agradezco toda la ayuda brindada en la realización de los procesos experimentales.

A cada uno de los docentes y los compañeros con quienes tuve la oportunidad de compartir dentro de las aulas y fuera de ellas, gracias a todos ellos por sus enseñanzas. Especialmente agradezco a mi gran amigo David Carranza por su apoyo incondicional y motivación en cada proceso.

A la empresa SYC Ingeniería Colombia S. A. S. especialmente al ingeniero Jairo Bohórquez por su confianza y apoyo incondicional, a ellos agradezco el haberme ayudado a cumplir estas metas profesionales y académicas.

Índice General

1.	Introducción	14
2.	Problema de investigación	17
3.	Alcance e importancia.....	19
4.	Objetivos	20
	Objetivo general.....	20
	Objetivos específicos	20
5.	Revisión bibliográfica.....	21
	5.1. Efecto de la vegetación en la estabilidad de taludes	21
	5.2. Modelación física en centrifuga geotécnica.....	28
	5.3. Efecto de la morfología de las raíces en la estabilidad de taludes	38
	5.4. Fotointerpretación y análisis de imágenes en AutoCAD	48
6.	Metodología	49
	6.1. Modelación física.....	49
	6.2. Técnica de preparación de los modelos físicos	56
	6.3. Modelación numérica en Slide:	64
7.	Resultados y análisis de resultados	68
	7.1. Resultados de laboratorio: caracterización del suelo sin raíces	68
	7.2. Resultados de laboratorio: caracterización de suelos con raíces.....	74
	7.3. Resultados de modelación física	78
	7.4. Resultados de modelación numérica.....	95
	7.5. Comparación entre modelación física y numérica (prototipo).....	104
8.	Conclusiones	108
9.	Recomendaciones	110
10.	Referencias.....	111

Índice de figuras

Figura N° 1. (a) Siembra de pasto Vetiver en el talud de las zonas urbanas de La República democrática del Congo. (b) se evidencia el control del drenaje y el mejoramiento del talud tres meses después de su siembra. Obtenido de (Highland & Bobrowsky, 2008).	22
Figura N° 2. Curvas resistencia a la tracción vs diámetro, para diferentes especies de vegetación. Obtenido de (Gentile et al., 2010).....	25
Figura N° 3. Tipos de raíz (a) Sistema de raíz lateral (b) sistema de raíz radial (c) sistema de raíz pivotante. Obtenido de (Suárez, 2009).	27
Figura N° 4. Centrífuga Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente propia.....	29
Figura N° 5. Talud con reforzamiento de vegetación, (a) antes y (b) después de ser fallado (prueba con sauce). Obtenido de (Sonnenberg et al., 2010).	33
Figura N° 6. Morfología de las raíces estudiadas: (a) Sauce (árbol), (b) Festulolium Grass (pasto); (c) Retamo espinoso/ulex (árbol arbusto). Obtenido de (Liang, Bengough, et al., 2017).	33
Figura N° 7. (a). Crecimiento de la raíz del sauce. b). crecimiento de la hierba plantada dentro la centrífuga. Obtenido de (Liang, Bengough, et al., 2017)	34
Figura N° 8. Crecimiento de la raíz dentro la centrífuga. Obtenido de: (Ng et al., 2016).....	35
Figura N° 9. Montaje para ensayo en centrífuga con raíces artificiales. Obtenido de: (Ng et al., 2016).	36
Figura N° 10. Raíces artificiales de ABS, impresas en 3D (Liang, Knappett, et al., 2017).	37
Figura N° 11. Simulación de las formas de raíces: (a) pivotante (b) extensión radial y (c) extensión lateral. Obtenido de Ng et al. (2016)	38
Figura N° 12. Siembra de pasto Vetiver en Colombia. Obtenido de: (Escobar & Camacho, 2014).	41
Figura N° 13. Raíz del pasto Vetiver. Obtenido de (Suárez, 1998).....	42
Figura N° 14. Relación entre el diámetro de la raíz y la resistencia a la tracción del Vetiver. Obtenido de (Hengchaovanich & Nilaweera, 2007).....	43
Figura N° 15. Pasto Brachiaria sembrado en Colombia para estabilización de taludes. Obtenido de (Gonzalez & Sierra, 2014).	44
Figura N° 16. Raíz de pasto Braquiaria (a) Sistema de raíz completo (b) zoom del sistema de raíz. Obtenido de (Pastos y Forrajes, 2018).....	45

Figura N° 17. La relación del diámetro de la raíz y la resistencia a la tracción del pasto brachiaria. Obtenido de (Teerawattanasuk et al., 2014).	46
Figura N° 18. Pasto San Agustín en Colombia. Obtenido de (Gonzalez & Sierra, 2014).....	47
Figura N° 19. Raíz del pasto San Agustín. Obtenido de: (Southernmedia, 2021).....	47
Figura N° 20. Fibra de vidrio. Fuente propia.....	50
Figura N° 21. Geometría del talud de prueba sin refuerzo en (a) prototipo a escala real y (b) modelo a escala reducida. Fuente propia	53
Figura N° 22. Geometría del talud sin refuerzo (a) prototipo a escala real y (b) Modelo a escala reducida – para el modelo M2 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia	54
Figura N° 23. Geometría del talud antes de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia	54
Figura N° 24. Geometría del talud antes de la consolidación: (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	55
Figura N° 25. Geometría del talud antes de la consolidación: (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	55
Figura N° 26. Mezcla para proceso de consolidación (a) agua y (b) suelo (c) en una batidora. Fuente propia.	56
Figura N° 27. Proceso de consolidación (a) capa de material drenante en la caja nivelada (b) papel filtro, y sobre este, capas del suelo homogéneo sin refuerzo (c) caja llena de material dejando un espacio de 0.5 cm libre al final (d) resultado. Fuente propia.	56
Figura N° 28. Procedimiento de consolidación (a) consolidación manual agregando 2 kg con pesas y luego duplicando este peso (b) al alcanzar 4 kg se ponen las cajas en los consolidómetros automáticos hasta finalizar el ensayo. Fuente propia.....	57
Figura N° 29. Grafica raíz (tiempo) vs Desplazamiento, suelo sin reforzamiento artificial – escala de carga de 52 kg (esfuerzo vertical de 30 kPa). Fuente Propia.....	58
Figura N° 30. Manipulación de la caja para marcación del talud. Fuente propia.....	59

Figura N° 31. Marcación y corte del talud según las dimensiones previamente definidas. Fuente propia	59
Figura N° 32. Proceso de preparación de muestra para suelo reforzado mezclando (a) caolín (b) agua (c) fibra de vidrio. Fuente propia.....	60
Figura N° 33. Modelación física de talud con sistema de reforzamiento Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia	61
Figura N° 34. (a) Registro fotográfico previo (b) ensayo en la centrifuga geotécnica. Fuente propia.	62
Figura N° 35. Tipos de superficies de falla en taludes. Obtenido de (Hutchinson, 1988).....	63
Figura N° 36. Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar). Fuente propia	65
Figura N° 37. Modelo M1 y M2- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar). Fuente propia	66
<i>Figura N° 38.</i> Modelo M1 y M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar. Fuente propia	67
<i>Figura N° 39.</i> Modelo M1 y M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar). Fuente propia	68
Figura N° 40. Clasificación del suelo - Carta de plasticidad de Casagrande. Obtenido de (Chacón et al., 2004)	69
Figura N° 41. Ensayo de hidrometría (a) muestra de suelo (b) agente dispersante (c) ejecución del ensayo – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente Propia.....	69
Figura N° 42. Curva de gradación por hidrómetro – Granulometría del suelo – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente Propia	70
Figura N° 43. Montaje del ensayo de compresión inconfiada – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente propia.....	71
Figura N° 44. Esfuerzo Vs. Deformación – suelo sin reforzamiento artificial. Ensayo de compresión inconfiada. Fuente propia.....	71

Figura N° 45. Registro fotográfico del ensayo triaxial consolidado no drenado CU – suelo sin reforzamiento artificial (a) antes y (b) después de ser fallada. Fuente propia	72
<i>Figura N° 46.</i> Esfuerzo Vs. Deformación – Muestras sin raíces. Ensayo triaxial. Fuente propia	73
Figura N° 47. Grafica Resistencia al corte no drenado S_u vs. Esfuerzo de consolidación σ_c (kPa) para ensayo de compresión simple y triaxial CU. Fuente propia	74
Figura N° 48. Ensayo triaxial en suelos reforzados artificialmente con fibra de vidrio: a) Marcación del cilindro (b) tallado de la muestra (c) Montaje para ensayo triaxial. Fuente propia	75
Figura N° 49. Grafica de esfuerzo vs. deformación del ensayo triaxial para suelos reforzados. Fuente propia.	75
Figura N° 50. Resistencia al corte no drenado Vs. Porcentaje de fibras de vidrio. Fuente propia.	77
Figura N° 51. Variación de la resistencia al corte no drenado ΔS_u Vs. El porcentaje de fibras de vidrio de cada tipo de reforzamiento. Fuente propia.	78
Figura N° 52. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	79
Figura N° 53. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo).	80
Figura N° 54. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Obtenido de (Proyecto de convocatoria interna, 2019).	81
Figura N° 55. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	82
Figura N° 56. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	83

Figura N° 57. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	84
Figura N° 58. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	85
Figura N° 59. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	86
Figura N° 60. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	86
Figura N° 61. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	87
Figura N° 62. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el modelo M2- Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	88
Figura N° 63. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	88
Figura N° 64. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el Modelo M1 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	89
Figura N° 65. Geometría definitiva del talud (a) prototipo a escala real y (b) Modelo a escala reducida de Modelo M2 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	90
Figura N° 66. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el Modelo M2- Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	90

Figura N° 67. Diagrama de vectores de desplazamiento M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	91
Figura N° 68. Diagrama de vectores de desplazamiento Modelo (a) M1- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.	92
Figura N° 69. Diagrama de vectores de desplazamiento (a) Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	93
Figura N° 70. Diagrama de vectores de desplazamiento (a) Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.....	94
Figura N° 71. Modelo M2 - Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).	96
Figura N° 72. Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.....	97
Figura N° 73. Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.....	97
Figura N° 74. Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.....	98
Figura N° 75. Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.....	99
Figura N° 76. Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.....	100
Figura N° 77. Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.	101
Figura N° 78. Grafica de factor de seguridad Vs. % Fibras de vidrio. Fuente propia.	103
Figura N° 79. Grafica de factor de seguridad Vs. Profundidad de reforzamiento del prototipo. Fuente propia.	103
Figura N° 80. Grafica de incremento del factor de seguridad Vs. % fibras de vidrio. Fuente propia.	104

Figura N° 81. Grafica de incremento del factor de seguridad Vs. Profundidad de refuerzo. Fuente propia. 104

Índice de tablas

Tabla 1. Influencia de la vegetación en la erosión y la estabilidad del talud. Obtenido de (Madrid et al., 2014).	23
Tabla 2. Leyes de escalas para las pruebas de centrifugas, Obtenido de (Azizi, 2000).	31
Tabla 3. Dimensiones de la caja basculante de la centrífuga geotécnica, tanto en modelo como en prototipo. Fuente propia.....	32
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de plantas. Obtenido de (Suárez, 2009). ..	40
Tabla 5. Propiedades del pasto Brachiaria. Modificada de: (Teerawattanasuk et al., 2014).	45
Tabla 6. Propiedades del pasto Brachiaria. Modificada de: (Teerawattanasuk et al., 2014).	45
Tabla 7. Resistencia a la tensión del pasto San Agustín. Obtenido de (Quirós, 2012).....	48
Tabla 8. Sistemas de raíces simplificados.....	51
Tabla 9. Resumen de las geometrías de los sistemas de reforzamiento.....	52
Tabla 10. Geometría del modelo de prueba a escala real (prototipo), suelo sin refuerzo. Fuente propia	52
Tabla 11. Resumen de la geometría de los modelos a escala real -prototipo- (antes de la consolidación). Fuente propia.....	53
Tabla 12. Incrementos de carga y esfuerzos verticales. Fuente propia.....	57
Tabla 13. Cantidades para mezcla de suelo reforzado según el sistema de reforzamiento	60
Tabla 14. Resumen de los modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) antes de la consolidación. Fuente propia	64
Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de Limites de Atterberg- Suelo sin raíces. Fuente propia.	68
Tabla 16. Resultados de las pruebas de compresión inconfiada - suelo sin reforzamiento artificial. Fuente propia.....	72
Tabla 17. Resultados de las pruebas de triaxial CU. Fuente propia	73
Tabla 18. Comparación de resultados obtenidos en ensayos de compresión inconfiada y triaxiales. Fuente propia.....	74

Tabla 19. Resistencia al corte del suelo no drenado (S_u) según el sistema de reforzamiento, para ensayos triaxiales. Fuente propia.	76
Tabla 20. Resumen de la geometría de los modelos a escala real -prototipo- (después de consolidar). Fuente propia	80
Tabla 21. Resumen de los modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) después de la consolidación. Fuente propia	95
Tabla 22. Recopilación de factores de seguridad obtenidos en cada modelo numérico vs % de refuerzo del prototipo. Fuente propia.....	102

1. Introducción

Colombia posee una ubicación espacial en la geografía mundial y unas condiciones naturales que permiten constantemente la ocurrencia de procesos geológicos destructivos a lo largo del territorio nacional, los cuales generan graves afectaciones tanto a las personas como a los bienes materiales y a la economía del país y las regiones. Unas de las problemáticas más recurrentes que se originan, entre otras, a causa de los factores naturales mencionados son la inestabilidad y la erosión en taludes. Estas afectaciones generan grandes daños y pérdidas en distintos grados y formas tanto a los territorios como a quienes los habitan que, según lo dicho por autores como Suárez (1998), podrían evitarse hasta en un 90 % si se toman medidas de prevención y control.

Hasta la fecha los métodos más convencionales que se han empleado para prevenir o controlar los efectos negativos de la inestabilidad de taludes (Mitsch, 1998) son el terraceo de la superficie, el uso de químicos, la instalación de anclajes y el levantamiento de muros de contención tradicionales. Hoy en día, gracias a los avances que ha tenido el área de estudio de la ingeniería geotécnica, se han desarrollado diversos métodos de bioingeniería que contribuyen con soluciones eficientes para esta problemática y que además son amigables con el medioambiente.

Varios investigadores como Suárez (2009) que han realizado sus estudios en el área de la ingeniería geotécnica han identificado que la vegetación, principalmente las raíces, es uno de los elementos que mayormente contribuye a la estabilidad de los taludes. Estos hallazgos concuerdan con las conclusiones a las que llegaron Abe e Iwamoto (1986) en un trabajo investigativo realizado en años anteriores, texto en el cual estos autores habían señalado que entre las fuerzas resistentes contra la erosión y el deslizamiento se hallaban: la resistencia a la tracción y corte de la raíz, la fuerza de arranque, y la fuerza compuesta que es generada por la combinación del suelo y el sistema radicular.

Durante los últimos años se han venido realizado otras investigaciones importantes en este campo entre las cuales se encuentran las dirigidas por los autores Herrera (2015), Eab et al. (2015), Teerawattanasuk et al. (2014) y Gentile et al. (2010), quienes han atribuido el comportamiento positivo que tiene el suelo reforzado con vegetación al incremento en los parámetros de resistencia del suelo, el cual se genera gracias al aporte que tienen las raíces sobre

las propiedades mecánicas. De esa manera, muchos de los estudios elaborados recientemente han demostrado que la vegetación tiende a generar una influencia positiva en la estabilidad de los taludes y a aportar al control de la erosión en la pendiente. Sin embargo, aun cuando los descubrimientos que aportan estos estudios han permitido tener certeza sobre el efecto positivo generado por las raíces en la estabilidad de los taludes, todavía se mantiene cierta incertidumbre en las técnicas de modelación física de la vegetación, respecto a las escalas adecuadas y representativas, tal y como se indicó en los estudios de autores como Liang, Bengough et al. (2017), Sonnenberg et al. (2010) y Eab et al. (2015). Este último señalamiento deja en evidencia que en la actualidad se requiere generar mayor investigación respecto al comportamiento de las raíces y su modelación física en centrífuga geotécnica.

A fin de contribuir con la investigación del problema que es objeto de estudio en este trabajo se empleó la modelación física en centrífuga geotécnica con reforzamiento artificial y se usó fibra de vidrio en diferentes porcentajes y profundidades, aplicación a partir de la cual se obtuvieron tres sistemas de reforzamientos. Una primera instancia del desarrollo de esta metodología se basó en realizar la caracterización del suelo con y sin reforzamiento mediante ensayos de laboratorio, proceso en el cual el suelo fue clasificado como un limo de alta plasticidad y del que también se obtuvieron los parámetros de resistencia al corte no drenado (S_u), los cuales tienen relación con los suelos reforzados naturalmente con Pasto Vetiver de nombre científico *Chrysopogon zizanioides* y Pasto Brachiaria de nombre científico *Brachiaria brizantha*, como se señaló en las investigaciones de los autores Teerawattanasuk et al. (2014).

Una vez se modelaron los taludes en la centrífuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI Julio Garavito), en una segunda instancia del desarrollo de este estudio, se realizaron análisis físicos con base en el registro fotográfico que se obtuvo antes y después de llevar a cabo el ensayo. En este proceso se empleó el software AutoCAD y se tomó como referencia la malla previamente dibujada sobre el talud donde se marcó la posición inicial y final de este, procedimiento a través del cual se obtuvieron vectores de desplazamiento. De ese modo, el análisis físico permitió comprobar el aporte que tienen las raíces sobre la estabilidad de taludes al ser empleada como reforzamiento, hallazgo que se obtuvo a partir de la observación de grandes movimientos y deformaciones en los taludes sin refuerzo. Esta conclusión también es sustentada por los resultados que arrojó el análisis de los taludes reforzados donde se encontró

que, contrario a lo anterior, cuanto mayor era el porcentaje y la profundidad de reforzamiento los taludes presentaban menor cantidad de deformaciones y conservaba la geometría inicial.

En una tercera instancia del desarrollo de la metodología de la investigación se realizaron análisis numéricos empleando el software Slide, donde se modelaron las geometrías de los taludes con las distintas características que poseía el suelo con y sin reforzamiento, dichas propiedades se obtuvieron previamente mediante los ensayos de laboratorio. El método de análisis que se utilizó fue Bishop simplificado en condición no drenada, a partir del cual se obtuvieron factores de seguridad mayores al reforzar el talud, tal y como se expone de manera anticipada en los siguientes resultados: en el suelo sin refuerzo se presentó un factor de seguridad con un valor menor que 1.1 ($FS < 1.1$), lo que indica que el talud es inestable; mientras que el valor del factor de seguridad obtenido en el análisis de los suelos reforzados permitió considerar el talud como estable debido a que este fue mayor que 1.1 ($FS > 1.1$) (Gaivilanes, 2019).

De los estudios realizados se pudo concluir que mediante las modelaciones físicas como las modelaciones numéricas se obtiene información importante de la estabilidad de los taludes, pues en los dos casos que fueron objeto de análisis se encontró que las raíces artificiales generaban un aporte significativo en comparación con los resultados obtenidos en los taludes sin refuerzo. Por una parte, la modelación física aportó información sobre las deformaciones y los movimientos que se producen en los taludes y a través de los registros fotográficos también fue posible realizar análisis cualitativos sobre la estabilidad; por otra parte, la modelación numérica realizada por medio del software Slide mediante análisis de equilibrio límite permitió cuantificar el Factor de Seguridad (FS), razón por la cual en este trabajo se consideró necesario combinar los dos tipos de análisis para obtener resultados más precisos en la investigación.

2. Problema de investigación

La inestabilidad de los taludes ocasiona múltiples pérdidas materiales y económicas, incluso este es un factor que incrementa los índices de mortalidad, dada la cantidad de vidas que llegan a cobrar los deslizamientos y las remociones en masa que se producen en las superficies de estas pendientes. Esta problemática se presenta con el agravante de que generalmente no se tiene en cuenta el riesgo de que en las superficies de los taludes se produzcan fenómenos como deslizamientos y remociones en masa, debido a lo cual en la mayoría de los casos no se cuenta con medidas de prevención contra la ocurrencia de estos desastres o con medidas que reduzcan las afectaciones que en potencia estos pueden ocasionar. A este agravante se podría adicionar el hecho de que, al no tomar en cuenta el riesgo de ocurrencia de estos desastres, a largo plazo se comienzan a emplear técnicas convencionales que no tienen ni consideran la necesidad de evaluar el impacto negativo que estas pueden generar en el medioambiente.

Si bien este escenario no parece ser alentador, dado el creciente interés que han mostrado diversos investigadores y profesionales en el área de la Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia son muchos los países, entre ellos Colombia, los que en los últimos tiempos han comenzado a implementar técnicas de bioingeniería como solución a estos problemas geotécnicos. Pese a ello en la actualidad existe una gran incertidumbre sobre cuál es la adecuada modelación física y el efecto que tienen los suelos reforzados con diferentes sistemas sobre la estabilidad de los taludes.

La incertidumbre que persiste en esta materia está dada porque, aun cuando la modelación física en centrífuga geotécnica permite simular un prototipo en escenarios controlados con bajos presupuestos y parámetros que tienen influencia en el comportamiento mecánico del talud (García y Melentijevic, 2015), realizar estas pruebas físicas puede resultar ser una tarea realmente difícil en algunas ocasiones debido a que en ellas se debe garantizar la escala y las condiciones adecuadas. Así lo indicaron en sus investigaciones los autores Liang, Bengough et al. (2017), Sonnenberg et al. (2010) y Eab et al. (2015).

Basado en lo expuesto surgieron las siguientes preguntas, las cuales guiaron el desarrollo de la presente investigación: en primer lugar se cuestionó ¿cómo se deben modelar los taludes en centrífuga geotécnica para conservar las leyes de escala?, en cuanto al análisis físico y cualitativo se preguntó ¿cómo influyen los sistemas de reforzamiento en la estabilización de taludes?,

respecto al análisis numérico se cuestionó si ¿existe un incremento en el factor de seguridad al reforzarse los taludes con vegetación?, y luego se indagó en el estudio ¿cómo se relacionan los dos tipos de análisis antes mencionados en la estabilidad de los taludes?

3. Alcance e importancia

Alcance

En este trabajo de investigación se creó una técnica de modelación física en centrífuga geotécnica para simular taludes reforzados artificialmente con fibra de vidrio en los laboratorios de la ECI Julio Garavito. Primero se realizaron análisis físicos a través de imágenes tomadas en el laboratorio antes y después de hacer el ensayo en la centrífuga geotécnica; luego, usando este registro se crearon vectores de desplazamiento en AutoCAD mediante los movimientos que se generaron al comparar las dos imágenes obtenidas, lo que permitió analizar los movimientos y cuantificar las deformaciones de los taludes. Posteriormente, se realizaron análisis numéricos empleando el software Slide mediante el método de análisis Bishop simplificado en condición no drenada, a través del cual se obtuvieron los factores de seguridad que incrementaron sus valores a medida que aumentó el porcentaje y la profundidad del reforzamiento.

Importancia y relevancia:

El principal aporte que genera esta investigación al conocimiento producido en las disciplinas de Ingeniería Civil y Geotecnia corresponde a la técnica de modelación física en centrífuga geotécnica, la cual simula adecuadamente un talud homogéneo con y sin refuerzo artificial (fibra de vidrio) en diferentes porcentajes y profundidades. Este aporte convierte el presente estudio en una base para realizar futuras investigaciones en las que se utilice la misma técnica y se varíe, por ejemplo, el refuerzo, el tipo de suelo, la geometría del talud u otros aspectos importantes del suelo.

Por otra parte, dado que el pilar principal de la ingeniería moderna se basa en aportar soluciones óptimas en las que se empleen recursos sostenibles y amigables con el medioambiente, otro aporte que otorga especial relevancia a esta investigación son los resultados obtenidos del análisis realizado, donde se determinó que en los taludes reforzados con vegetación se produce un incremento en el factor de seguridad al mismo tiempo que se genera una mayor estabilidad en el talud. De lo anterior se concluyó que reforzar el suelo mediante vegetación es una solución viable para mejorar y aumentar la estabilidad de los taludes; además de comprobarse que esta importante práctica de bioingeniería permite elaborar diseños apropiados para dar soluciones óptimas a los problemas de inestabilidad y erosión del suelo y los cuales deben complementarse con los conocimientos de ramas como la botánica y la ingeniería ambiental.

4. Objetivos

Objetivo general

Estudiar el efecto que tienen tres sistemas de reforzamiento diferentes en la estabilidad de taludes, usando la modelación física en centrífuga geotécnica.

Objetivos específicos

- Definir la técnica de preparación de los modelos en centrífuga geotécnica que permita simular correctamente las condiciones reales del prototipo.
- Establecer la influencia del reforzamiento artificial en la superficie de falla de los modelos físicos mediante el análisis de imágenes — fotointerpretación usando AutoCAD.
- Definir la influencia de los sistemas de reforzamiento artificiales en el factor de seguridad de los modelos numéricos de Slide.

5. Revisión bibliográfica

5.1. Efecto de la vegetación en la estabilidad de taludes

En el área de la Ingeniería Civil es importante analizar los proyectos que involucran estructuras como los taludes, tales como los que se numeran a continuación: terraplenes en carreteras, presas de tierra, canales, entre otros. Por ello, se considera esencial comenzar esta presentación con la definición del término *talud*, junto con la descripción de los diferentes tipos de taludes que se pueden encontrar y los principales problemas que estas estructuras presentan. A continuación, se describen estas características.

Definición y tipos:

De acuerdo con Matteis (2003) por *talud* se puede entender lo siguiente:

[Es] cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal o nivel cero, que adoptan permanentemente las estructuras de tierra. Los taludes pueden ser naturales o artificiales: al primer tipo de talud se le denomina también *laderas*, formados por la naturaleza a través del tiempo sin la injerencia del hombre; al segundo tipo se le denomina *talud* debido a que se tiene la intervención del hombre para su construcción.

Principales problemas de los taludes:

Tal y como lo indicó Suárez (1998) en su trabajo de investigación sobre *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, los deslizamientos se pueden definir como se cita a continuación:

[Son] uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en los bienes, por valor de decenas de billones de dólares cada año; sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90 % de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Esta problemática ha ganado una especial relevancia en el escenario nacional con el tiempo, lo que ha conllevado a que cada vez se hayan implementado más medidas de mitigación de deslizamientos y erosión excesiva, al tiempo que ha contribuido a una mayor aplicación en

general de prácticas de estabilización de taludes para garantizar la funcionabilidad de los proyectos de este tipo. No obstante, por lo general se han empleado técnicas convencionales para aumentar la estabilidad de los taludes que involucran el uso de materiales como el acero y el hormigón, lo que deriva en el ejercicio de una práctica que resulta poco amigable con el medioambiente.

En contraposición, una de las técnicas más amigables con el medioambiente que mayormente se usa en la actualidad es la estabilización del talud mediante el reforzamiento a través del uso de vegetación (Highland y Bobrowsky, 2008). Es así debido a que esta técnica, además de ser una solución amigable con el medioambiente, resulta ser muy eficiente en la mitigación de la problemática por el aporte mecánico que generan las raíces en la estabilización del talud. Dicha práctica es conocida como *protección biotécnica* o *técnicas de bioingeniería* y se ha desarrollado con diferentes tipos de vegetación, un ejemplo de estas lo constituyen los pastos como el Vetiver que es el tipo de planta que mayormente se ha estudiado con estos fines de mitigación, debido a que tiene un funcionamiento óptimo en una gran variedad de entornos y genera un aporte significativo en la estabilidad de taludes, el mayor de ellos es el control de la erosión.

En la Figura N° 1 que se muestra a continuación se puede observar la implementación del Pasto Vetiver, para llevar a cabo una práctica de estabilización de taludes/barrancas en zonas urbanas y en carreteras en la República Democrática del Congo.



Figura N° 1. (a) Siembra de pasto Vetiver en el talud de las zonas urbanas de La República democrática del Congo. (b) se evidencia el control del drenaje y el mejoramiento del talud tres meses después de su siembra. Obtenido de (Highland & Bobrowsky, 2008).

Hoy en día, aunque la experiencia ha demostrado de la mano de la investigación la efectividad que tiene el uso de vegetación como refuerzo en la estabilización de taludes al evitar problemas como, por ejemplo, de erosión, reptación y fallas subsuperficiales, existe mucha incertidumbre todavía con respecto a la cuantificación del efecto positivo que genera el uso de vegetación en la estabilidad de taludes.

Uno de los investigadores que resalta en el estudio de las contribuciones que aporta la vegetación en las prácticas de estabilización de taludes es Suárez (2009), quien afirmó que muchos factores de la vegetación podrían ser esenciales para la estabilidad de taludes, entre ellos mencionó los siguientes: “Volumen y densidad del follaje, ángulo de inclinación de la raíz, tipo, forma, diámetro, profundidad y resistencia del sistema de raíces”. Como se puede evidenciar en la Tabla 1, el reforzamiento con vegetación produce estabilidad en los taludes.

Tabla 1. Influencia de la vegetación en la erosión y la estabilidad del talud. Obtenido de (Madrid et al., 2014).

INFLUENCIA EN LA EROSIÓN SUPERFICIAL	Protección mecánica	El follaje y los residuos de las plantas disipan la energía de la lluvia y previenen la separación de las partículas del suelo por salpicadura.
	Refuerzo biomecánica del suelo en profundidad	Las raíces retienen las partículas del suelo aumentando su resistencia a la erosión laminar y, sobre todo, al flujo concentrado.
	Retención	El follaje y los tallos incrementan la aspereza del terreno, disminuyendo la velocidad de la escorrentía.
	Infiltración	Las plantas y otros residuos ayudan a mantener la porosidad y permeabilidad del suelo, retrasando el comienzo de la escorrentía.
INFLUENCIA EN LA ESTABILIDAD DEL TALUD	Refuerzo de las raíces	Las raíces refuerzan mecánicamente el suelo transfiriendo la tensión de corte del suelo a una resistencia a tracción sobre ellas.
	Disminución de la humedad del suelo	La transpiración y la interceptación por el follaje, puede reducir la humedad y limitar el aumento de una presión de poro positiva.
	Refuerzo	Los tallos pueden actuar como pilotes de refuerzo o apeo, o los contrafuertes de un arco, para contener las fuerzas de corte.
	Sobrecarga	El peso de la vegetación puede, en algunas circunstancias, incrementar la presión de confinamiento de la capa de deslizamiento del talud.

Todos estos factores podían aportar a la estabilidad del talud al interceptar la lluvia, extraer la humedad del suelo, reforzar el suelo al aumentar la resistencia al cortante, retener las partículas del suelo y disminuir la susceptibilidad de la erosión. De esa manera la vegetación contribuye a dar mayor estabilidad al talud y a controlar la erosión mediante: las hojas que favorecen la transpiración; el tallo que permite la conducción y da soporte; y la raíz que aporta a la estabilidad con sus capacidades de anclaje, absorción y conducción, siendo este último entre todos los anteriores el elemento fundamental que aporta a la estabilidad. Por consiguiente, es necesario conocer cuáles son las principales características de la raíz.

En relación con ello, ya en diferentes partes del mundo se ha encontrado evidencia de que la vegetación de árboles, arbustos y pastos aporta estabilidad a los taludes y que esta, además, genera una serie de ventajas en tal contribución (Suárez, 2009). Es así como se señaló en el estudio de León (2001), pues, “en teoría, cuando ocurre una falla, la raíz se deforma para actuar como refuerzo, desarrollando resistencia a la tracción [y] evitando de tal forma no solo su rompimiento, sino, además, retardando la falla del suelo”.

El efecto mecánico que se presenta en las raíces puede introducirse en la ley de falla de Mohr-Coulomb a través de un término denominado "cohesión aparente", que se suma a la cohesión efectiva del suelo. De acuerdo con Gentile et al. (2010) la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = (c' + c_R) + \sigma' \tan \phi' = (c' + c_R) + (\sigma - u) \tan \phi' \quad [1]$$

Donde τ es el esfuerzo cortante en el plano de falla, σ' es el esfuerzo efectivo normal, que a su vez es la diferencia entre el esfuerzo total σ y la presión de poros u , c' es la cohesión efectiva.

La cohesión aparente se puede expresar de la siguiente manera:

$$C_R = 1.2T_R \left(\frac{A_R}{A} \right) \quad [2]$$

Donde C_R es la cohesión aparente generada por la presencia de las raíces y ϕ' es el ángulo de fricción interna del suelo. T_R es la resistencia a la tracción media de la raíz, A_R el área de la sección transversal del suelo ocupada por las raíces por unidad de área “Root Area Ratio”

(RAR), calculada como AR/A , donde AR es el área total de la sección transversal de todas las raíces y A es el área de suelo de la superficie total de falla (Gentile et al., 2010).

Los valores de resistencia a la tracción de las raíces generalmente dependen de varios factores como son: la especie de la vegetación, sus dimensiones, la morfología y las direcciones espaciales de las raíces. Específicamente, en este trabajo los resultados de la experimentación que se llevó a cabo en el laboratorio demuestran que la resistencia a la tracción disminuye generalmente con el diámetro de la raíz, como lo representaron Gentile et al. (2010) en las curvas de resistencia a la tracción vs. Diámetro, que incluyeron en su estudio, tal y como se muestra en la Figura N° 2.

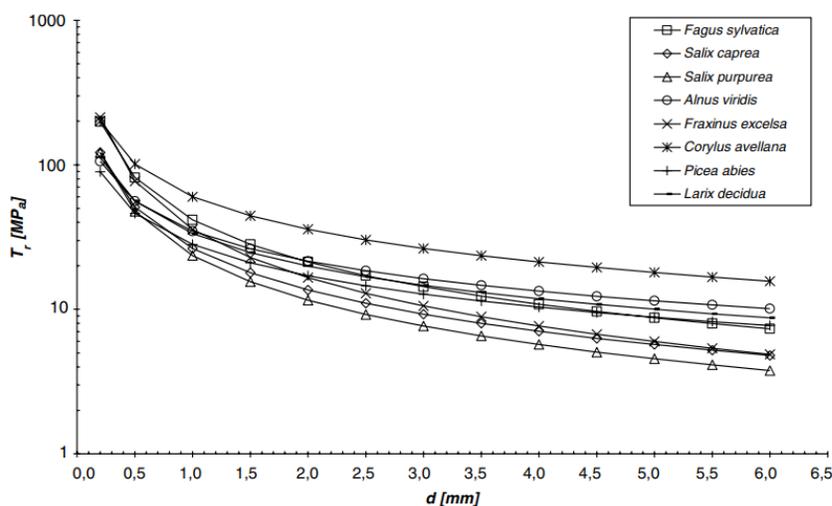


Figura N° 2. Curvas resistencia a la tracción vs diámetro, para diferentes especies de vegetación.

Obtenido de (Gentile et al., 2010).

Profundidad y diámetro de las raíces en pastos:

Si bien las raíces de plantaciones como árboles, arbustos o especies más grandes que los pastos tienen mayores alcances en lo que respecta a la profundidad del talud, los autores Walker y Fell (2013) han señalado en un estudio que las raíces que tienen un diámetro menor de los 20 mm son el elemento de la vegetación que mayor contribución genera a la estabilidad de los taludes, incluso su aporte es mayor del que pueden generar las raíces de mayor diámetro o superiores a

los 20 mm. Esta deducción se obtuvo luego de comparar los resultados de resistencia al corte que realizaron investigadores como Swanston (1970), O'Loughlin (1974, 1982), Waldron et al. (1983), entre otros, en sus ensayos con diferentes especies y distintos tipos de vegetación.

Da cuenta lo anterior de la importancia de conocer la longitud y la profundidad del refuerzo, la cual normalmente corresponde a 20 cm, salvo algunas excepciones que se mencionan en páginas posteriores del presente documento. Todas estas se hallarán en estricta dependencia de las condiciones de la plantación, la especie y el terreno; pues si alcanzan macizos rocosos permitirán hacer anclajes y brindar un mayor aporte (Suárez, 2009).

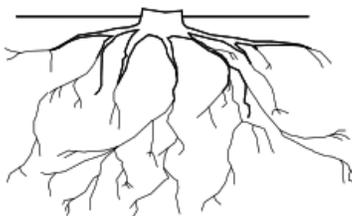
Morfología de las raíces

De acuerdo con Suárez (2009) hay tres formas típicas de raíces:

- **Raíz de extensión lateral:** En este caso la extensión lateral de las raíces es mayor que su profundidad (siendo poco profundas), el anclaje de estas raíces es paralelo a la superficie del terreno, podría ser mayor su profundidad de refuerzo si hay presencia de un macizo rocoso cercano a la superficie del terreno (Suárez, 2009). Un diagrama de este tipo de raíz se encuentra en la Figura N° 3 literal (a).
- **Raíz de extensión radial:** Este se extiende tanto lateralmente como en profundidad, produciendo que su forma estabilice deslizamientos poco profundos (Suárez, 2009). Un diagrama de este tipo de raíz se encuentra en la Figura N° 3 literal (b).
- **Raíz pivotante:** es una raíz vertical profunda centrada con ramificaciones de raíces pequeñas (Suárez, 2009). Un diagrama de este tipo de raíz se encuentra en la Figura N° 3 literal (c).



(a)



(b)

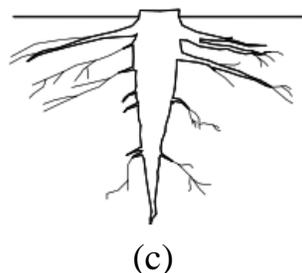


Figura N° 3. Tipos de raíz (a) Sistema de raíz lateral (b) sistema de raíz radial (c) sistema de raíz pivotante. Obtenido de (Suárez, 2009).

En los últimos años se han realizado una serie de trabajos cuyo objetivo investigativo ha sido estudiar de qué manera las raíces contribuyen a la estabilidad de taludes. A continuación, en este apartado se mencionarán de manera concisa algunos de los trabajos más relevantes que fueron encontrados en la materia.

Unas de las investigaciones precedentes que mayor resalte tienen en este campo de estudios son las realizadas por el autor Suárez (2009), quien a lo largo de su trabajo ha monitoreado taludes reforzados con plantas, encontrando que estas contribuyen principalmente al control de la erosión. Otros investigadores como Liang, Bengough et al. (2017), Sonnenberg et al. (2010) y Eab et al. (2015) han realizado, además, análisis en los que usaron la modelación física a escala reducida en centrífuga geotécnica, la cual tiene la ventaja de simular el suelo y mantener los esfuerzos iguales tanto en el modelo como en el prototipo. Hay que decir, sin embargo, que estos autores han encontrado desafíos en la modelación de la estabilidad de taludes con raíces, entre los cuales se presenta mayoritariamente el uso adecuado de las leyes de escala al utilizar raíces naturales (tiempo y control de crecimiento, longitud, diámetro y resistencia); así también otros investigadores como Ng et al. (2016) presentaron dificultades en sus estudios al momento de simular adecuadamente la resistencia y el diámetro de las raíces artificiales.

Y es que en general los trabajos investigativos en los que se estudia el efecto que tiene la vegetación en la estabilidad de taludes en escala real se ven obstaculizados principalmente por los costos. Es por ello por lo que Liang, Bengough et al. (2017) implementaron en su estudio la modelación física con vegetación, mediante la cual no solo demostraron la contribución que esta técnica genera a la estabilidad de los taludes, sino también a la protección del medioambiente. Pese a lo anterior, aún no se tiene certeza sobre cuál es exactamente el efecto que provoca la

morfología de las raíces en el proceso de estabilización. Hasta la fecha solo se tiene evidencia de que la vegetación puede aportar considerablemente a aumentar el rendimiento mecánico debido a que se comporta como un refuerzo con raíces (Mickovski et al., 2009), sin embargo, como se ha visto hasta aquí, esta es una práctica que técnicamente tiene grandes irresoluciones a pesar de los notables beneficios que genera a nivel económico y de sus grandes aportes en materia de protección del medioambiente.

5.2. Modelación física en centrifuga geotécnica

La centrifuga geotécnica es un dispositivo que puede proporcionar un campo de gravedad mejorado a un modelo físico a escala reducida a través de la aceleración centrípeta. Su origen se remonta al año 1869 cuando el matemático francés Édouard Phillips sugirió el uso de la aceleración centrífuga para el desarrollo de ensayos de laboratorio en modelos de escala reducida, al reconocer la importancia que estos tenían frente a los problemas analíticos complejos, y también la necesidad de desarrollar relaciones de escalas más apropiadas entre el modelo y los prototipos a fin de obtener similitudes de esfuerzos. No obstante, su modelo no se implementó en aquel entonces, sino fue hasta entrado el siglo XX cuando P. Bucky aplicó el modelo en el año 1931, es decir, casi 60 años después de haber sido propuesto, en investigaciones en problemas mineros de Estados Unidos de América y en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas con N. N. Davidenkov y G. Y. Porkrovsky en el año 1936 (Taylor, 2018).

A partir del año 1970 la modelación centrífuga se empleó a nivel global y desde ese momento hasta la actualidad se han venido implementado continuos avances en el modelo, los cuales se han concentrado mayoritariamente en países como Japón, Estados Unidos, naciones de Europa, Rusia y China; en menor medida se han dado algunos avances en los demás países de América. Es así como actualmente el modelo físico de centrifuga geotécnica ha llegado a ser considerado uno de los métodos más desarrollados en el campo de la Geotecnia (García y Melentijevic, 2015).

No hay que dejar de lado un aspecto que es sumamente importante en esta materia y es que muchos de los problemas geotécnicos se podrían considerar “no convenientes de analizar en escala real” en términos de costo y tiempo. Es así porque, según lo indicado por Gómez (2011), cuando no se trata de obras construidas específicamente para la experimentación su destino final

no permite llevarlas hasta la falla, por lo tanto, en su comportamiento solamente se puede apreciar una parte de las deformaciones del talud. Adicionalmente, ello genera incertidumbres respecto a la precisión de las condiciones de frontera.

Principios de los ensayos en centrífuga:

La modelización centrífuga consiste en construir un modelo a escala reducida de un prototipo real e introducirlo en una máquina centrífuga, con el objetivo de crear una simulación artificial de distintos procesos geotécnicos en un período de tiempo muy corto, comparándolo con los efectos a escala real (García & Melentijevic, 2015).

El principio básico de la prueba de centrífuga consiste en crear condiciones de esfuerzos similares a las aplicadas por gravedad en el campo a un prototipo, dentro o sobre un modelo, con dimensiones mucho más pequeñas que las del prototipo (Azizi, 2000).

En la Figura N° 4 se muestra el equipo que será empleado en el desarrollo de este trabajo, el cual consiste en una centrífuga que pertenece a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Esta posee dos canastas basculantes que se adaptan a las dimensiones y gravedades requeridas para la investigación.



Figura N° 4. Centrífuga Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Fuente propia.

La modelación física en geotecnia tiene como objetivo igualar los esfuerzos en el prototipo-modelo, esto se consigue de dos maneras: Aumentando la densidad del material ρ , o incrementando las fuerzas de masas g . Es fundamental que las propiedades del material del modelo (escala reducida) usado para simular el material del prototipo (escala real) satisfagan el interés de mantener la igualdad antes mencionada.

En la modelación física en geotecnia es posible desarrollar un problema dado de un modelo a un prototipo, contemplando las leyes constitutivas del material, así mismo como la simulación de problemas debido a: tiempo, costos o la construcción en sí misma ya que no suelen ser viables para desarrollar en campo. Es importante resaltar el efecto de la aceleración gravitacional en la simulación, pues esta es N veces más fuerte que la gravedad terrestre. Si una aceleración en centrífuga N veces la gravedad de la tierra (g) es aplicada a un suelo con densidad ρ , el esfuerzo en el modelo σ_{vm} (escala reducida) a una profundidad h_m (escala reducida) es:

$$\sigma_{vm} = N \rho g h_m \quad [3]$$

Mientras tanto, el esfuerzo en el prototipo σ_{vp} (escala real) a una profundidad h_p (escala real) está dado por:

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad [4]$$

De acuerdo con el principio básico de la centrífuga se tiene:

$$\sigma_{vp} = \sigma_{vm} \quad [5]$$

En consecuencia, si las dimensiones respectivas del modelo y prototipo fueron:

$$h_m = \frac{R}{n} \quad [6]$$

$$h_p = N \frac{R}{n} \quad [7]$$

los esfuerzos son similares, por lo que claramente las dimensiones del modelo y del prototipo son:

$$h_m = \frac{h_p}{N} \quad [8]$$

Leyes de escala

- **Longitud:**

Las similitudes de esfuerzos entre un modelo sometido a una aceleración de Ng y un prototipo sometido a la aceleración debido a la gravedad g implican que las dimensiones del modelo son N veces menores que las del prototipo. Por lo tanto, usando el (mismo) subíndice m para el modelo y p para el prototipo, se deduce que:

$$L_m = L_p N^{-1} \quad [9]$$

- **Peso unitario**

Partiendo de que las densidades del modelo y el prototipo son idénticas, los pesos unitarios del modelo es N veces mayor que el del prototipo, de esta manera se obtiene:

$$\gamma_p = \rho g \quad [10]$$

$$\gamma_m = \rho Ng = N\gamma_p \quad [11]$$

Continuando con las cantidades físicas empleadas en este trabajo, se presenta un resumen de estas en la Tabla 2.

Tabla 2. Leyes de escalas para las pruebas de centrifugas, Obtenido de (Azizi, 2000).

Cantidad física	Ley de escala	Factor de escala
Aceleración (m/s)	$g_m = Ngp$	N^{-1}
Masa, densidad (kg/m³)	$\rho_m = \rho_p$	1
Esfuerzo (kPa)	$\sigma_m = \sigma_p$	1
Deformación	$\varepsilon_m = \varepsilon_p$	1
Velocidad m/s²	$V_m = V_p$	1
Longitud (m)	$L_m = L_p/N$	N
Tiempo (evento estático/difusión) s	$t_m = t_p/N_2$	N^2
Tiempo (evento dinámico) s	$t_m = t_p/N$	N
Desplazamiento, amplitud	$d_m = d_p/N$	N
Peso unitario (N/m³)	$\gamma_m = N\gamma_p$	N^{-1}

En la Tabla 3 se presentan las dimensiones en modelo y prototipo de las canastas basculantes, correspondientes a la caja de la centrífuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ECI. Resulta importante definir la escala para mantener la igualdad, en este trabajo se emplearon $N= 100$ g. En el desarrollo de este trabajo se escalaron las propiedades del suelo y las raíces.

Tabla 3. Dimensiones de la caja basculante de la centrífuga geotécnica, tanto en modelo como en prototipo. Fuente propia.

Dimensiones modelo (cm)		Factor de Escala ($N = 100$ g)	Dimensiones prototipo (m)
Ancho	10	$L_{pA} = L_m * N$	10
Alto	12	$L_{pA} = L_m * N$	12
Largo	17	$L_{pA} = L_m * N$	17

Modelación física de taludes reforzados con vegetación natural

La modelación física de taludes reforzados con vegetación natural ha sido empleada en la centrífuga mediante leyes de escalas como las antes expuestas, con el fin de obtener datos sobre las propiedades mecánicas de algunas raíces. Diversos autores como Sonnenberg et al. (2010) han estudiado la contribución de las raíces naturales en la estabilidad de los taludes mediante el empleo de la técnica de modelación física con centrífuga, dado que esta permite que en prototipos de taludes de pequeña escala se prueben esfuerzos idénticos a los experimentados por modelos mucho más grandes, y en condiciones de prueba controladas permite que se prueben esfuerzos mejores que los obtenidos en experimentos de campo. Es por ello por lo que esta técnica se ha utilizado comúnmente para estudiar problemas de estabilidad de taludes (Take et al. 2004; Wang y Zhang, 2014).

En el estudio en referencia, los autores Sonnenberg et al. (2010) realizaron pruebas en centrífuga con cultivos de sauces jóvenes en condiciones controladas y con taludes que fueron fallados al aumentar la presión del agua, tal y como se observa en la representación de la Figura N° 5.

El método de análisis consistió en la fotointerpretación a partir del cual, posteriormente, se realizaron los cálculos de estabilidad del talud para cada falla. Los cálculos retrospectivos de estabilidad, según lo indicaron los autores, arrojaron que el sistema de raíz generaba un aporte al refuerzo; sin embargo, concluyeron que el aporte a la estabilidad no era tan significativo como lo

esperaban dadas algunas variaciones, diversificaciones que atribuyeron a las alteraciones de suelo que se presentaron como producto del crecimiento de la raíz, a la falta de control en otras condiciones requeridas para las pruebas y principalmente a problemas de la escala.

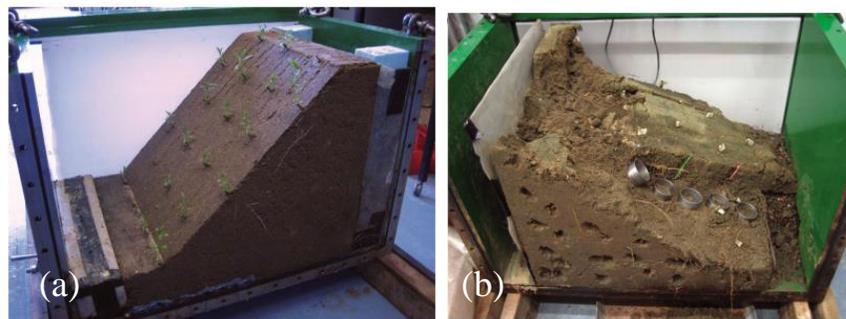


Figura N° 5. Talud con reforzamiento de vegetación, (a) antes y (b) después de ser fallado (prueba con sauce). Obtenido de (Sonnenberg et al., 2010).

De otra parte, los autores Liang, Bengough et al. (2017) estudiaron el efecto que puede generar en la estabilización la forma de las raíces de tres especies de vegetación diferentes, estas fueron: el sauce o *Salix* (árbol), el retamo espinoso o *Ulex europaeus* (árbol-arbusto) y las plantas *Festulolium Grass* (pasto-hierba). Estos análisis fueron realizados por los investigadores mediante modelos a escala reducida en centrífuga, los cuales aplicaron en vegetación natural. Ver Figura N° 6.

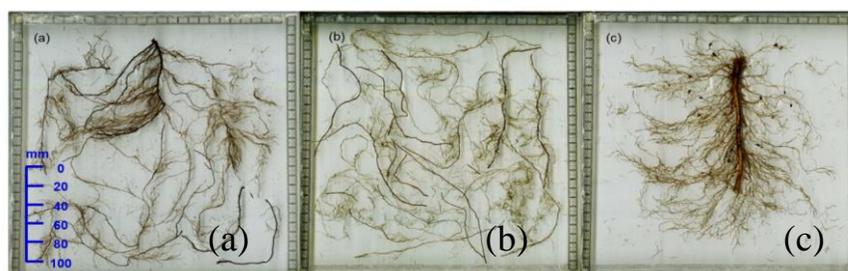


Figura N° 6. Morfología de las raíces estudiadas: (a) Sauce (árbol), (b) Festulolium Grass (pasto); (c) Retamo espinoso/ulex (árbol arbusto). Obtenido de (Liang, Bengough, et al., 2017).

Los resultados que Liang, Bengough et al. (2017) obtuvieron en su investigación se muestran en la Figura N° 7 donde se puede ver el crecimiento que experimentaron las raíces plantadas dentro del modelo en la caja de la centrífuga, así como también la morfología respectiva de las raíces típicas usadas para dar estabilidad a los taludes.

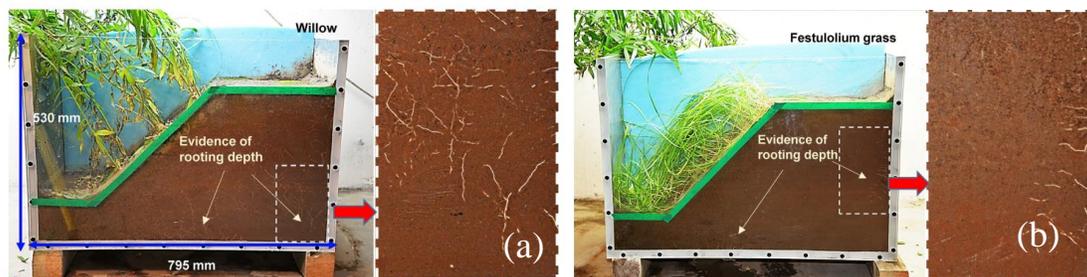


Figura N° 7. (a). Crecimiento de la raíz del sauce. b). crecimiento de la hierba plantada dentro la centrifuga. Obtenido de (Liang, Bengough, et al., 2017)

Una de las principales dificultades que presentaron los autores al momento de implementar la técnica presentada en la Figura N° 7 fue el control del crecimiento de las raíces, aun cuando estos realizaron cortes para definir y controlar la forma. Dicha dificultad no les permitió a los autores controlar el sistema de raíces ni definir, en consecuencia, su aporte en la estabilidad de los taludes (Liang, Bengough et al., 2017), lo que justifica la decisión de haber descartado el uso de esta técnica para los fines que se buscan en esta investigación.

En suma, en el estudio de las investigaciones tomadas en consideración para la sustentación de este trabajo se observó que estas buscaron cuantificar la contribución que generan las raíces naturales sobre la estabilidad de los taludes mediante la modelación física en centrífuga. Sin embargo, las disparidades que se encontraron en los ensayos de Sonnenberg et al. (2010) y Liang, Bengough et al. (2017) permiten deducir que es conveniente realizar las modelaciones físicas en centrífuga, empleando un reforzamiento con materiales artificiales que posean características similares a las de la vegetación natural. Lo anterior se dedujo al observar que de esa forma es posible tener el control en muchos aspectos que podrían generar variaciones en los resultados finales de la modelación.

Modelación para taludes reforzados con plantas artificiales

La modelación para taludes reforzados con plantas artificiales es un tipo de modelo físico que se ha empleado en diversas investigaciones como las realizadas por autores como Ng et al. (2016), quienes, en su estudio, representaron raíces artificiales con características similares a las raíces naturales mediante la modelación física en centrífuga y encontraron que los taludes presentaban estabilidad, sin embargo, despreciaron el aporte de la morfología en la estabilidad debido a que el enfoque de su trabajo investigativo consistió en evaluar la succión inducida por transpiración.

Estas técnicas de modelado físico que emplearon Ng et al. (2016) en la modelación de la vegetación fueron significativas en cuanto a los materiales, las prácticas y la vegetación usada para llevar a cabo dicha modelación, simulaciones artificiales para las cuales fue necesario analizar tres especies de arbustos comúnmente usadas en la rehabilitación de taludes y la restauración ecológica de las regiones tropicales:

- **Schefflera heptaphylla:** también conocida como Árbol Paraguas Enano, posee una raíz tipo primaria de la cual se derivan raíces secundarias cerca de su punta, lo que se podría denominar **raíz pivotante**.
- **Rhodomyrtus tomentosa:** también conocido como Mirto rosa, este arbusto posee una raíz en forma de corazón, y también se encuentra cerca de la superficie del suelo con predominantes raíces sub horizontales, común en pinos. También se conoce como sistema de **raíz con extensión radial**.
- **Melastoma sanguineum:** se denomina también como Melastoma de lengua de zorro, Esta especie de arbusto posee una raíz en forma de placa la cual posee raíces secundarias que se extienden lateralmente y sub- horizontalmente a pocas profundidades. Denominado también sistema de **raíz con extensión lateral**.

En la Figura N° 8 se presentan los tipos de raíces analizados (dimensiones expresadas en metros) dentro del estudio de Ng et al. (2016):

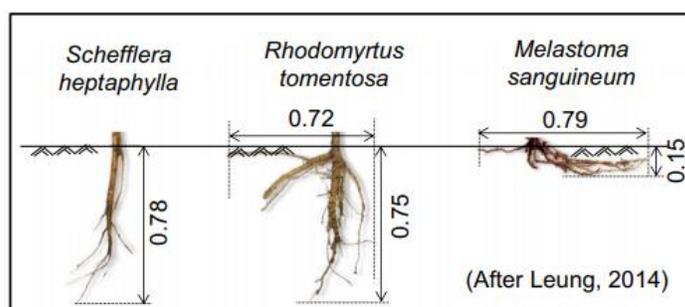


Figura N° 8. Crecimiento de la raíz dentro la centrifuga. Obtenido de: (Ng et al., 2016).

El material usado por Ng et al. (2016) para llevar a cabo la modelación de las raíces en la centrífuga fue el acetato de celulosa (CA), aplicación a partir de la cual, conforme lo indicaron los ensayos realizados, se demostró que estas raíces poseen propiedades mecánicas similares a las que poseen las raíces de los arbustos analizados. Las propiedades que se igualaron en el

modelo-prototipo fueron: el módulo elástico que corresponde a 83 MPa y una resistencia a la tracción de 31 MPa. En relación con estos resultados, se encontró que en los ensayos de corte directo reportados por Ng et al. (2016) el ángulo de fricción del suelo fue de 34° , unidad que se aproxima a los valores típicos encontrados en la relación raíz-suelo real.

Referente a la metodología implementada y los procedimientos que Ng et al. (2016) realizaron en su investigación, se empleó un talud de 45° de inclinación y múltiples raíces artificiales de igual geometría, además de usar la compactación como técnica para la modelación del suelo y grasa de silicona en las paredes de la caja/molde para minimizar una fricción indeseada. Adicionalmente, dentro del molde que correspondía a la superficie del talud, los autores hicieron una serie de perforaciones para instalar posteriormente las raíces artificiales (15 en total) de manera perpendicular a la superficie del talud, con una separación entre ellas de 1.73 mm. También emplearon un molde de madera para aportar firmeza a las raíces durante los vuelos en la centrífuga, con el fin de evitar daños en el modelo (ver Figura N° 9).

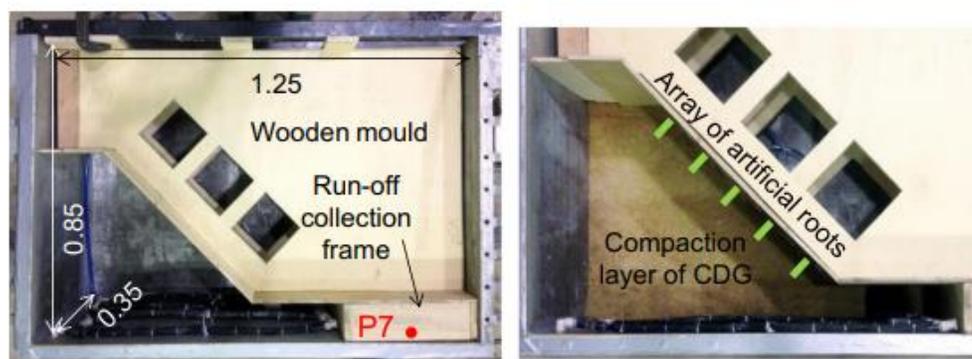


Figura N° 9. Montaje para ensayo en centrífuga con raíces artificiales. Obtenido de: (Ng et al., 2016).

Del análisis de esta investigación cabe destacar que, si bien es cierto que la técnica que Ng et al. (2016) emplearon para la realización de la modelación física con raíces artificiales generó importantes aportes, debido a que el enfoque de su investigación se centró en el efecto de la transpiración aún se considera inconclusa la inquietud planteada en este trabajo, la cual se centra en el estudio del efecto de la geometría de las raíces y su respectiva modelación física con material artificial en la centrífuga.

Por otro lado, los autores Liang, Knappett et al. (2017) realizaron una impresión en 3D en su estudio para desarrollar la modelación física en una centrífuga geotécnica, con el fin de simular

un movimiento de tierra similar al que provoca un terremoto y también el efecto que estos generan en los taludes reforzados con vegetación, mediante el uso de raíces artificiales durante el ensayo; para ello usaron plástico de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) impreso como material del modelado de la raíz, tal y como se observa en la Figura N° 10.

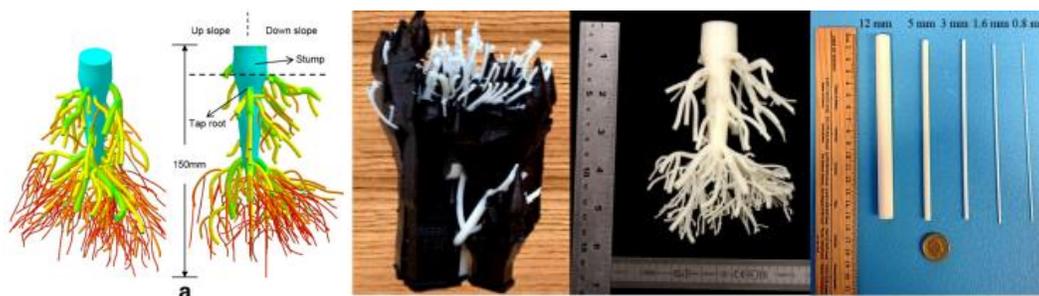


Figura N° 10. Raíces artificiales de ABS, impresas en 3D (Liang, Knappett, et al., 2017).

Ya en la fase del análisis Liang Knappett et al. (2017) comprobaron que la modelación en 3D es altamente representativa en cuanto a la forma y el comportamiento mecánico que tienen las raíces de vegetación natural frente a una actividad sísmica, lo que les permitió concluir que en esta área la forma no genera un aporte significativo. Sin embargo, en el documento que recoge la investigación de estos autores no se plasmó ningún análisis sobre el efecto que tiene la morfología de las raíces en la estabilidad de los taludes, además, es preciso considerar que la utilización de esta técnica de impresión en 3D tendría un alto costo y sería inasequible, razón por la cual se decidió que esta técnica no se implementaría en el desarrollo de este trabajo.

Una gran mayoría de los trabajos expuestos en este capítulo dan cuenta en sus conclusiones de que la presencia de raíces puede mejorar la estabilidad de los taludes, pero ninguno de los antes mencionados profundizó en lo referente al aporte de ciertas geometrías de raíces. No obstante, el factor de escala es un elemento fundamental para el desarrollo de este trabajo, pues, tal y como se indica en la literatura, considerar el diámetro de la raíz con el tamaño medio de las partículas del suelo (D50) le permitió a algunos de los autores citados como Liang, Bengough et al. (2017) garantizar el efecto del tamaño de grano en la interacción raíz-suelo, y de ese modo obtener el factor de escala N adecuado.

Por último, cabe mencionar que de acuerdo con Liang, Bengough et al. (2017) existe otro factor importante que se debe tener en cuenta en la modelación, a saber, los límites en las duraciones de trabajo de las centrífugas.

5.3. Efecto de la morfología de las raíces en la estabilidad de taludes

En el área de la Ingeniería Civil existen múltiples proyectos que se forman por taludes, algunos de ellos son los terraplenes en las carreteras, las presas de tierra, los canales, entre otros, en todos los cuales se tiende a implementar medidas de bioingeniería para garantizar que los proyectos contribuyan con el cuidado y la preservación del medioambiente al tiempo que aportan soluciones eficientes para las comunidades y los problemas humanos. Por esa razón, en la actualidad se hace necesario el empleo de técnicas mediante las cuales se puede verificar cuál es el efecto que genera la vegetación y, en específico, las raíces en la estabilización de estas obras.

De conformidad con lo anterior, en este apartado se exponen de forma resumida las investigaciones tomadas en consideración en este trabajo, donde se da cuenta de las principales contribuciones que genera el uso de vegetación y más concretamente de las raíces a la implementación y efectividad de las medidas de mitigación de daño al medioambiente. Aunque, cabe mencionar, aún no es claro si las raíces con ciertas geometrías ofrecen mejor refuerzo que otras que poseen formas diferentes.

Los estudios aquí expuestos han dado lugar al interrogante que se ha pretendido solucionar en el presente trabajo, a saber: ¿cuál es el efecto que generan tres porcentajes de reforzamiento diferentes en la estabilidad de taludes? Estas investigaciones son las realizadas por Ng et al. (2016), quienes estudiaron el efecto que genera la forma de las raíces de tres tipos de arbustos (árbol paraguas enano, mirto rosa y melastoma de lengua de zorro) en la magnitud y en la distribución de succión inducida por transpiración, cada una de las cuales posee una morfología que fue representada en el modelo geotécnico (dimensiones expresas en escala de prototipo) como se muestra en la Figura N° 11.

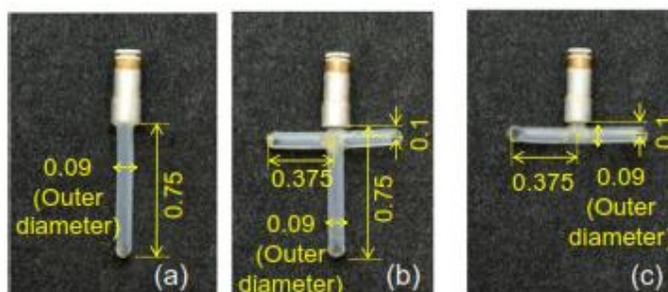


Figura N° 11. Simulación de las formas de raíces: (a) pivotante (b) extensión radial y (c) extensión lateral. Obtenido de Ng et al. (2016)

Las simulaciones de las raíces artificiales que realizaron Ng et al. (2016) plasmaron las tres morfologías de raíces típicas establecidas por los autores Stokes y Mattheck (1996), las cuales son conocidas como grifo, corazón y placa, a continuación se describen dichos sistemas:

- **Raíz tipo grifo:** consiste en una raíz primaria con varias raíces secundarias cerca a la punta (sistema de raíz pivotante).
- **Raíz con forma de corazón:** típica de las especies de pino, tiene una raíz primaria y sus raíces secundarias están generalmente cerca de la superficie del suelo de manera sub-horizontal (sistema de raíz radial).
- **Raíz en forma de placa:** común en las especies de abetos, consiste en raíces secundarias que se extienden lateralmente y sub-horizontalmente a poca profundidad (sistema de raíz lateral).

En su trabajo Ng et al. (2016) encontraron que la raíz con forma de corazón, también conocida como *sistema de raíz con extensión radial*, proporciona un mayor efecto de estabilización en el talud debido a que permite la retención de agua capilar; sin embargo, estos investigadores no consideraron en detalle las leyes de escala para las propiedades en el modelo. Al considerar la escala se tiene, en consecuencia, que a pesar de que el uso de este tipo de raíz es representativo y acertado en lo que respecta a las propiedades mecánicas estas poseen un problema a nivel de escala, por lo que la predicción del aporte que estas raíces generarían a la estabilidad del talud permite concluir que dicha contribución resultaría excesiva para la estructura.

De conformidad con lo anterior y de acuerdo con Sonnenberg et al. (2010), es preciso mencionar que las propiedades mecánicas de las raíces poseen diversas variables que se han de considerar al emplearlas en modelos como el antes mencionado. Entre estas variables se hallan: la edad, el diámetro, las especies de plantas y la distribución de estas en el terreno.

Así pues, tomando en consideración la importancia de determinar el efecto que tiene la morfología de las raíces en la estabilidad de los taludes, y con base en los aportes que proporcionan las investigaciones hechas por otros autores en esta rama, se concluye que es importante tener claridad sobre estas características en la vegetación empleada para dicha estabilización en Colombia. De esa manera será posible hacer una simulación adecuada en el modelo de la centrífuga usando técnicas y materiales similares.

Morfologías típicas de raíces para estabilidad usadas en Colombia

En Colombia, la bioingeniería tiene sus inicios en el año 1975 mediante la publicación del Manual de Conservación de Suelos de Ladera de la Federación Nacional de Cafeteros. Posteriormente se han hecho aportes acerca de la conservación, el manejo y el mejoramiento de los suelos con el fin de obtener beneficios económicos y ambientales (Miranda, 2016).

El enfoque de este trabajo se basa en los pastos, debido a las ventajas que ofrece en comparación con otro tipo de vegetación usada en la estabilidad de taludes en el país (Suárez, 2009). En la Tabla 4 se puede evidenciar dicha comparación:

Tabla 4. Ventajas y desventajas de los diversos tipos de plantas. Obtenido de (Suárez, 2009).

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedad para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de los ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

En los documentos e investigaciones realizadas a lo largo de la historia del país se encuentran algunos pastos comúnmente usados para estabilización de taludes-suelos. Por ello resulta importante conocer dichas propiedades y características. A continuación, se encuentra la descripción de tres tipos de pastos típicos usados.

5.3.1. Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*)

En la bioingeniería uno de los pastos con mejor rendimiento es el vetiver pues ofrece no sólo refuerzo de raíz sino en los efectos de evapotranspiración (cantidad máxima de agua que puede evaporarse en un clima dado por una cubierta vegetal continuo bien dotada de agua). Esta es tal vez una de las variedades de mayor utilización en el mundo. Esta especie crece desde el nivel del mar hasta 2000 msnm, en zonas con precipitación media anual desde 600 mm hasta 6000 mm, suelos con pH desde 4.5 hasta 10.5 y temperaturas desde 5° C hasta 45° C” (Suárez, 2001).

El uso del Vetiver en Colombia es frecuente, en la Figura N° 12 se observa el proceso de siembra con fines de estabilización de taludes.



Figura N° 12. Siembra de pasto Vetiver en Colombia. Obtenido de: (Escobar & Camacho, 2014).

La zona de suelos de alta humedad en las barreras de vetiver se limitaba a una profundidad menor de 50 centímetros (Hengchaovanich, 2003). En suelos saturados de agua o en pendientes con nivel freático alto, si se planta el vetiver, la masiva y profunda raíz podría elevar el agua por capilaridad lo que reduce la humedad en el suelo por lo que disminuye la presión de poros por agua (Chomchalow, 2000). Esta situación tendrá efectos positivos en la estabilidad de taludes, especialmente para las capas superficiales de 1 a 2 m. la cual es propensa a deslizamientos (fallas poco profundas) o en los flujos de suelos (Escobar & Camacho, 2014).

El pasto vetiver crece rápido en las pendientes pronunciadas o en los suelos altamente erosionables y llega a ser funcional en tan solo 3- 5 meses. Asimismo, puede sobrevivir en suelos de mala calidad, con alta acidez, alcalinidad o salinidad, y puede soportar periodos prolongados de sequía e inundación (Escobar & Camacho, 2014). Aunque los tallos muestran detalles anatómicos similares al de otros pastos, morfológicamente es diferente debido a que tiene nudos hinchados. Las raíces son fibrosas y de longitudes mucho mayores que otros pastos (Grimshaw & Barker, 1995).

Características de la planta:

La planta crece en grandes macollas (conjunto de tallos que nacen de un mismo pie de la planta) a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa, formando un sistema de hojas densamente tupido. El Vetiver forma macetones concentrados y no es invasiva, la planta puede permanecer en el sitio hasta 60 años (Grimshaw & Barker, 1995). Las raíces son fibrosas y extraordinariamente profundas (ver Figura N° 13), formando un sistema extensivo de raíces con gran densidad, aunque de pequeño diámetro.



Figura N° 13. Raíz del pasto Vetiver. Obtenido de (Suárez, 1998).

Según Suárez, (2001) Este sistema de raíces presenta gran resistencia a la tracción y grandes aportes en el control de la erosión, resistiendo velocidades muy altas de corriente. El Vetiver crece rápidamente en terraplenes de suelos sueltos, debido a que la raíz profundiza más fácilmente en suelos sueltos que en suelos duros y alcanza mayores profundidades.

Propiedades mecánicas:

- ✓ **Resistencia media a la tracción:** 75 MPa para diámetros de raíz de 0,7- 0,8 mm, equivalente a 1/6 del reforzamiento con acero blando, y un incremento de la resistencia al corte de 39% a una profundidad de 0.5 m (Herrera, 2015).
- ✓ **Sistema radicular:** la raíz es de 2.0 a 3.0 m de profundidad aproximadamente a los 2 en el primer año (Herrera, 2015). controlar la escorrentía y la erosión total del suelo (pérdida de suelo): con 73 y 98% de reducción, respectivamente (Herrera, 2015).

Como se observa en la Figura N° 14, los autores Hengchaovanich y Nilaweera (2007) encontraron que la fuerza de tensión de las raíces de vetiver incrementa con una reducción en el diámetro de las raíces. las raíces finas, suministran mayor resistencia que las raíces gruesas. La fuerza de tensión de las raíces del vetiver varía entre 40-180 MPa en un rango de diámetro de raíces entre 0.2 – 2.2 mm (0.008-0.08 pulgadas).

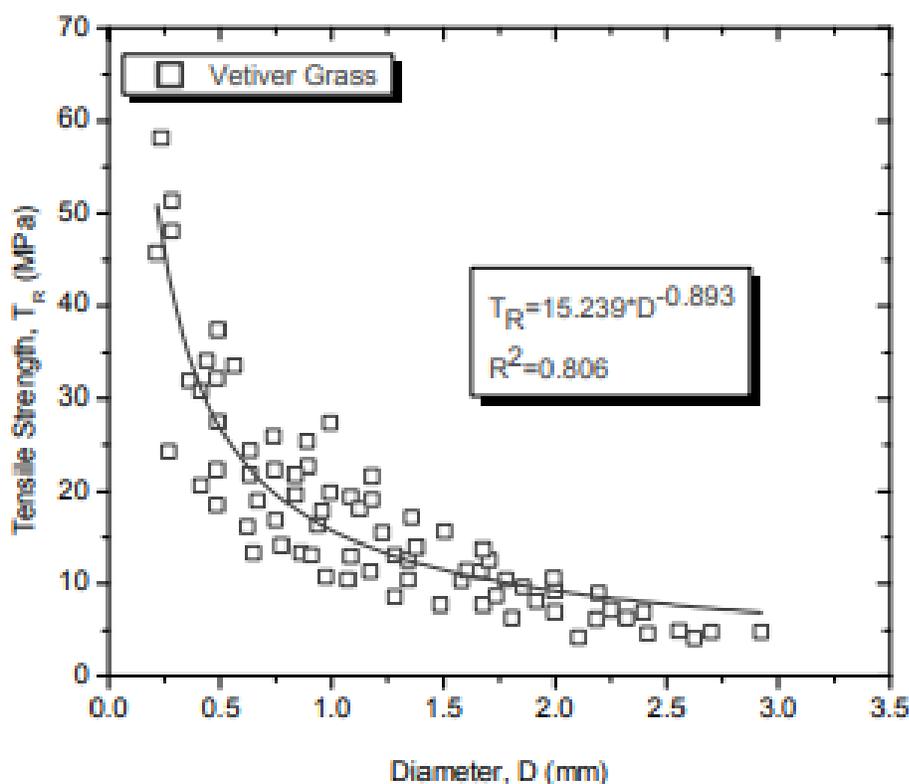


Figura N° 14. Relación entre el diámetro de la raíz y la resistencia a la tracción del Vetiver.

Obtenido de (Hengchaovanich & Nilaweera, 2007).

5.3.2. Pasto Brachiaria (*Brachiariadecumbens*)

Este pasto también es conocido como: Alambre, barrera, braquiaria, brachiaria, pasto peludo, pasto de las orillas. Pertenece a la familia de las Poaceae (gramíneas), vigorosa y perenne, tiene adaptación climática hasta 2000 msnm, la temperatura ideal de crecimiento es de 28 a 33 ° C (Gonzalez & Sierra, 2014). Ver Figura N° 15 donde se presenta el registro fotográfico de este tipo de vegetación.



Figura N° 15. Pasto Brachiaria sembrado en Colombia para estabilización de taludes. Obtenido de (Gonzalez & Sierra, 2014).

Usualmente de suelos de mediana a alta fertilidad, requiriendo buen drenaje y clima de regiones tropicales puede tolerar una estación seca de 4 meses, pero desaparecerá en condiciones secas prolongadas, al tener poca tolerancia a las inundaciones, prospera mejor en suelos bien drenados y puede crecer muy rápido. se usan ampliamente para controlar la erosión (Teerawattanasuk et al., 2014).

Características de la planta: con tallos decumbentes/erguidos que forman falsos estolones; enraízan hasta el tercer o cuarto nudo; los tallos crecen en forma de manojos erectos y densos y alcanzan hasta 1.5 m de largo. Sus hojas pueden llegar a medir 35 cm de largo por 2 cm de ancho, son cortas y vellosas, en forma laminar, lanceoladas, de color verde intenso y muy brillante. Tiene bordes duros y cortantes (Olivera et al., 2006). *Su sistema de raíz puede alcanzar hasta 2 metros de profundidad*, esto es especialmente bueno ya que puede explorar el perfil del suelo buscando agua y nutrientes. Es de crecimiento erecto y forma macollas con una altura promedio de 1.3 metros. Destaca por su tolerancia a la sequía. (Pastos y Forrajes, 2018). En la Figura N° 16 se observa el registro fotográfico del sistema de raíces de este pasto:



Figura N° 16. Raíz de pasto Braquiaria (a) Sistema de raíz completo (b) zoom del sistema de raíz. Obtenido de (Pastos y Forrajes, 2018).

Propiedades mecánicas: En la Tabla 5 relacionan las principales propiedades de este pasto:

Tabla 5. Propiedades del pasto Braquiaria. Modificada de: (Teerawattanasuk et al., 2014).

Espece	Número de muestras	Diámetro de la raíz D (mm)	Fuerza de tracción máxima Tu (mN)	Esfuerzo de tracción Ti (MPa)	Módulo de Young Er (MPa)
Brachiaria	39	0.30	2010.23	18.73	236.05
	39	0.70	7207.41	29.13	1609.23

Según Teerawattanasuk et al. (2014) los valores de resistencia a la tracción de la raíz aumentan al incrementar el diámetro de la raíz. En la Tabla 6 se relacionan entre la cohesión del suelo y la raíz de este pasto:

Tabla 6. Propiedades del pasto Braquiaria. Modificada de: (Teerawattanasuk et al., 2014).

Resultados de corte directo de cohesión de la raíz (Cr) y suelo (Cs) en kPa			
Tiempo de crecimiento (Meses)	Suelo (Cs)	Brachiaria (Cr)	Cs + Cr
2	8.77	1.27	10.04
4	9.23	1.15	10.39
6	8.02	1.15	9.17

Este estudio muestra que las raíces contribuyen significativamente al aumento de la resistencia al corte del suelo. Las contribuciones surgen principalmente de la cohesión. En la Figura N° 17 los resultados también indican que la cohesión aumenta en el suelo debido a la penetración de las raíces (Teerawattanasuk et al., 2014).

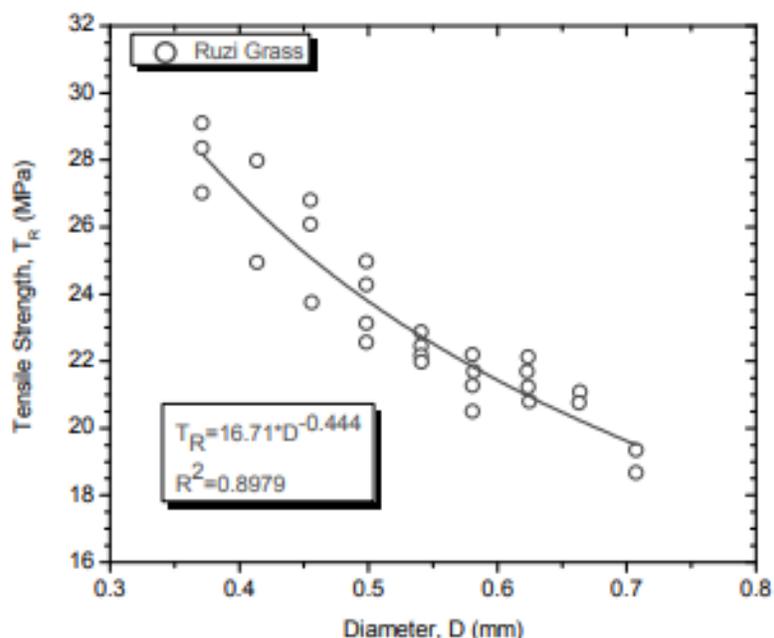


Figura N° 17. La relación del diámetro de la raíz y la resistencia a la tracción del pasto brachiaria. Obtenido de (Teerawattanasuk et al., 2014).

5.3.3. Pasto San Agustín (*Stenotaphrum secundatum*)

Es una gramínea de crecimiento relativamente lento, que tolera taludes de pendiente alta, no requiere poda. El pasto San Agustín no se recupera después de un incendio y hay que hacer resiembra. Se extiende fácilmente en forma lateral ayudando al control de la erosión (Suárez, 2001).

Algunos estudios de estabilización en Colombia consideran que es un pasto recomendable para la estabilización de taludes bajo las condiciones climáticas y características del suelo específicas; pero considerando una tasa de crecimiento en comparación con el porcentaje de cobertura demasiado largo (Gonzalez & Sierra, 2014). Ver Figura N° 18 en la que se presenta el registro fotográfico del paso San Agustín.



Figura N° 18. Pasto San Agustín en Colombia. Obtenido de (Gonzalez & Sierra, 2014).

Características de la planta: Posee hojas cortas de color verde intenso de disposición típicamente rastrera. Su presencia en bajos sobre pastoreados, la hacen una especie fácilmente reconocible. Forma manchones importantes donde se hace excluyente por su tapiz cerrado. Su productividad es media y su calidad muy buena. El Pasto de manera natural alcanza una longitud de 12 a 15 cm (la lámina del limbo) – sin embargo, su altura total debe mantenerse entre 2.5 y 3.5 cm. El color del follaje se caracteriza como verde limón con un tono brillante (Pasto Tek, 2013).

La profundidad de la raíz puede alcanzar los 20 cm bajo la superficie natural, una profundidad relativamente somera que permite tolerar sequías de entre 3-4 meses (largos períodos). La tolerancia a la sequía aplica solamente cuando el pasto haya enraizado antes de someterse a estas condiciones adversas, para que vía el conducto raizal se alimente la humedad disponible en el suelo (Pasto Tek, 2013). El sistema de raíz se puede ver Figura N° 19.



Figura N° 19. Raíz del pasto San Agustín. Obtenido de: (Southernmedia, 2021)

Propiedades mecánicas:

En la Tabla 7 es posible verificar la resistencia a la tensión de este pasto en comparación con otros estudiados:

Tabla 7. Resistencia a la tensión del pasto San Agustín. Obtenido de (Quirós, 2012).

Tipos de pasto	Diámetro promedio de las raíces (mm)	Resistencia a la tensión promedio (kg/cm ²)
Juncellus serotinus (late juncellus)	0,38±0,43	250±43
Paspalum dilatatum (zacate dallis)	0,92±0,28	200±31
Trifolium repens (trebol blanco)	0,91±0,11	270±34
Chrysopogon Zizanioides (pasto vetiver)	0,66±0,32	868±318
Eremochloa ophiuroides (zacate san agustín)	0,66±0,05	278±18
Paspalum notatum (pasto bahía)	0,73±0,07	196±37
Zoysia matrella (pasto manila)	0,77±0,67	179±29
Cynodon dactylon (pasto bermuda)	0,99±0,17	137±22

5.4. Fotointerpretación y análisis de imágenes en AutoCAD

Esta es una técnica que tiene como objetivo estudiar o analizar la información extraída mediante aplicaciones visuales y digitales (Ramírez, 2020). El uso de dicha metodología sirve para obtener mediciones a través de fotografías. Su posterior análisis permite llegar a conclusiones cualitativas de manera indirecta ya que las medidas no se efectúan sobre el objeto sino sobre las imágenes de este (Cardozo, 2020).

Generalmente la fotointerpretación suele convertirse en una disciplina económica, factible y hoy en día es muy aplicada a resolver incógnitas de tipo geotécnico (Cardozo, 2020). En este trabajo será el complemento de los ensayos empleados en la centrífuga geotécnica que busca comprobar el efecto de la geometría en la estabilidad de los taludes de manera analítica por medio de registros fotográficos analizados en AutoCAD.

6. Metodología

6.1. Modelación física

- **Determinación del tipo de suelo que se va a utilizar para realizar las modelaciones físicas:**

Con el fin de determinar el tipo de suelo a emplear en las modelaciones físicas se realizó un análisis de diferentes estudios e investigaciones con respecto a los suelos reforzados que comúnmente se usan en la bioingeniería.

A partir de los resultados predominantes que se obtuvieron de este análisis se definió que el tipo de suelo a utilizar debe corresponder a un material homogéneo y cohesivo. Después de realizar varios ensayos en el laboratorio se encontró que el caolín en estado puro, el cual es un material polvoriento y fino de color blanco, presentaba características similares a las requeridas cuando se mezclaba con un contenido de humedad de 1.5 veces el límite líquido (LL) que eran principalmente la homogeneidad y la facilidad de manipulación.

Para garantizar las escalas adecuadas en los modelos físicos fue necesario realizar la caracterización del material.

- **Caracterización del caolín mediante ensayos de laboratorio.**

Se realizaron ensayos de caracterización en el laboratorio para la identificación del caolín preparado con un contenido de humedad correspondiente a $1.5 \times LL$ (en adelante denominado suelo sin refuerzo), los ensayos realizados fueron: ensayos de límites de Atterberg y de hidrometría para clasificar el suelo.

Por otro lado, con el fin de obtener los parámetros de resistencia al corte no drenado (S_u) se realizaron ensayos de compresión inconfiada y triaxiales consolidados no drenados (CU), adicionalmente, para ejecutar estos dos últimos fue necesario emplear el procedimiento o la teoría de consolidación unidimensional con diferentes esfuerzos de consolidación (30 kPa, 40 kPa y 50 kPa) en la muestra.

- **Selección de material para simular las raíces artificiales**

En esta fase se realizaron pruebas con materiales como el fique para determinar el material artificial adecuado que permitiera simular las raíces, dado que el fique presenta características similares de resistencia a la tracción que fueron encontradas en la literatura, especialmente para el Pasto Vetiver. Sin embargo, el uso de este material se descartó debido a la dificultad presentada para controlar sus características físicas en el laboratorio.

Por lo anterior, se realizaron más pruebas con otros materiales similares a los hallados en la literatura por autores como Eab et al. (2015), quienes emplearon fibras de poliéster y las mezclaron con un suelo cohesivo hasta conseguir una mezcla homogénea. Siguiendo esta referencia se seleccionó la fibra de vidrio debido a que sus propiedades mecánicas y físicas facilitan la manipulación del material en el laboratorio, además, posee una resistencia a la tracción alta y sus costos de adquisición son relativamente bajos en el mercado local. En la Figura N° 20 se puede observar una foto de este material.



Figura N° 20. Fibra de vidrio. Fuente propia

- **Definir los sistemas de raíces a modelar**

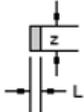
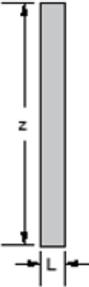
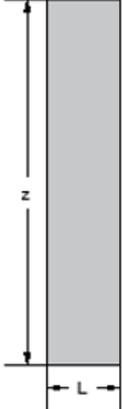
Porcentajes de fibra de vidrio y geometría de los sistemas de reforzamiento:

Para definir los porcentajes de fibra de vidrio se realizó una aproximación en todos los casos, por tanto, se recomienda validar estos valores en futuras investigaciones. Luego, para establecer la geometría de los sistemas radiculares a modelar se empleó la información hallada en la literatura respecto a la vegetación típica de Colombia para la estabilización de taludes.

Una vez definida la geometría de los sistemas de reforzamiento se realizaron pruebas en el laboratorio para ubicarlas en el talud, pero al escalar la distancia de siembra de los pastos se encontró que en los modelos esta era menor de 1 mm, lo cual dificultaba la manipulación y el control del suelo reforzado; por tanto, se decidió simplificarlos al igual que lo hicieron autores como Ng et al. (2016) en sus investigaciones, tal y como se presentó en la Figura N° 11.

Tomando en cuenta todo lo anterior se definieron sistemas simplificados considerando la profundidad de las raíces, además, se definió que los taludes debían reforzarse en toda su extensión. Para ello se crearon estratos de suelo reforzados con fibras de vidrio en la superficie del talud y según la profundidad de los pastos típicos del país, capas que se diferenciaron del suelo sin refuerzo con un colorante. Es importante mencionar que se consideró este tipo de reforzamiento debido a que autores como Suárez (2001) han observado que de esta forma se puede incrementar significativamente la estabilidad de los taludes. Los sistemas de raíces simplificados se presentan en la Tabla 8, el sistema Tipo I tal como se verá mas adelante no posee refuerzo artificial por lo cual se omite en el diagrama.

Tabla 8. Sistemas de raíces simplificados. Fuente propia.

Sistema de reforzamiento: Tipo II Sistema radicular: lateral Pasto típico: San Agustín	Sistema de reforzamiento: Tipo III Sistema radicular: radial Pasto típico: Brachiaria	Sistema de reforzamiento: Tipo IV Sistema radicular: pivotante Pasto típico: Vetiver
		

A continuación, en la Tabla 9 se puede observar un resumen de estas configuraciones o sistemas de reforzamiento y sus dimensiones a escala real.

Tabla 9. Resumen de las geometrías de los sistemas de reforzamiento. Fuente propia.

Sistema de reforzamiento	Sistemas radiculares típicos (Suárez, 2009)	Pastos típicos de Colombia	Geometría simplificada de los sistemas de reforzamiento en prototipo		Porcentaje de fibras de vidrio (%)	Colorante (Tinte Mineral verde) (g)
			Long. L (m)	Prof. z (m)		
Tipo I	-	-	-	-	-	-
Tipo II	Lateral	San Agustín	0.08	0.20	1.11	10
Tipo III	Radial	Brachiaria	0.2	2.0	4.23	20
Tipo IV	Pivotante	Vetiver	0.6	3.0	7.34	30

- Definir la geometría de los taludes

Modelo base o de prueba

Para conocer el comportamiento de los taludes se realizó un modelo base o de prueba, sus características se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Geometría del modelo de prueba a escala real (prototipo), suelo sin refuerzo. Fuente propia

Geometría del modelo de prueba a escala real (prototipo)							
Modelo	Porcentaje de fibras de vidrio como refuerzo artificial (%)				Tipo de suelo	Profundidad de refuerzo (m)	Pendiente del talud (°)
	0	1.11	4.23	7.34			
M1 – Tipo I	x				Limo	0	69

Modelos físicos antes de los ensayos de laboratorio

Se plantearon geometrías para los modelos preliminares a los ensayos de laboratorio, en la Tabla 11 se encuentra el resumen de estas configuraciones.

Tabla 11. Resumen de la geometría de los modelos a escala real -prototipo- (antes de la consolidación). Fuente propia

Geometría de los modelos físicos a escala real (prototipo) antes de la consolidación							
Modelo	Porcentaje de fibras de vidrio como refuerzo artificial (%)				Tipo de suelo	Profundidad de refuerzo (m)	Pendiente del talud (°)
	0	1.11	4.23	7.34			
					Limo	(m)	(°)
M2 – Tipo I	x				x	0	67
M1– Tipo II		x			x	0.2	67
M2 – Tipo II		x			x	0.2	67
M1 – Tipo III			x		x	2.0	67
M2 – Tipo III			x		x	2.0	67
M1 – Tipo IV				x	x	3.0	67
M2 – Tipo IV				x	x	3.0	67

Diagramas de los modelos físicos, preliminares a los ensayos de laboratorio:

Modelo M1 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) antes de la consolidación.

La geometría de prueba de los modelos físicos se presenta en la Figura N° 21, el esquema tiene dichas dimensiones tanto para el prototipo como para el modelo a escala reducida.

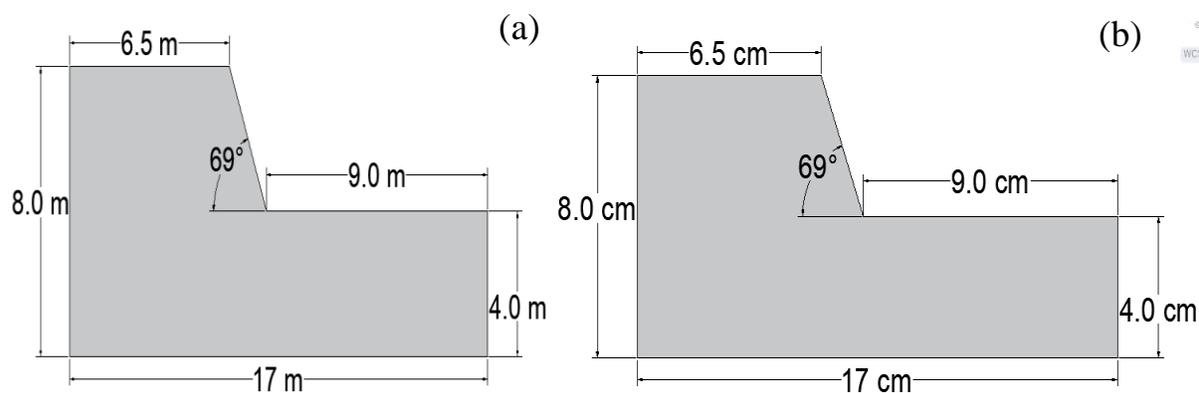


Figura N° 21. Geometría del talud de prueba sin refuerzo en (a) prototipo a escala real y (b) modelo a escala reducida. Fuente propia

Modelo M2 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) antes de la consolidación.

En la Figura N° 22, se presenta la geometría planteada para el modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo), es decir, para el suelo que no posee reforzamiento, configuración planteada antes de la consolidación.

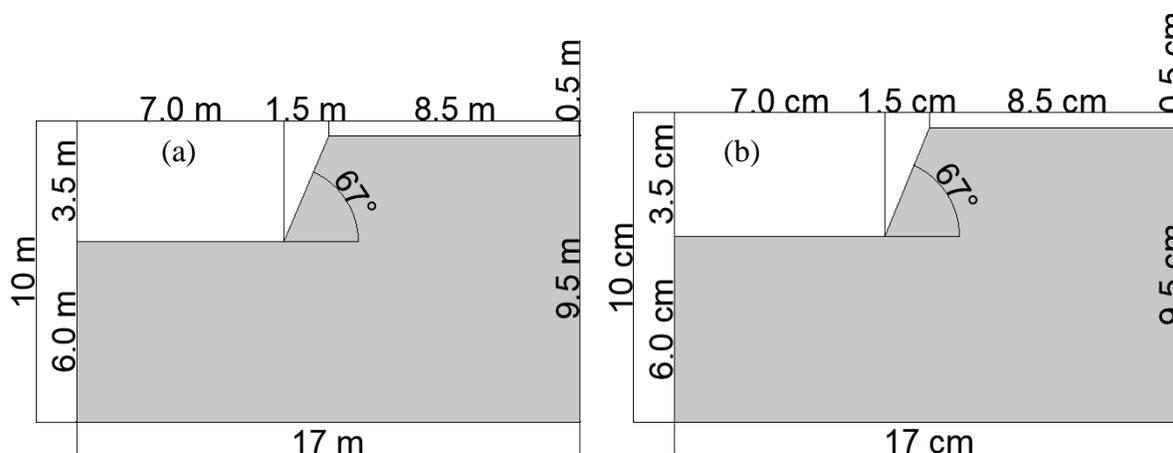


Figura N° 22. Geometría del talud sin refuerzo (a) prototipo a escala real y (b) Modelo a escala reducida – para el modelo M2 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Modelos M1 y M2 – Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m profundidad de refuerzo del prototipo) antes de la consolidación.

En la Figura N° 23 se presentan las dimensiones del talud antes de la consolidación, en la configuración se agregó un estrato de suelo reforzado.

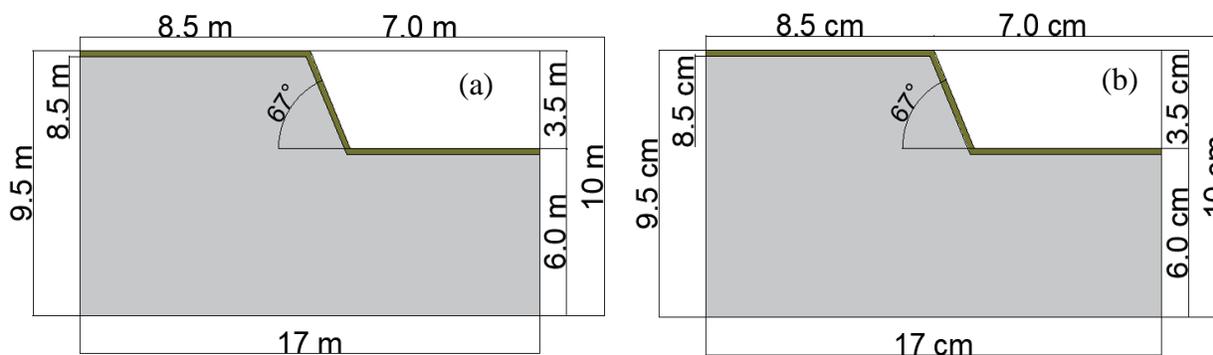


Figura N° 23. Geometría del talud antes de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Modelos M1 y M2 – Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m profundidad de refuerzo del prototipo) antes de la consolidación.

En la Figura N° 24 se presentan las geometrías planteadas para los modelos antes de la consolidación. En este caso se incrementa la profundidad y el porcentaje de fibras de vidrio.

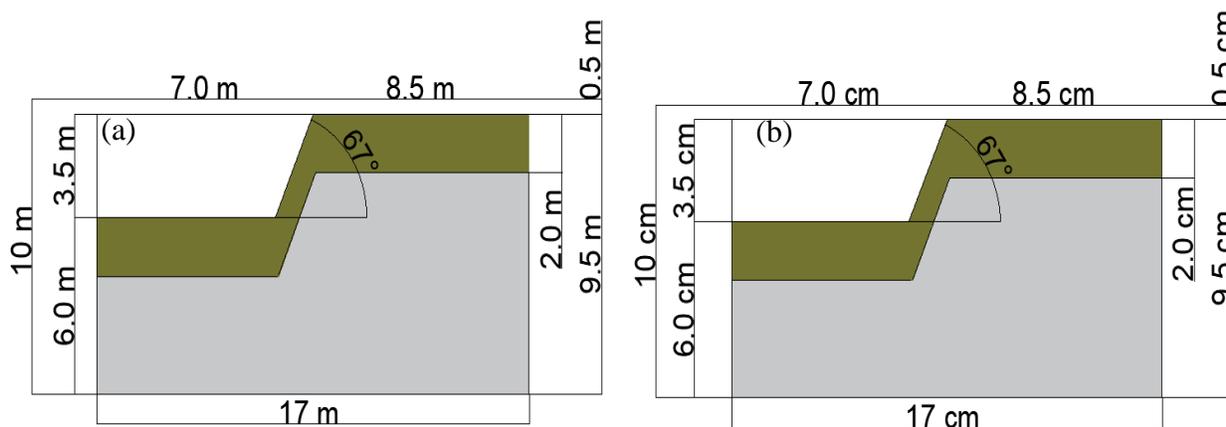


Figura N° 24. Geometría del talud antes de la consolidación: (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Modelos M1 y M2 – Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m profundidad de refuerzo del prototipo) antes de la consolidación.

En la Figura N° 25 se presentan las dimensiones de los modelos antes de la consolidación. Este tipo de modelo es el que mayor profundidad y porcentaje de fibras de vidrio posee en este trabajo.

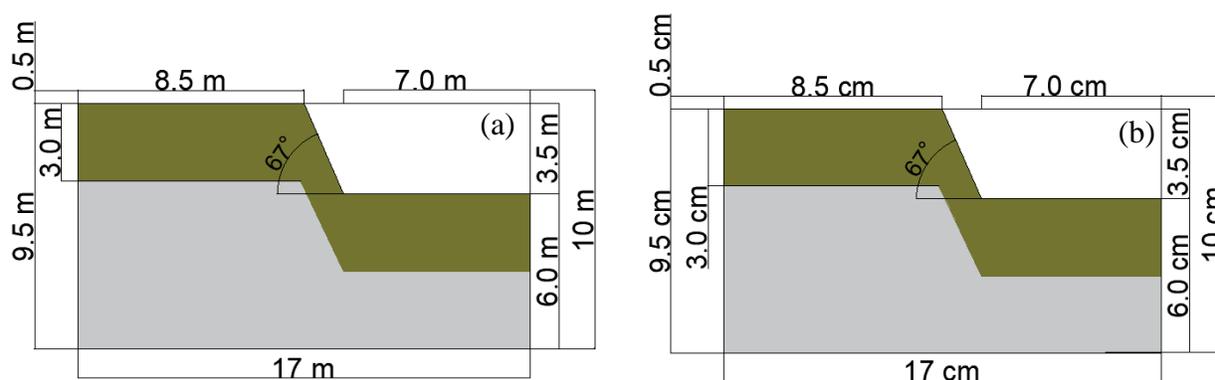


Figura N° 25. Geometría del talud antes de la consolidación: (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para los modelos M1 y M2 – Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

6.2. Técnica de preparación de los modelos físicos

- **Mezcla de los materiales**

Inicialmente se pesó el suelo sin refuerzo y el agua, para luego mezclar ambos materiales en una batidora. Las cantidades empleadas para llenar cada caja correspondieron a 1.5 kg de suelo sin refuerzo y a 1.59 kg de agua, cantidad de material recomendada debida a la consistencia polvorienta que presenta el caolín y que suele generar grandes desperdicios, razón por la que se contempla un porcentaje de material adicional que permite llenar la totalidad de la caja. En la Figura N° 26 se presenta el registro fotográfico de esta etapa.

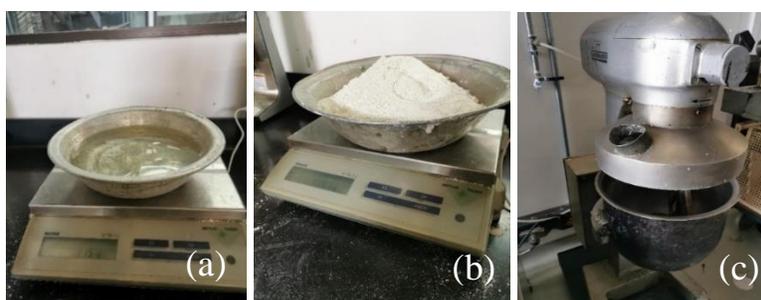


Figura N° 26. Mezcla para proceso de consolidación (a) agua y (b) suelo (c) en una batidora.

Fuente propia.

- **Depositar la mezcla en la caja de la centrífuga geotécnica**

Una vez definidas las cantidades a emplear se agregó una capa de material drenante (arena seleccionada en el laboratorio) y se niveló, posteriormente se colocó papel filtro sobre esta capa para separar el material drenante de la mezcla. Luego, con ayuda de una espátula se distribuyó el material por capas hasta llenar la caja, dejando un espacio de 0.5 cm al final, espacio que ocupó la placa superior. El registro fotográfico de este proceso se muestra en la Figura N° 27.



Figura N° 27. Proceso de consolidación (a) capa de material drenante en la caja nivelada (b) papel filtro, y sobre este, capas del suelo homogéneo sin refuerzo (c) caja llena de material dejando un espacio de 0.5 cm libre al final (d) resultado. Fuente propia.

- **Consolidación del suelo**

Para realizar la preparación de los taludes se aplicó la técnica de consolidación mediante la implementación de la metodología de D. W. Taylor, esta consiste en determinar el tiempo que se requiere para alcanzar el 100 % de la consolidación primaria mediante la gráfica de desplazamiento vertical vs. la raíz del tiempo, para lo cual se debe desarrollar de conformidad con lo dispuesto en la norma INVIAS INV E-154-13.

Como se muestra en la Figura N° 28, para aplicar la técnica de consolidación se debe comenzar con una consolidación manual de 2 kg hasta 4 kg, luego se generan incrementos de cargas/esfuerzos en los consolidómetros automáticos según los datos presentados en la Tabla 12. Al finalizar el esfuerzo vertical debe ser de 30 kPa, 40 kPa o 50 kPa, según corresponda.

Tabla 12. Incrementos de carga y esfuerzos verticales. Fuente propia

Incrementos de carga (kg)	4	8	16	32	52	70	87
Esfuerzos verticales (kPa)	2.31	4.62	9.23	18.47	30	40	50

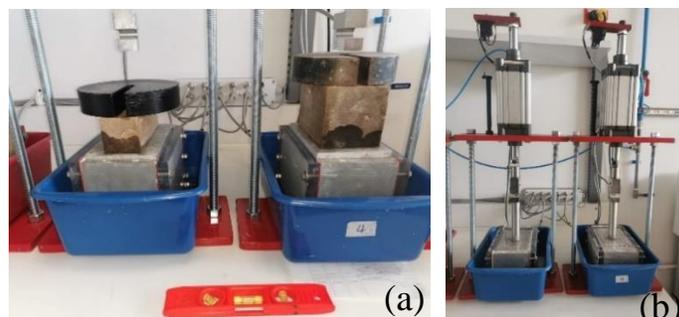


Figura N° 28. Procedimiento de consolidación (a) consolidación manual agregando 2 kg con pesas y luego duplicando este peso (b) al alcanzar 4 kg se ponen las cajas en los consolidómetros automáticos hasta finalizar el ensayo. Fuente propia.

Posteriormente se deben graficar los datos obtenidos en los consolidómetros automáticos para conocer el tiempo requerido entre cada incremento de carga. Teniendo estos datos se pueden graficar las curvas de consolidación para cada incremento de carga como se muestra en la Figura N° 29, donde se presenta una de las gráficas de consolidación obtenidas para un esfuerzo de 30 kPa.

El tiempo de consolidación antes de cada incremento de carga fue validado según las curvas de Taylor, las cuales presentaron un 100 % de consolidación alrededor de un tiempo de 4 horas para el suelo sin refuerzo artificial. Sin embargo, el ejercicio de esta práctica se vio limitado en muchos casos por la disponibilidad del laboratorio y del personal, lo que aumentó el tiempo de cada incremento de carga.

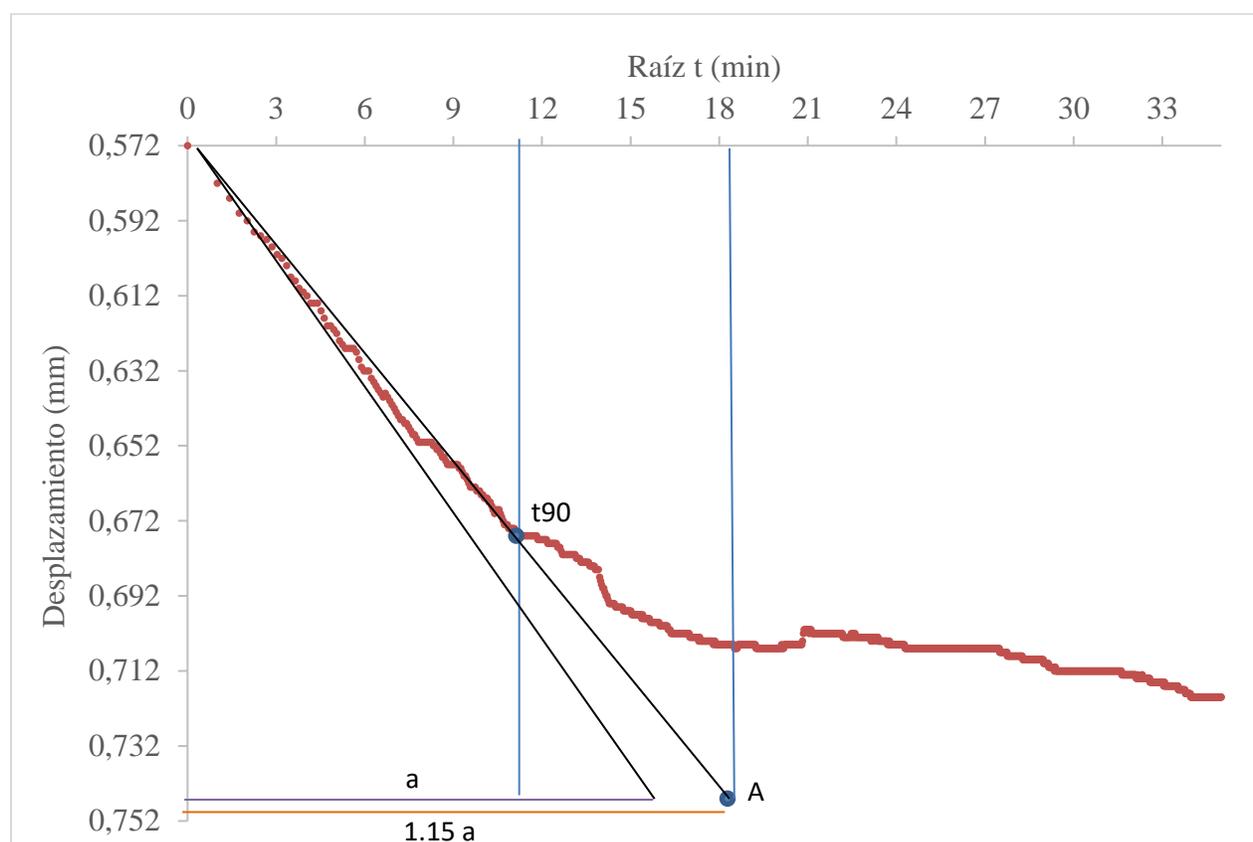


Figura N° 29. Grafica raíz (tiempo) vs Desplazamiento, suelo sin reforzamiento artificial – escala de carga de 52 kg (esfuerzo vertical de 30 kPa). Fuente Propia

- **Manipulación de la caja para marcación del talud**

Posteriormente, se retiró la caja de los consolidómetros automáticos y se quitaron las tapas laterales de esta, proceso que se puede observar en la Figura N° 30. Es importante tener especial cuidado durante la ejecución de este paso, con el fin de que la muestra no se altere ni se mezcle con el material drenante, para ello las tapas deben deslizarse desde la parte superior hacia la parte inferior de la caja en un borde que permita realizar este movimiento.



Figura N° 30. Manipulación de la caja para marcación del talud. Fuente propia

- **Marcación y corte del talud**

Este proceso se debe realizar con las dimensiones del talud previamente definidas ya que es un factor primordial para que en los modelos se conserve la misma geometría. Luego de retirar las tapas laterales de las cajas se debe marcar la geometría sobre el talud y cortarla con un instrumento que permita garantizar este proceso adecuadamente. En la Figura N° 31 se presenta el registro fotográfico de este proceso.

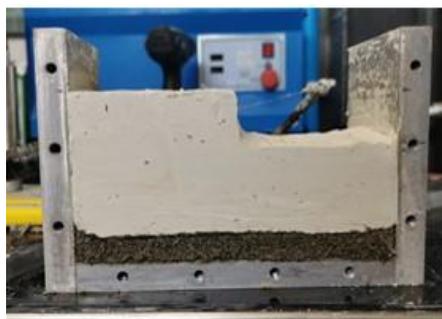


Figura N° 31. Marcación y corte del talud según las dimensiones previamente definidas. Fuente propia

Es importante acotar que en los suelos sin refuerzo no aplica la realización del siguiente procedimiento, de modo que se debe dar continuidad al proceso en el trazado de la malla y la aplicación del grafito.

- **Preparación del suelo reforzado artificialmente con fibra de vidrio**

Las muestras de suelo reforzadas con fibra de vidrio se reconstituyeron mediante la técnica de consolidación y se realizó el ensayo hasta alcanzar un esfuerzo de 30 kPa, mismo método que fue aplicado para los tres sistemas de refuerzos simulados.

En la Tabla 13 se presenta una recopilación de las cantidades que se utilizaron para las mezclas según el sistema de reforzamiento.

Tabla 13. Cantidades para mezcla de suelo reforzado según el sistema de reforzamiento. Fuente propia

Sistema de reforzamiento	Peso de agua (g)	Peso de suelo (g)	Peso de las fibras de vidrio (g)
Tipo I	-	-	-
Tipo II	248	265	4
Tipo III	278	261	18
Tipo IV	384	361	44

La metodología de preparación de suelos reforzados fue replicada a partir del trabajo realizado por los autores Eab et al. (2015). En la Figura N° 32 se presentan los tres elementos de la mezcla de suelo reforzado que se emplearon, estos son: agua, caolín y fibra de vidrio.

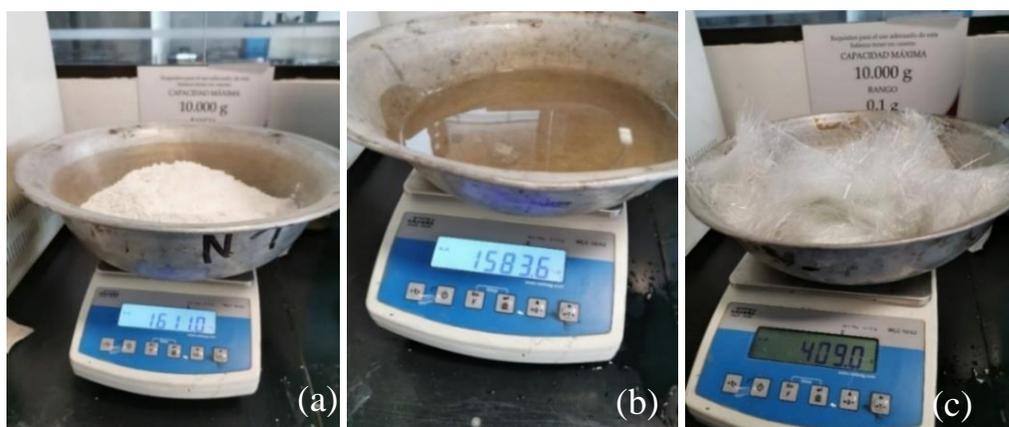


Figura N° 32. Proceso de preparación de muestra para suelo reforzado mezclando (a) caolín (b) agua (c) fibra de vidrio. Fuente propia

Consolidación del suelo reforzado

Sobre el suelo sin refuerzo consolidado y marcado con la geometría del talud se debe poner un estrato de suelo reforzado a la profundidad que corresponda. Posteriormente, para términos de consolidación es necesario colocar papel filtro sobre el estrato y, a su vez, colocar sobre este material drenante (seleccionado en laboratorio) hasta llenar completa y uniformemente la caja,

dejando el espacio requerido de la placa (0.5 cm). En la Figura N° 33 se presenta una fotografía de un talud reforzado.



Figura N° 33. Modelación física de talud con sistema de reforzamiento Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Luego, se debe consolidar nuevamente el talud, siguiendo el mismo procedimiento del suelo sin refuerzo. En este estudio se validó el tiempo de consolidación para hacer el incremento de carga por medio del método de Taylor, del cual se obtuvo una consolidación del 100 % cada 8 horas para el suelo reforzado. No obstante, es importante destacar que dieron algunas limitaciones respecto a la disponibilidad del laboratorio y del personal, lo que aumento el tiempo de cada incremento de carga.

El suelo sin refuerzo fue sometido a dos procesos de consolidación y, aunque la carga es igual en los dos casos, se puede presentar un proceso de consolidación secundario que ocurre al finalizar la consolidación primaria (García, 2018). Es importante mencionar que para los fines de este estudio se descartó el efecto de la consolidación secundaria, razón por la cual podrían generarse incertidumbres en los resultados, por ello se recomienda verificar este proceso en futuras investigaciones.

Trazado de malla sobre una cara del talud

Luego de consolidar el suelo se deben retirar las tapas laterales de la caja y trazar, con colorante (tinte mineral), una malla separada por cada 0.5 cm entre líneas verticales y horizontales en una de las caras del talud. Es importante trazar de manera precisa dicha malla ya que con esta será posible marcar los vectores de desplazamiento y verificar el comportamiento del talud antes y después del vuelo en la centrífuga geotécnica.

- **Vuelos en centrífuga geotécnica y registro fotográfico**

Numero de gravedades N

Para definir la escala adecuada se realizaron ensayos preliminares de prueba en los cuales se determinó que con una escala de $N=100\text{ g}$ fallaba el talud y el modelo era representativo, por lo cual se definió este valor como el factor de escala de esta investigación.

Tiempo de vuelo:

Para determinar el tiempo de vuelo en la centrífuga geotécnica se realizaron varios ensayos hasta alcanzar la falla de los taludes. El tiempo seleccionado fue de 6 minutos en el modelo, lo que equivale a 10 horas del prototipo con la escala antes mencionada; se definió de esta manera debido a que en este término se desarrolló la falla del suelo.

Ejecución de los vuelos en la centrífuga geotécnica:

Al momento de realizar los vuelos en la centrífuga geotécnica se alcanzó la gravedad seleccionada de manera secuencial, inicialmente a $N = 50\text{ g}$ y frecuencia de 27.89 Hz hasta llegar a los 10 segundos, luego se incrementaron las gravedades a $N = 100\text{ g}$ y frecuencia de 39.4 Hz , hasta llegar a los 6 minutos del vuelo.

Una vez se genera la malla de referencia, se debe realizar un registro fotográfico en dos momentos. En un primer momento se hace un registro previo al ensayo en la centrífuga, y luego se lleva a cabo el registro posterior a la realización del ensayo, con el fin de poder comparar las imágenes entre sí (ver Figura N° 34).

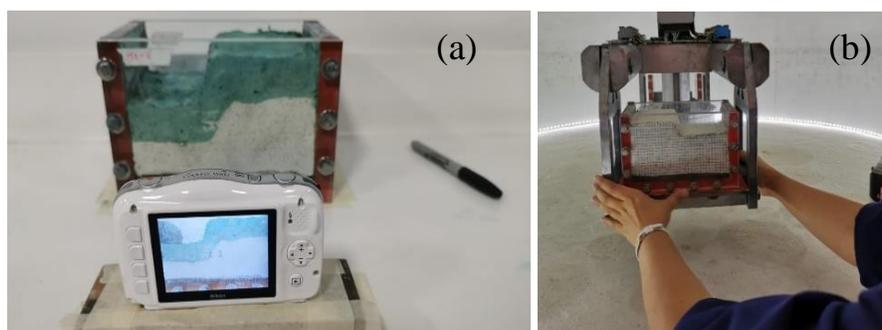


Figura N° 34. (a) Registro fotográfico previo (b) ensayo en la centrífuga geotécnica. Fuente propia.

- **Análisis de resultados físicos**

Análisis del registro fotográfico y definición de superficies de falla y movimientos en el talud.

para este análisis se emplea el software AutoCAD con el fin de marcar la posición inicial (con una línea amarilla) y la posición final del talud (con una línea roja) sobre las imágenes, donde también se demarcan las profundidades de falla, los desplazamientos y los movimientos de la malla tras el vuello. Las superficies de falla fueron definidas con base en la literatura, tal y como se puede ver en la Figura N° 35 donde se presenta un esquema de los mecanismos de falla definidos por el autor Hutchinson (1988).

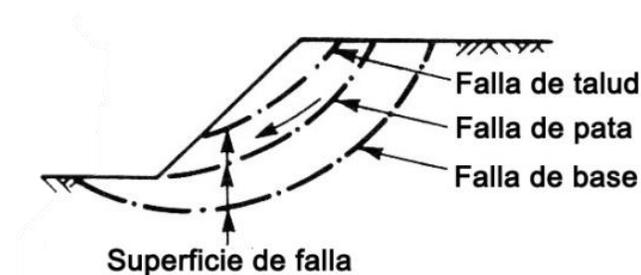


Figura N° 35. Tipos de superficies de falla en taludes. Obtenido de (Hutchinson, 1988)

Fotointerpretación: Análisis de vectores de desplazamiento a escala real (prototipo) usando AutoCAD.

Inicialmente se consideró emplear el software GeoPIV para realizar el análisis de las imágenes y hacer la fotointerpretación de los vectores, sin embargo, no se contemplaron puntos de referencia adecuados en los modelos físicos, lo que imposibilitó el uso de este programa. En su lugar, para realizar el proceso de fotointerpretación se compararon dos imágenes consecutivas, una tomada antes del vuello en la centrífuga geotécnica y otra tomada al finalizarlo, luego se trazaron de forma manual los vectores de desplazamiento mediante el programa AutoCAD, como se mencionó previamente, para lo cual se empleó como referencia la malla trazada sobre el talud.

Es importante mencionar que este procedimiento se pudo realizar debido a que se ejecutó un estudio fotográfico con la ubicación de la cámara exacta, pero se recomienda que en futuras investigaciones se utilicen puntos de referencia que coincidan con los requerimientos de los programas de análisis de imágenes, para así facilitar la interpretación y el análisis de los resultados.

6.3. Modelación numérica en Slide:

Para realizar las modelaciones numéricas y cuantificar el efecto mecánico se utilizó el software de análisis de estabilidad Slide en su versión 5.0, creado por la empresa Rocscience. El método de análisis de equilibrio límite utilizado fue el de Bishop Simplificado y el tipo análisis fue no drenado (Su), es decir, $\tau = c$ y $\phi = 0$. Además, no se consideró ninguna influencia de agua superficial, y los parámetros de entrada de materiales se definieron según los resultados de caracterización obtenidos en el laboratorio.

Geometría a escala real (prototipo), preliminar al laboratorio (antes de consolidar).

A continuación, se presenta un resumen de las geometrías y las propiedades del suelo para los modelos numéricos que se definieron antes de la realización de los ensayos en el laboratorio, mediante el método de análisis Bishop simplificado en condición no drenada (ver Tabla 14) que fue ejecutado en el software Slide.

Tabla 14. Resumen de los modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) antes de la consolidación. Fuente propia

Modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) antes de la consolidación						
Modelo	Su (kPa)		Peso unitario (kN/m²)		Profundidad de refuerzo	Pendiente del talud
	Suelo Sin refuerzo	Suelo con refuerzo	Suelo Sin refuerzo	Suelo con refuerzo	(m)	(°)
M2 – Tipo I	10.58	-	14	-	0	67
M1 – Tipo II	10.58	12.47	14	16	0.2	67
M2 – Tipo II	10.58	12.47	14	16	0.2	67
M1 – Tipo III	10.58	13.81	14	14.1	2.0	67
M2– Tipo III	10.58	13.81	14	14.1	2.0	67
M1 – Tipo IV	10.58	15.31	14	15.2	3.0	67
M2 – Tipo IV	10.58	15.31	14	15.2	3.0	67

Diagramas de los modelos numéricos antes de considerar las modificaciones por consolidación:

- **Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar).**

En la Figura N° 36 se presentan los resultados del modelo numérico ejecutado en el software Slide. El Factor de Seguridad (FS) obtenido corresponde a 1.048 en la condición crítica. La superficie de falla para este modelo es de pie de talud de acuerdo con la información reunida sobre los tipos de fallas que aportó Suárez (1998). Sin embargo, al presentarse un manto blando se concentran los esfuerzos sobre este ocasionando otras fallas progresivas hasta la base del talud, en este caso el talud es inestable debido a que su $FS < 1.1$ (Gaivilanes, 2019).

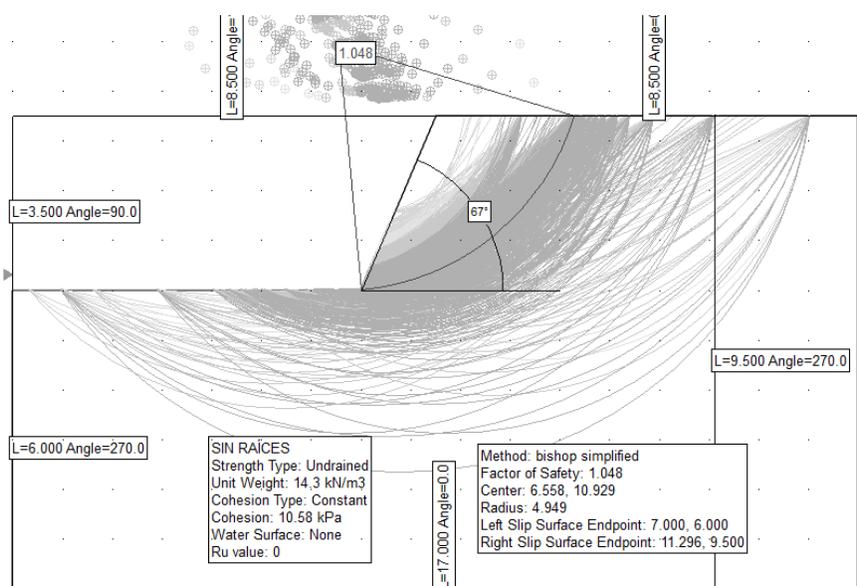


Figura N° 36. Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar). Fuente propia

- **Modelo M1 y M2- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar).**

Los resultados del modelo preliminar ejecutado en el software Slide, correspondiente al suelo reforzado artificialmente con 1.11% de fibras de vidrio con la profundidad respectiva, se presentan en la Figura N° 37. El Factor de Seguridad (FS) obtenido en este modelo fue de 1.065 en la condición crítica.

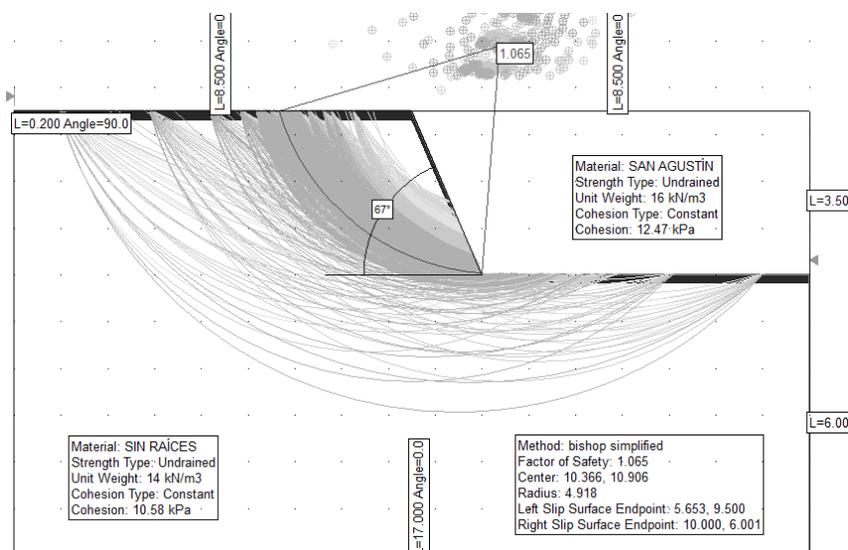


Figura N° 37. Modelo M1 y M2- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.2 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar).

Fuente propia

Este resultado se comparó con el suelo sin refuerzo, lo cual permitió observar un incremento en el factor de seguridad, aunque la contribución a la estabilidad fue baja por lo que el talud siguió presentando inestabilidad con un Factor de Seguridad (FS) < 1.1 (Gaivilanes, 2019). Según la longitud y las condiciones de la superficie de falla esta se clasifica como una falla tipo pie de talud (Suárez, 1998).

- **Modelo M1 y M2- Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar).**

En este caso se encontró un Factor de Seguridad (FS) de 1.242 en la condición crítica, es decir que $FS > 1.1$, por lo tanto el talud es estable (Gaivilanes, 2019). En este análisis se determinó, además, una superficie de desplazamiento mínima global de pie del talud que alcanzó una profundidad de 3.5 m. También se observó el efecto del sistema de reforzamiento sobre la estabilidad expresado en un incremento del 18.5 % del factor de seguridad respecto al modelo sin refuerzo, no obstante, este valor es preliminar y puede variar al momento de hacer la consolidación, dado que la geometría es modificada por las presiones verticales de este ensayo.

En la Figura N° 38 se muestran los resultados preliminares obtenidos antes del ensayo en el laboratorio.

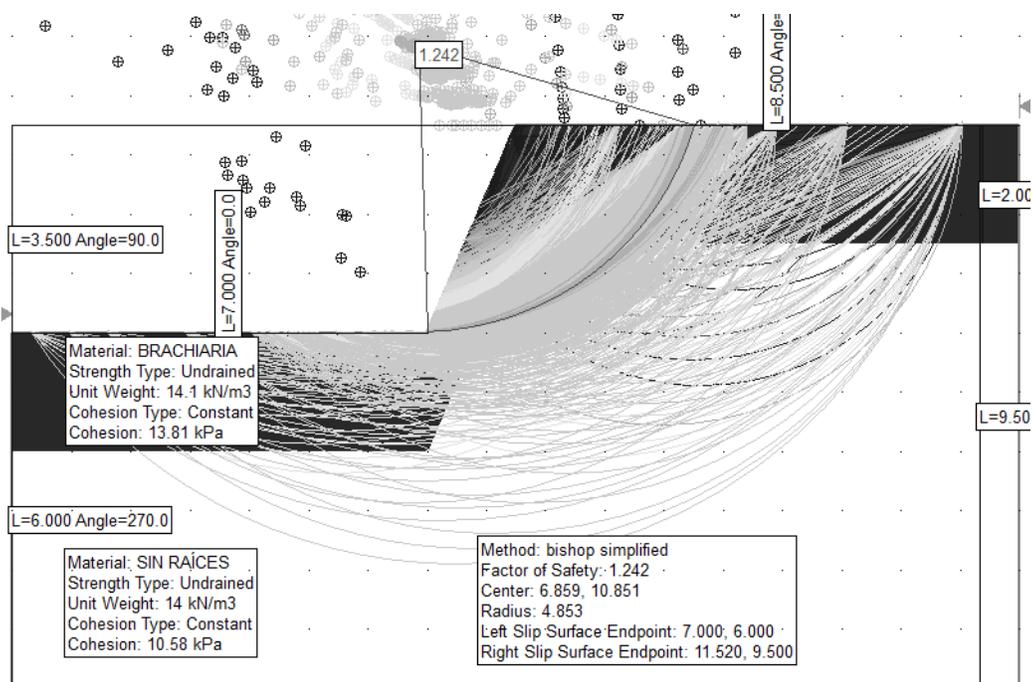


Figura N° 38. Modelo M1 y M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 2.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar.

Fuente propia

- **Modelo M1 y M2- Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 3.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar).**

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura N° 39, en los cuales se observa un Factor de Seguridad (FS) de 1.396 en la condición crítica, por tanto, se tiene que el incremento (33.2 %) fue significativo en comparación con los modelos numéricos anteriores. Además, en la figura se puede ver un comportamiento similar al presentado por los autores Gentile et al. (2010) y Chok et al. (2004) respecto a la superficie de desplazamiento mínima global de suelos reforzados, los cuales alcanzan mayores profundidades de falla que aquellas que ocurren en suelos sin refuerzo.

De esta etapa se puede concluir que el refuerzo artificial con diferentes porcentajes de fibra de vidrio y profundidades aporta a la estabilidad de los taludes de manera proporcional al número de fibras que se mezclen con el suelo, las cuales pueden alcanzar diferentes profundidades; sin embargo, es necesario comprobar en el laboratorio este incremento en el FS y la geometría final de los modelos tras la consolidación.

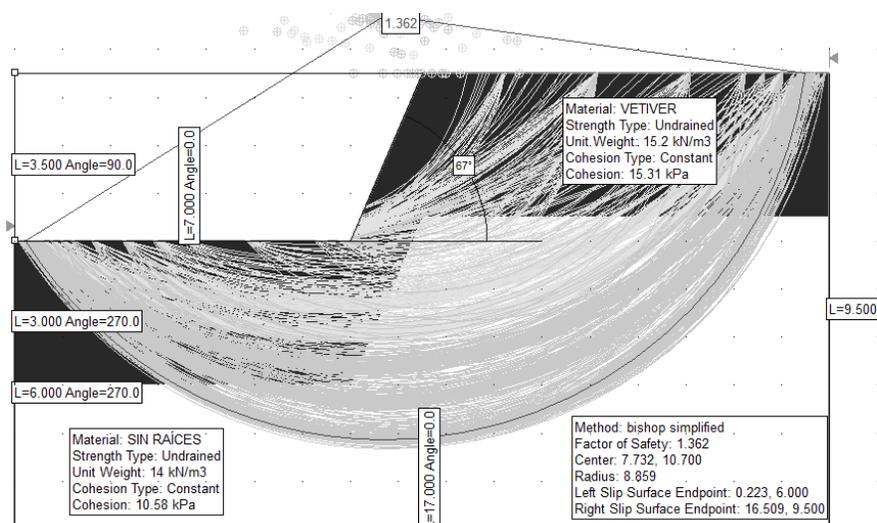


Figura N° 39. Modelo M1 y M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría a escala real, preliminar al laboratorio (antes de consolidar). Fuente propia

7. Resultados y análisis de resultados

7.1. Resultados de laboratorio: caracterización del suelo sin raíces

En esta etapa se determinaron las propiedades del suelo a emplear en la centrífuga geotécnica. Para ello, se realizaron los ensayos que se exponen a continuación, los cuales fueron realizados según lo dispuesto en la normativa colombiana.

- **Límites de Atterberg (INV – E 125 y 126 -13) y ensayo de gravedad específica (INV- E 127 -13):** Se realizaron tres ensayos de límites de Atterberg con el propósito de promediar los valores obtenidos y así definir un valor preciso de este, resultados que se muestran en la Tabla 15 expuesta a continuación.

Tabla 15. Resultados obtenidos del ensayo de Límites de Atterberg- Suelo sin raíces. Fuente propia.

Ensayo	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Límite líquido	71.04%	74.93%	74.04%	73.34%
Límite plástico	46.9%	46.9%	42.60%	45.48%
Límite de contracción	28.43%	36.41%	35.00%	33.28%
Índice de plasticidad	24.1%	28.00%	31.40%	27.90%

Posteriormente, se realizó el ensayo de gravedad específica del material para generar la curva granulométrica por hidrometría. A partir de este ensayo se concluyó que el suelo analizado corresponde a un *limo de alta plasticidad* con gravedad específica de 2.61, clasificación del material que se determinó mediante la carta de plasticidad representada en la Figura N° 40 (cuadro azul).

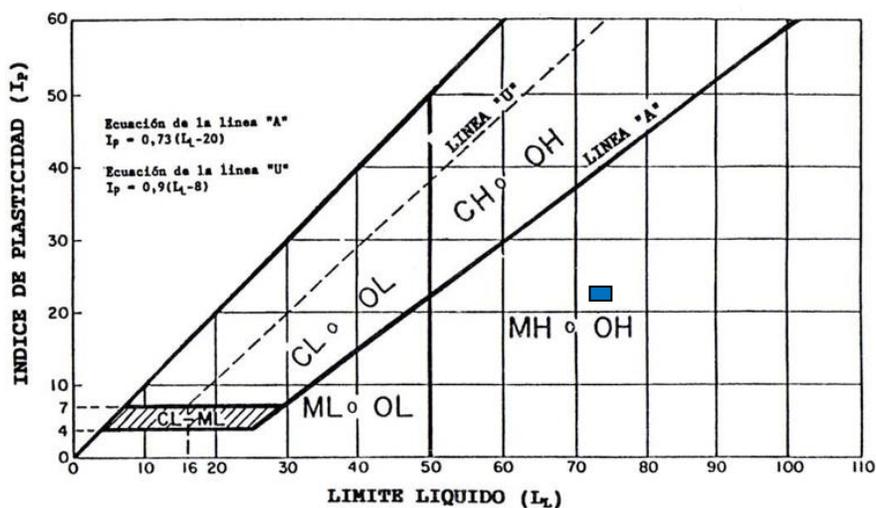


Figura N° 40. Clasificación del suelo - Carta de plasticidad de Casagrande. Obtenido de (Chacón et al., 2004)

- **Ensayo de hidrometría (INV – E 121 -13):** En la Figura N° 41 se presenta el registro fotográfico del ensayo de hidrometría en la muestra sin reforzamiento artificial. Y en la Figura N° 42 se puede observar la curva granulométrica donde, dado que no se alcanza a percibir un diámetro efectivo (D_{10}), se extrapolan los datos y se obtiene un valor de 6×10^{-4} que indica que la muestra es un *tipo de suelo fino*.

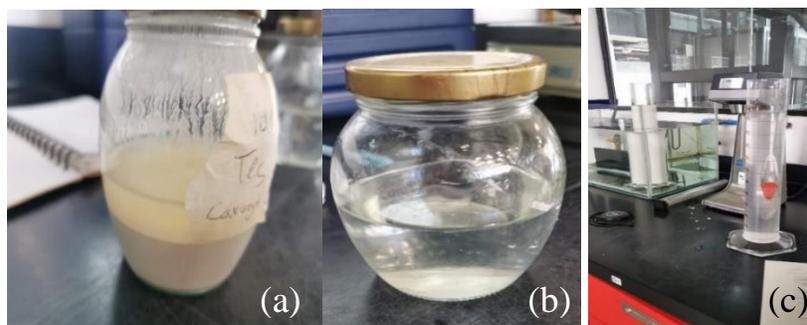


Figura N° 41. Ensayo de hidrometría (a) muestra de suelo (b) agente dispersante (c) ejecución del ensayo – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente Propia

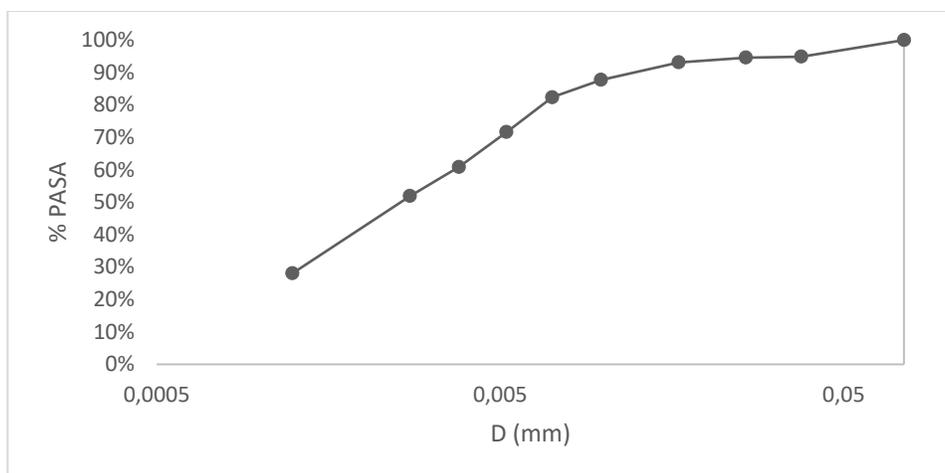


Figura N° 42. Curva de gradación por hidrómetro – Granulometría del suelo – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente Propia

- **Ensayo de compresión inconfínada (INV – E 152 – 13):** para estimar el aporte en resistencia al corte y en la estabilidad de los taludes reforzados con vegetación artificial se debe determinar, en primer lugar, la resistencia al corte no drenado en el suelo sin refuerzo, por esa razón los ensayos de compresión simple se realizan después de llevar a cabo el ensayo anterior.

Primero se deben extraer las muestras, las cuales se obtienen mediante el recorte del material. Este corte se hace con la ayuda de un cilindro metálico hueco que debe ser previamente aceitado en las paredes internas y afilado en uno de sus extremos, para que al aplicar presión sobre el cilindro este se introduzca fácilmente en la muestra reconstituida y realice el corte. Posteriormente, se debe tomar la probeta cilíndrica y ponerla en un tallador para alcanzar el diámetro requerido según las disposiciones de la normativa, con el fin de obtener una muestra de suelo con una relación altura-diámetro de 2 a 2.5. En la Figura N° 43 se presenta el montaje del ensayo ejecutado.

Asimismo, en la Figura N° 44 se grafican los resultados de esfuerzo vs. deformación de los ensayos de compresión inconfínada. Estos resultados representan el comportamiento del suelo que estuvo sometido a un incremento continuo de cargas, los cuales corroboraron que la deformación aumenta a medida que se incrementa el esfuerzo, lo que inicialmente ocurre de forma lineal hasta que finalmente alcanza un valor máximo o pico que corresponde a la resistencia a la compresión inconfínada (q_u).



Figura N° 43. Montaje del ensayo de compresión inconfínada – suelo sin reforzamiento artificial. Fuente propia

Visto lo anterior y con base en los resultados obtenidos de q_u , conforme a la información que presenta la literatura citada en este trabajo, se determinó que el suelo tiene una consistencia blanda. Adicionalmente, se calculó la resistencia al corte no drenado dividiendo el valor de la resistencia a la compresión inconfínada entre dos, valor que es posible calcular debido a que se supone que el esfuerzo principal menor y el ángulo de fricción interna es igual a cero.

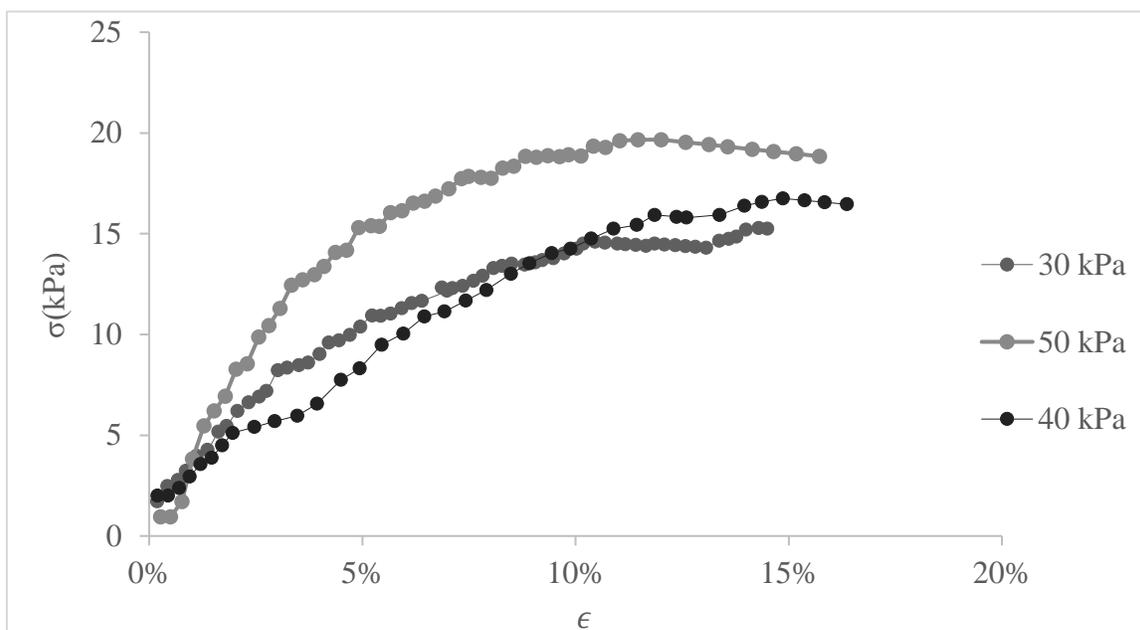


Figura N° 44. Esfuerzo Vs. Deformación – suelo sin reforzamiento artificial. Ensayo de compresión inconfínada. Fuente propia

En la Tabla 16 se pueden observar los resultados de resistencia al corte no drenado (S_u) y la resistencia a la compresión inconfiada (q_u) que se obtuvieron con cada esfuerzo de confinamiento (σ_c). Basado en los datos que se exponen en esta tabla se puede observar un incremento de la resistencia que es proporcional al esfuerzo aplicado.

Tabla 16. Resultados de las pruebas de compresión inconfiada - suelo sin reforzamiento artificial. Fuente propia

σ_c (kPa)	30	40	50
Υ (gr/cm ³)	1.40	1.54	1.57
Resistencia a la compresión inconfiada q_u (kPa)	15.29	16.75	19.67
Resistencia al corte no drenado S_u (kPa)	7.64	8.38	9.83

- **Ensayos triaxiales consolidados no drenados CU (INV- E 153):** para estimar el aporte en resistencia al corte y a la estabilidad de los taludes reforzados con vegetación artificial se determinó la resistencia al corte no drenado en el suelo saturado, mediante los ensayos triaxiales CU que se realizaron en esta investigación.

El proceso de obtención de la muestra es igual al proceso descrito para el ensayo de compresión inconfiada. En la Figura N° 45 se muestra el registro fotográfico del proceso de montaje para el ensayo triaxial CU en el suelo sin reforzamiento.

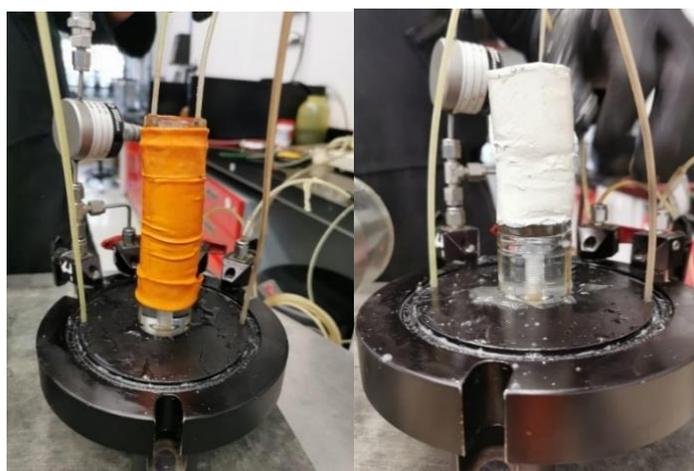


Figura N° 45. Registro fotográfico del ensayo triaxial consolidado no drenado CU – suelo sin reforzamiento artificial (a) antes y (b) después de ser fallada. Fuente propia

Los resultados obtenidos de los ensayos triaxiales consolidados no drenados CU para los diferentes esfuerzos y los valores de peso unitario del suelo se muestran en la Tabla 17, donde se evidencia un incremento en la resistencia al corte no drenado que es proporcional al esfuerzo aplicado.

Tabla 17. Resultados de las pruebas de triaxial CU. Fuente propia

σ_c (kPa)	30	40	50
γ (gr/cm ³)	1.4	1.50	1.54
S_u (kPa)	10.58	19.69	24.50

En la Figura N° 46 se muestra la gráfica de los resultados del esfuerzo vs. la deformación de los ensayos realizados, en los cuales, se generan mayores resistencias al corte no drenado según el esfuerzo de confinamiento (Cuenca, 2013).

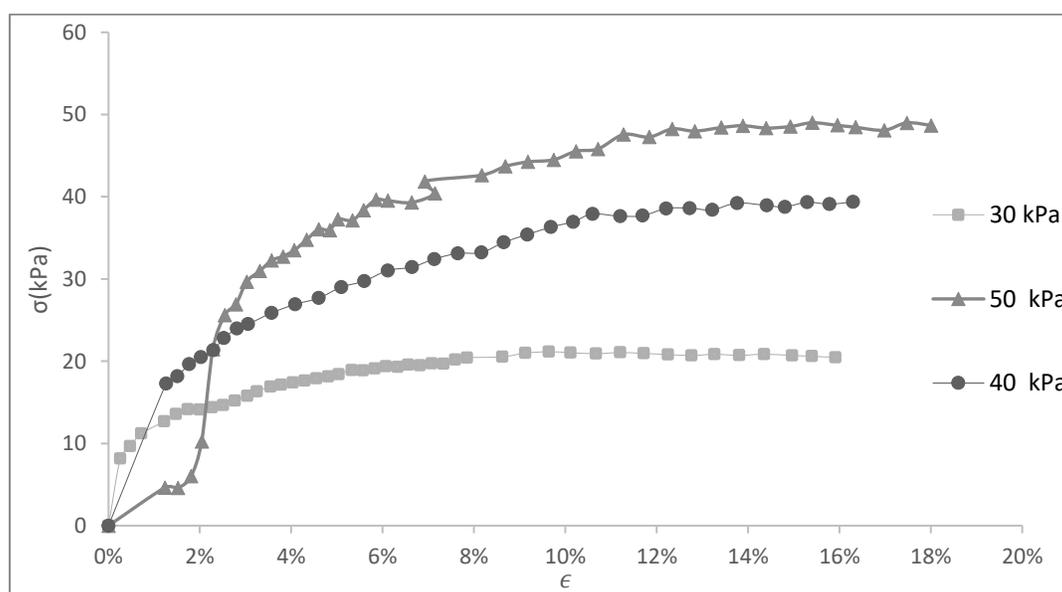


Figura N° 46. Esfuerzo Vs. Deformación – Muestras sin raíces. Ensayo triaxial. Fuente propia

Luego se compararon los resultados obtenidos en los ensayos de compresión inconfiada y los ensayos triaxiales CU, (ver Tabla 18). Los datos expuestos en esta tabla muestran que la resistencia al corte no drenado obtenido de los triaxiales CU es mayor que los resultados derivados del ensayo de compresión simple, lo cual se debió al hecho de que en los triaxiales se tiene una presión de confinamiento que aumenta la resistencia al corte (Cuenca, 2013).

Tabla 18. Comparación de resultados obtenidos en ensayos de compresión inconfiada y triaxiales. Fuente propia

σ_c (kPa)	30	40	50
Ensayo de compresión inconfiada S_u (kPa)	7.64	8.38	9.83
Ensayo triaxial S_u (kPa)	10.58	19.69	24.50

Basado en los resultados expuestos se elaboró la Figura N° 47 donde se puede observar el comportamiento de los suelos de cada ensayo realizado y según los distintos esfuerzos de consolidación. En esta presentación gráfica de los resultados derivados del análisis también se puede observar una tendencia prácticamente lineal en cada ensayo y un incremento en los resultados del ensayo triaxial debido a la presión de confinamiento, como se muestra en los resultados del estudio de Cuenca (2013).

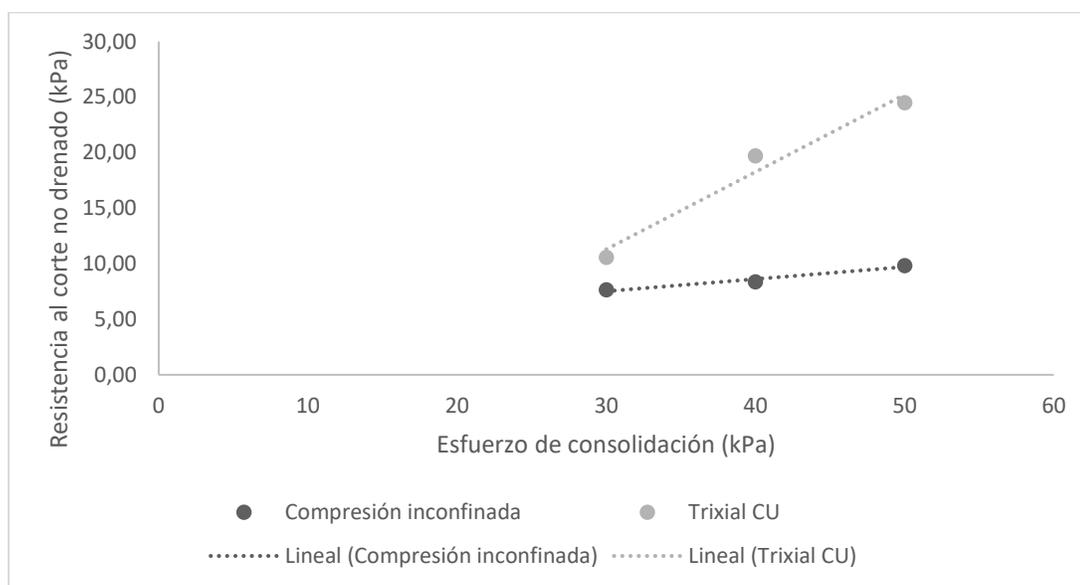


Figura N° 47. Grafica Resistencia al corte no drenado S_u vs. Esfuerzo de consolidación σ_c (kPa) para ensayo de compresión simple y triaxial CU. Fuente propia

7.2. Resultados de laboratorio: caracterización de suelos con raíces

- **Ensayos triaxiales en suelos reforzados:** una vez realizada la mezcla se procedió a llevar a cabo el ensayo triaxial CU que requirió la extracción de muestras cilíndricas, para lo cual fue necesario recortar el material con tijeras debido a que de la forma convencional, esto es, con el cilindro metálico hueco, no fue posible dado que el filo del cilindro no fue suficiente para

romper uniformemente las fibras de vidrio. En la Figura N° 48 se muestra el registro fotográfico de este procedimiento.

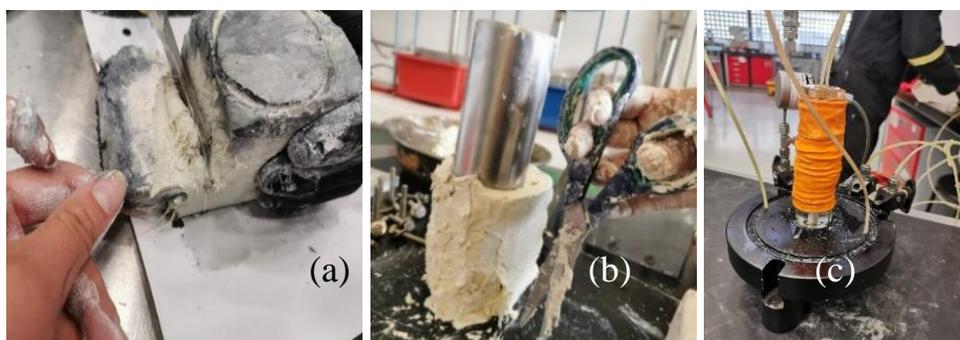


Figura N° 48. Ensayo triaxial en suelos reforzados artificialmente con fibra de vidrio: a) Marcación del cilindro (b) tallado de la muestra (c) Montaje para ensayo triaxial. Fuente propia

Grafica ensayo triaxial suelos reforzados:

En la Figura N° 49 se presenta la gráfica de esfuerzo (σ) vs. deformación (ϵ) de los suelos analizados, la cual da cuenta de una mayor resistencia en el suelo reforzado con el sistema de raíces Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio), seguida en proporción del Tipo III (4.23% fibras de vidrio), el Tipo II (1.11% fibras de vidrio) y por último el suelo sin refuerzo Tipo I (0% fibras de vidrio) que es el que posee menor resistencia.

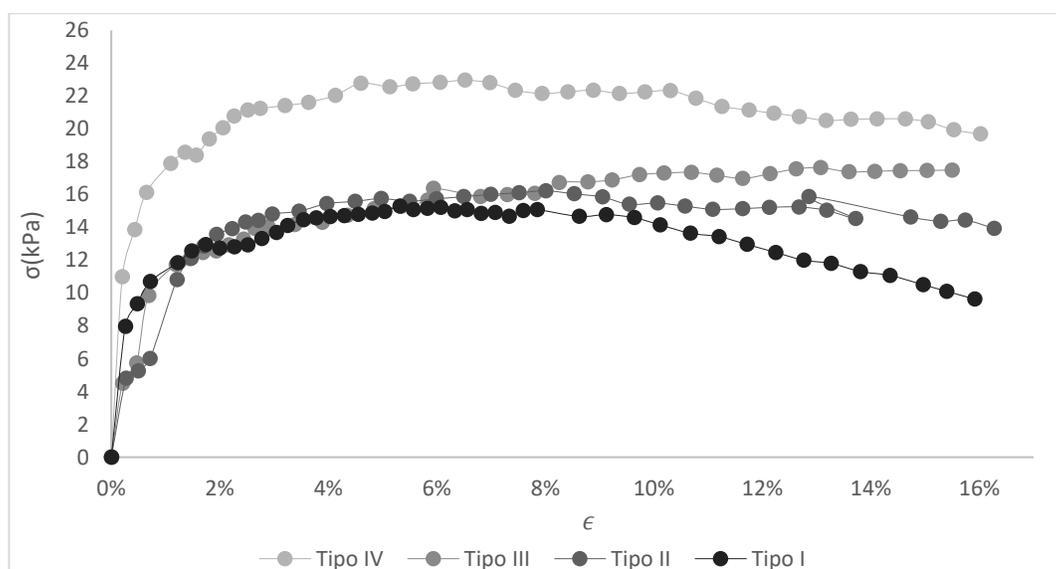


Figura N° 49. Grafica de esfuerzo vs. deformación del ensayo triaxial para suelos reforzados.

Fuente propia.

Por su parte, los autores Teerawattanasuk et al. (2014), Herrera (2015) y Gentile et al. (2010) realizaron en sus respectivas investigaciones varios ensayos de laboratorio para comprobar si, en efecto, se producía un incremento en la resistencia al corte del suelo cuando este era reforzado con vegetación natural. Los resultados de esta investigación son similares a los obtenidos en el presente estudio, pues la resistencia al corte incrementó al reforzar los suelos, al igual que ocurrió con la vegetación artificial simulada. Así lo demuestran los datos del ensayo triaxial presentados en la Tabla 19, donde se puede comparar el sistema de reforzamiento con el aumento en la resistencia al corte no drenado.

Tabla 19. Resistencia al corte del suelo no drenado (S_u) según el sistema de reforzamiento, para ensayos triaxiales. Fuente propia.

Sistema de reforzamiento	S_u (kPa)	ΔS_u (%)
Tipo I	10.58	-
Tipo II	12.47	17.86
Tipo III	13.81	30.53
Tipo IV	15.31	44.71

En la tabla se observa que como resultado de los ensayos se produjo un incremento en la resistencia al corte no drenado en los suelos reforzados, siendo el sistema de raíces Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio) el que mayor aporte generó. El refuerzo con vegetación incrementa la resistencia del suelo debido a que los suelos reforzados se comportan como un material compuesto, tal y como lo explicaron Gray y Leiser (1982) en su investigación.

De igual manera, en su estudio León (2001) mencionó que los modelos teóricos del suelo son sometidos a esfuerzos constantes y presentan el siguiente comportamiento: las fuerzas de tensión que se desarrollan en las raíces son resueltas en una componente tangencial que resisten directamente la cizalladura, y una componente normal o perpendicular que incrementa la concentración del esfuerzo en el plano de la falla, lo que determina que la unión entre el suelo y las raíces genera aportes significativos en la resistencia a la tracción. En términos generales esta conclusión coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación, pues también se generaron incrementos en la resistencia al corte tras incluir en la matriz de suelo fibras de vidrio embebidas en las profundidades ya mencionadas.

De otra parte, Herrera (2015) demostró este comportamiento mediante los parámetros que obtuvo en algunas pruebas de modelación física con vegetación natural, en las cuales encontró que la cohesión sin refuerzo inicial que tenía de 10.5 kPa incrementó a 34.3, kPa, es decir, un 226.6 %; y que, por otro lado, el ángulo de fricción del suelo sin refuerzo que era de 29° ascendió a 51°, lo que significa que incrementó en un 75.86 % en Arenas Limosas (SM) reforzado con Pasto Vetiver.

Por otro lado, Teerawattanasuk et al. (2014) realizaron ensayos de tracción en laboratorio y ensayos de corte directo en campo para Pastos Vetiver y Brachiaria de cinco meses de crecimiento en suelos arcillosos (CL), con pastos de diferentes edades, descartando la influencia del ángulo de fricción en el comportamiento mecánico del suelo reforzado. Como resultado de los ensayos se obtuvieron los siguientes valores para la resistencia al corte no drenado (S_u): para el suelo sin refuerzo el valor de S_u fue de 9.58 kPa, para el suelo reforzado con Pasto Vetiver el valor de S_u fue de 17.60 kPa, y para el suelo reforzado con Pasto Brachiaria el valor de S_u fue de 11.14 kPa. Estos resultados evidencian que las raíces aportan al incremento de la resistencia al corte en los suelos reforzados, en comparación con el suelo sin refuerzo, debido al efecto que estas tienen sobre las propiedades mecánicas del suelo, tal y como lo demuestra la modelación física con raíces artificiales realizada en este trabajo de investigación.

En la Figura N° 50 se presentan gráficamente los datos obtenidos para la resistencia al corte no drenado (S_u) y los distintos porcentajes de fibras de vidrio.

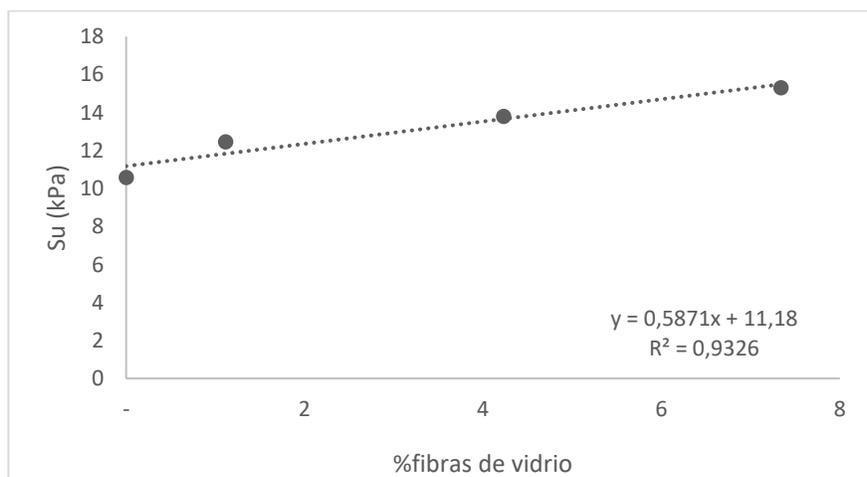


Figura N° 50. Resistencia al corte no drenado Vs. Porcentaje de fibras de vidrio. Fuente propia.

La Figura N° 51 muestra las variaciones que se dieron en el incremento de la resistencia al corte (ΔS_u) para cada tipo de reforzamiento. En esta figura se evidencia un aporte importante a la resistencia del talud cuando se incluyó en la mezcla de suelo los diferentes porcentajes de fibras de vidrio.

Asimismo, Gentile et al. (2010) estudiaron el incremento de la resistencia al corte partiendo del término *cohesión aparente*, producida con la presencia de raíces que se emplean como refuerzo. Estos autores reportaron, como uno de los resultados más relevantes de su investigación, la producción de un incremento de casi 6.8 kPa en la resistencia al corte de los suelos que fueron reforzados con vegetación natural. De igual manera, en la modelación física con raíces artificiales que se realizó en este estudio también se encontró un incremento de S_u de 4.73 kPa al reforzarse el suelo con un sistema de Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio).

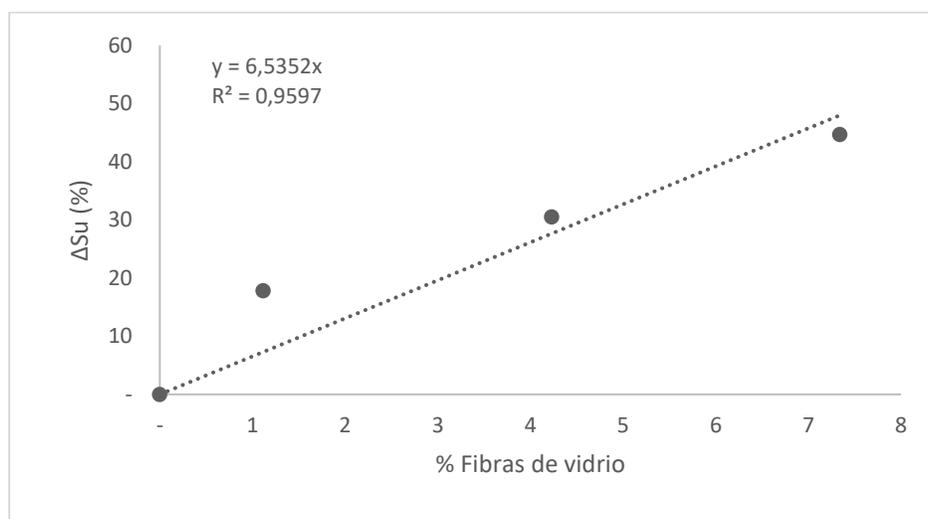


Figura N° 51. Variación de la resistencia al corte no drenado ΔS_u Vs. El porcentaje de fibras de vidrio de cada tipo de reforzamiento. Fuente propia.

7.3.Resultados de modelación física

- **Modelo M1 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo)**

Análisis del registro fotográfico

Se presenta una superficie de falla que alcanza una profundidad de 6.97 m para el modelo a escala real (prototipo) y se produce, tal y como lo definió Terzaghi, un desplazamiento rápido en

el que el centro de gravedad de la masa en movimiento se desplaza hacia abajo (hundimiento) y hacia afuera del talud (levantamiento). Este comportamiento se clasifica como *desplazamiento rotacional individual de base* (Hutchinson, 1988).

El registro fotográfico del Modelo M1-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) se presenta en la Figura N° 52 donde se observa una serie de movimientos en el talud, mecanismos y formas que, según lo señalado en el trabajo de Corominas y De Caminos (2004), son característicos de los suelos cohesivos homogéneos. Este modelo fue muy significativo en el proceso constructivo del talud, pero es necesario replantear su geometría para que no se generen incertidumbres en los resultados obtenidos, como se verá más adelante.

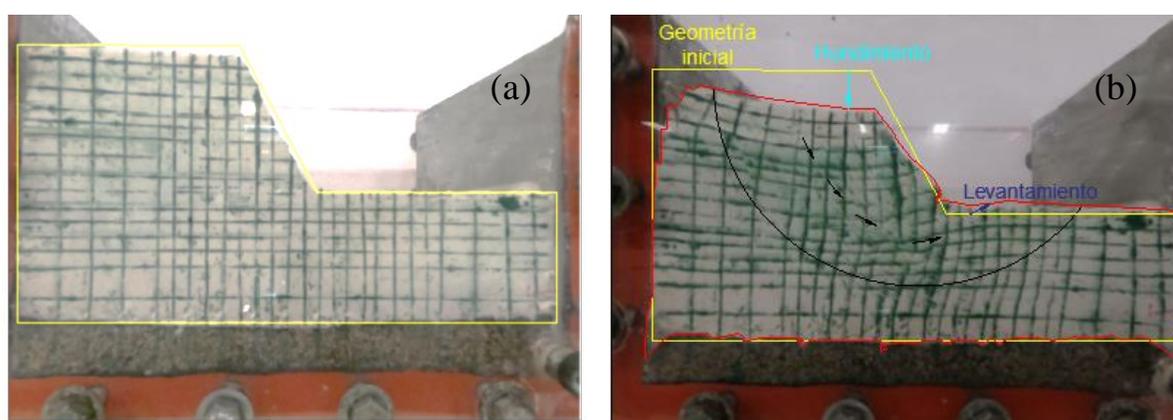


Figura N° 52. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

Replanteo de la geometría de los modelos físico (geometría definitiva):

Tal y como se mencionó en el apartado metodológico, el modelo base M1-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad prototipo) se realizó como prueba inicial. En este modelo se observaron movimientos muy cercanos a los límites de frontera del talud, lo que impidió analizar el comportamiento y el desarrollo de la superficie de falla, razón por la cual se replanteó la geometría de los modelos físicos.

Para evitar incertidumbres, los análisis de las imágenes y los vectores de desplazamiento de la modelación física se realizaron con las dimensiones obtenidas después de la consolidación, es decir, la geometría resumida en la Tabla 20.

Tabla 20. Resumen de la geometría de los modelos a escala real -prototipo- (después de consolidar). Fuente propia

Geometría de los modelos físicos a escala real (prototipo) después de la consolidación

Modelo	Porcentaje de fibras de vidrio como refuerzo artificial (%)				Tipo de suelo	Profundidad de refuerzo (m)	Pendiente del talud (°)
	0	1.11	4.23	7.34			
					Limo	m	°
M2 – Tipo I	x				x	0	64
M1 – Tipo II		x			x	0.13	57
M2 – Tipo II		x			x	0.15	59
M1 – Tipo III			x		x	1.89	54
M2 – Tipo III			x		x	1.98	56
M1 – Tipo IV				x	x	2.95	69
M2 – Tipo IV				x	x	2.96	66

- **Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

La geometría definitiva del talud correspondiente se presenta en la Figura N° 53, tanto para el prototipo como para el modelo.

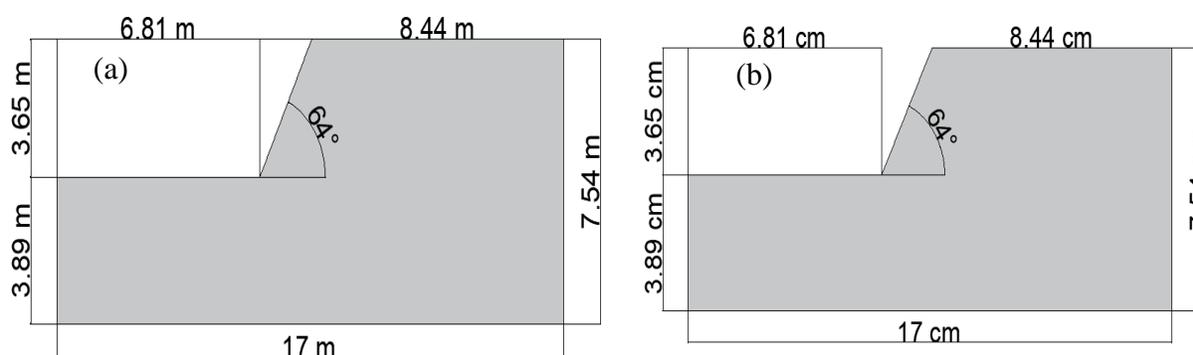


Figura N° 53. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 – Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo).

Análisis del registro fotográfico

En el análisis de las imágenes presentadas en la Figura N° 54 se puede observar un deslizamiento rotacional múltiple que da lugar a la deformación y la presencia de grietas en la corona del talud, un tipo de falla que también puede alcanzar superficies relativamente profundas de manera progresiva (Hutchinson, 1988). En este caso se desarrollaron progresivamente los tres tipos de falla individuales presentados en la Figura N° 35, las cuales alcanzaron las siguientes profundidades a escala real (prototipo): falla de talud 3.69 m, falla de pata 4.16 m y falla de base 5.1 m.

En el modelo M2-Tipo II (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) el talud presentó grandes deformaciones, entre ellas un hundimiento asociado a la etapa inicial del deslizamiento que alcanzó una profundidad de 1.0 m respecto a la condición inicial del modelo a escala real. Este comportamiento es común en los suelos homogéneos en los que principalmente se genera un hundimiento en la zona adyacente a la corona y se produce un ligero levantamiento en la pata del talud.

Finalmente, se considera que el talud es muy inestable debido los múltiples movimientos que desarrolla y que ocasionan que la nueva masa desplazada esté en contacto con parte de la masa desplazada previamente, lo que genera cada vez movimientos más profundos que progresivamente acaban ocasionando un hundimiento en la estructura (Olarte, 2017).

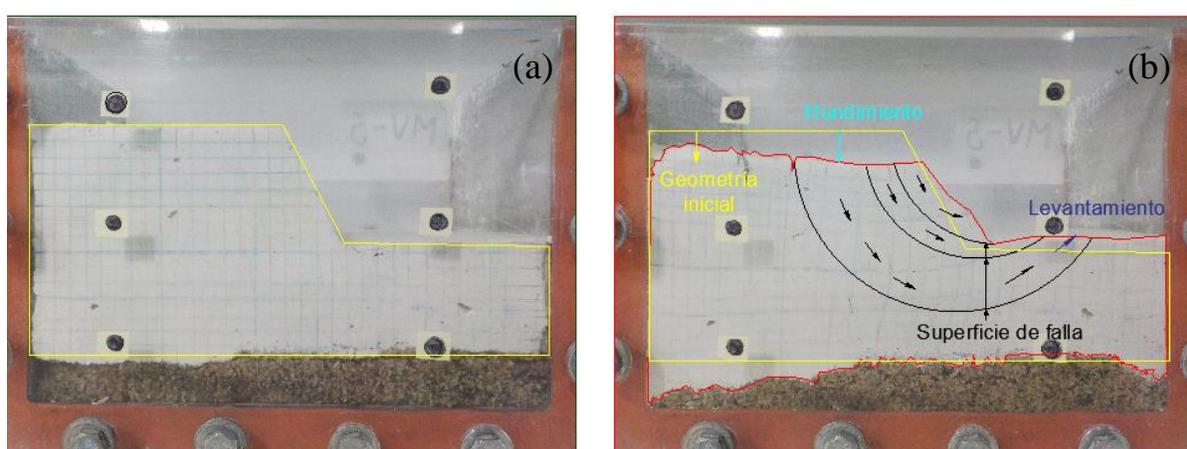


Figura N° 54. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). Obtenido de (Proyecto de convocatoria interna, 2019).

- **Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

En la Figura N° 55 se presentan las dimensiones definitivas, tanto para el prototipo como para la escala reducida a N=100 g, en la cual se presenta el estrato de suelo reforzado con fibra de vidrio.

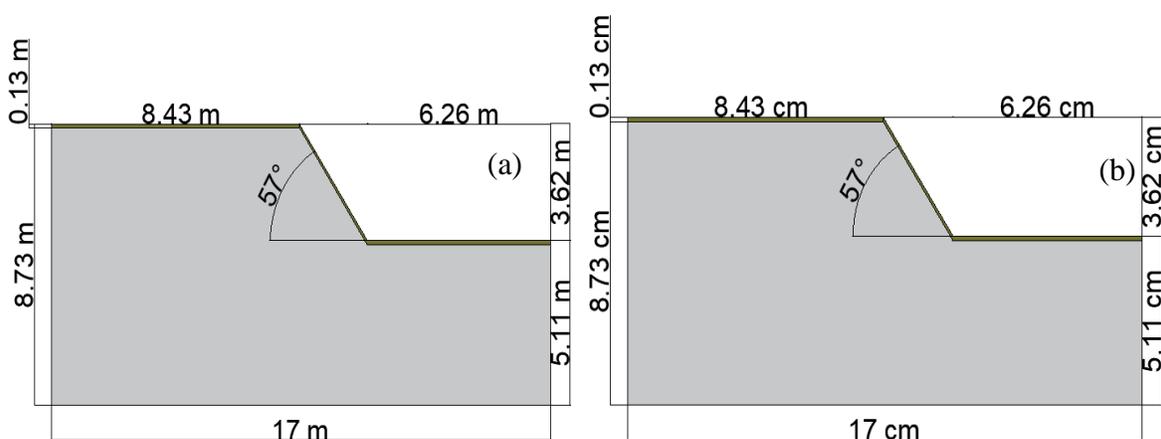


Figura N° 55. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Análisis del registro fotográfico

El registro fotográfico se presenta en la Figura N° 56, donde se observan tres superficies de fallas similares a las ocurridas en el Modelo M2-Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo). En este caso se presentan la falla de talud, de pata y de base (Hutchinson, 1988) con profundidades de 3.59 m, 4.58 m y 5.73 m respectivamente en el modelo a escala real (prototipo).

En este modelo se produce un hundimiento de 0.70 m respecto a la condición inicial del modelo a escala real (prototipo). Según lo explicado por Olarte (2017) lo anterior ocurre en la corona y genera un levantamiento en la pata del talud. Sin embargo, la presencia de refuerzo artificial disminuye el efecto de inestabilidad, esto se puede corroborar al comparar la geometría inicial y final del talud, allí se observan cambios en la geometría pero mayor inmovilidad que si se compara con los movimientos generados en el modelo sin refuerzo.

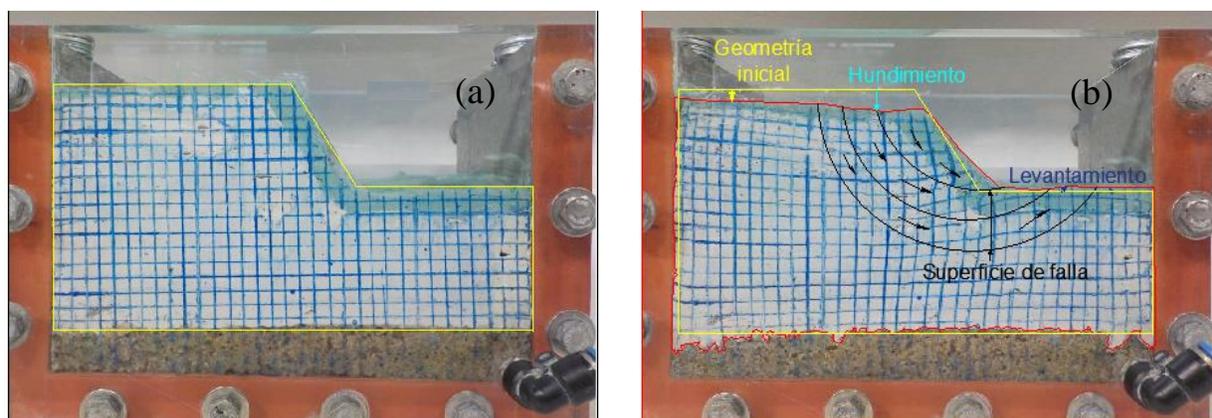


Figura N° 56. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

Un resultado favorable en el modelo M1-Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m profundidad de refuerzo del prototipo) es que el agrietamiento en la corona del talud ya no se visualiza, lo que de acuerdo con Chok et al. (2004) ocurre porque la superficie de falla crítica se desarrolla debajo de la capa del suelo reforzado, lo que significa que esta alcanza una profundidad mayor a la ocurrida en la falla del suelo sin refuerzo y los movimientos que se generan también son más profundos.

Otro resultado positivo obtenido en esta fase es que dadas las condiciones anteriores se hace evidente que el suelo de este modelo es más estable y conserva en mayor medida su geometría después del vuelo en la centrífuga geotécnica, en comparación con el Modelo M2-Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo) que tuvo mayores movimientos y deformaciones.

- **Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

En la Figura N° 57 se presentan las dimensiones definitivas, tanto para el prototipo como para la escala reducida a $N=100$ g. En este caso se incluye, como en el caso anterior, el estrato de suelo reforzado con fibras de vidrio en los porcentajes y profundidades mencionados.

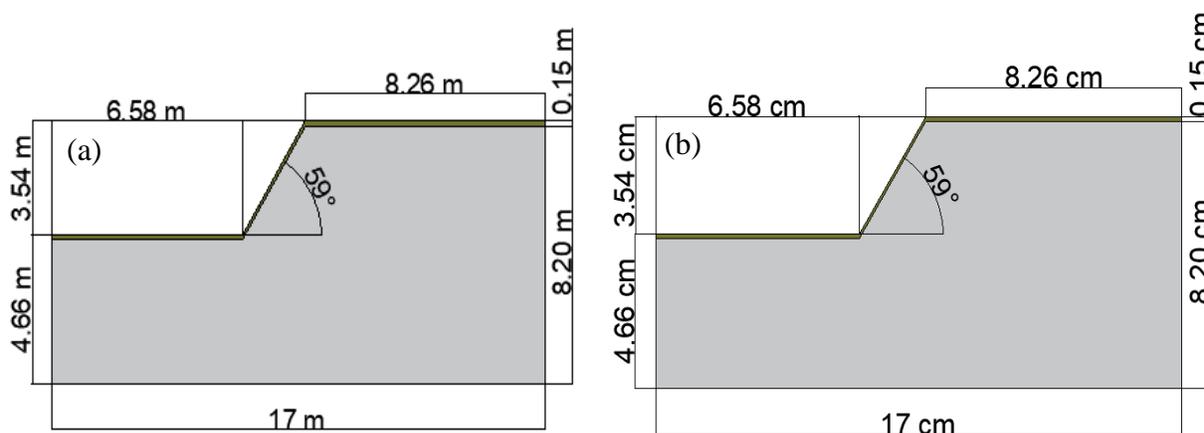


Figura N° 57. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Análisis del registro fotográfico

Las fotos tomadas en este modelo se muestran en la Figura N° 58 donde se observa que ocurre un deslizamiento rotacional múltiple, el cual contiene tres fallas:

i) una falla de talud con una profundidad de 2.32 m, ii) una falla de pie que alcanza una profundidad de 4.13 m, y iii) una falla de base que es la más profunda y alcanza los 5.82 m de profundidad en el modelo a escala real (prototipo), estos movimientos se caracterizaron según los conceptos recopilados por Hutchinson (1988).

Es posible que el comportamiento de las superficies de falla de este modelo, las cuales alcanzan una profundidad mayor que la evidenciada en el Modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m profundidad de refuerzo del prototipo), se deba al reforzamiento, como se comprobó en el estudio realizado por los autores Gentile et al. (2010), quienes señalaron que al agregar un sistema de reforzamiento se producen superficies de falla más profundas que cuando no lo hay.

En este caso se evidenció inicialmente una falla que comenzó a presentarse de manera superficial, pero avanzó hasta alcanzar una profundidad mayor, es decir, la falla que presentaba el modelo es una falla progresiva que no suele ocurrir repentinamente, sino que se produce a partir de deformaciones aisladas que generan una disminución en la resistencia y una serie de afectaciones mínimas en principio que progresan con el tiempo hasta alcanzar mayores longitudes, Suárez (1998).

De modo que, aunque la estabilidad del modelo incrementó, se siguen presentando movimientos que modifican considerablemente la configuración del talud, uno de los cuales es el hundimiento que ocurre en la corona de la estructura y se desplaza verticalmente 0.75 m del modelo inicial a escala real, generando un ligero levantamiento en la pata del talud (Olarte, 2017). Este movimiento se debe principalmente a la profundidad mínima del refuerzo, la cual no controla la totalidad de los movimientos por lo cual es evidente la inestabilidad del talud.

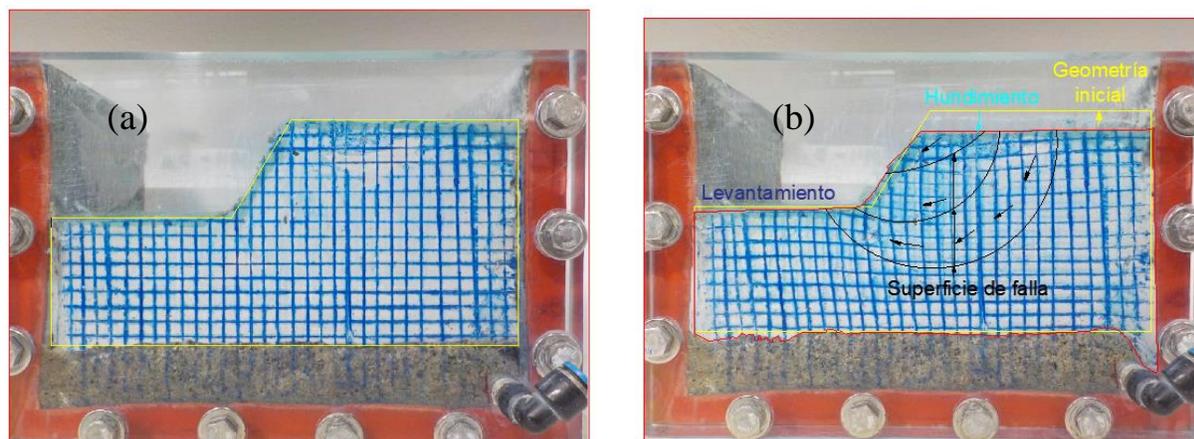


Figura N° 58. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

- **Modelo M1 – Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

Al comparar la geometría planteada antes de la consolidación (ver Figura N° 24) y la obtenida después de hacer la consolidación (ver Figura N° 59) se observa que no ocurrieron mayores cambios en este proceso. Este resultado se produce principalmente porque al agregar un sistema de reforzamiento que posee un alto porcentaje de fibras de vidrio y una profundidad de refuerzo de esta magnitud el efecto de consolidación no tiende a afectar el talud, lo cual significa que entre menor sea el estrato del suelo reforzado el talud tiene mayor probabilidad de sufrir una deformación.

En el diagrama se puede observar la geometría para el prototipo en escala real y para el modelo en escala reducida, el cual fue escalado a $N = 100$ g.

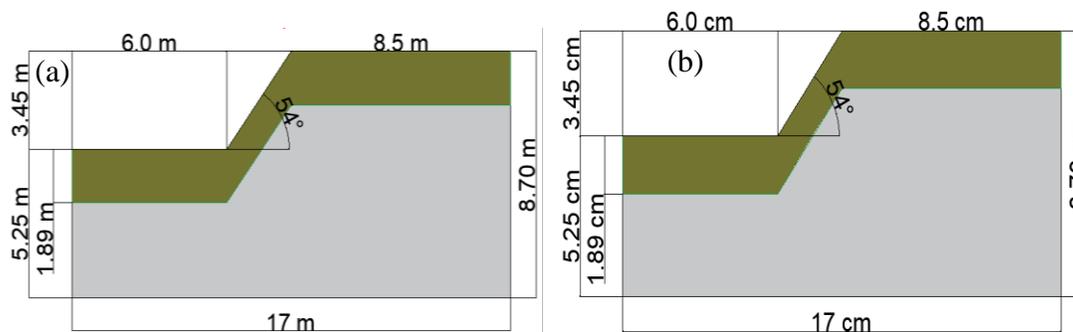


Figura N° 59. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Análisis del registro fotográfico

En la Figura N° 60 se presenta el talud antes y después de realizar el vuelo en la centrífuga geotécnica. Si bien en este modelo se producen movimientos la superficie de falla no está visualmente definida como en los casos anteriores, lo que ocurre, según Suárez (1998), porque para producirse una superficie de falla deben presentarse movimientos significativos o la presencia de materiales muy débiles, contrario a lo que ocurre con este modelo que tuvo desplazamientos mínimos y, por tanto, pocas deformaciones. Este modelo presenta un hundimiento de 0.32 m con respecto a la condición inicial, a escala real, el cual se genera inicialmente en la corona del talud (Olarte, 2017), pero en este caso no se generó un levantamiento significativo del material en el pie del talud, principalmente porque el suelo reforzado aporta estabilidad y control sobre las deformaciones.

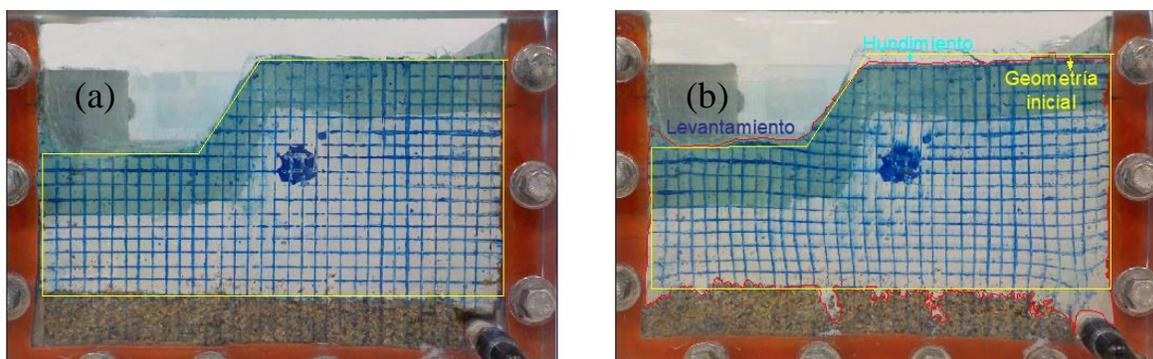


Figura N° 60. Comparación de los modelos en la centrífuga geotécnica (a) antes y (b) después del ensayo, Modelo M1 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

- **Modelo M2 – Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

Las dimensiones definitivas de este talud tomadas después de la consolidación, tanto para el prototipo como para la escala reducida a $N = 100$ g se presentan en la Figura N° 61.

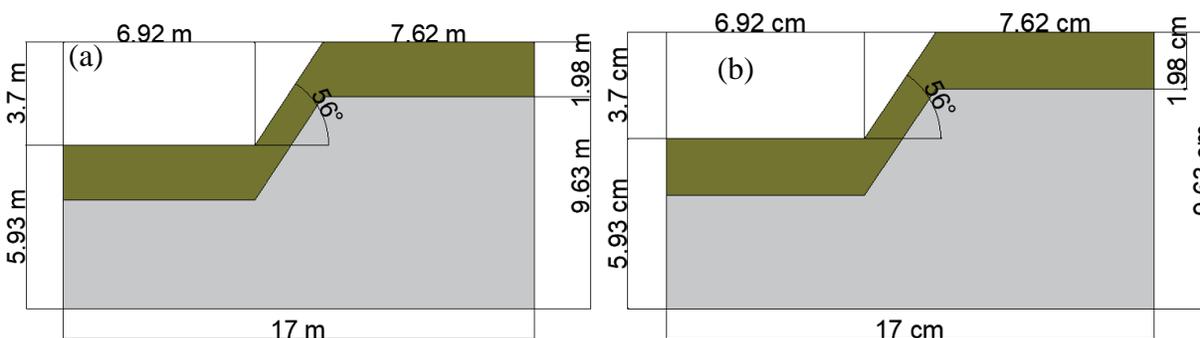


Figura N° 61. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M2 - Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Al comparar esta geometría con la planteada antes de realizar la consolidación (ver Tabla 11) se observa que la profundidad del refuerzo no tuvo mayores modificaciones, lo que indica que el sistema de reforzamiento genera un aporte significativo que estabiliza el talud y evita grandes deformaciones verticales.

Análisis del registro fotográfico

En la Figura N° 62 se presenta el talud antes y después de realizar el vuelo en la centrífuga geotécnica. Se hace evidente el aporte que genera el refuerzo en la estabilización del talud, caso en el cual tampoco se presenta una superficie de falla visualmente definida, pero sí movimientos profundos debajo del suelo reforzado (Gentile et al., 2010), estos movimientos alcanzan incluso 4.78 m de profundidad.

En este modelo se presentó un hundimiento mínimo en la corona del talud, con respecto al suelo sin refuerzo, este alcanzó una profundidad de 0.30 m a escala real (prototipo), por lo que se deduce que en las condiciones de este modelo sí ocurren desplazamientos de material, pero estos no son lo suficientemente grandes para generar superficies de falla definidas (Suárez, 1998).

Es así como se observa en las imágenes tomadas donde al pie del talud se puede ver que no se desarrolla el levantamiento presentado en los casos donde se experimentó con un suelo que tenía pocos o nulos porcentajes de reforzamiento. De acuerdo con Chok et al. (2004) este tipo de estabilidad es posible debido a que el refuerzo se encuentra en toda la superficie del talud, incluso garantiza que otros taludes en condición de riesgo incrementen su estabilidad, lo que da como resultado la producción de taludes seguros.

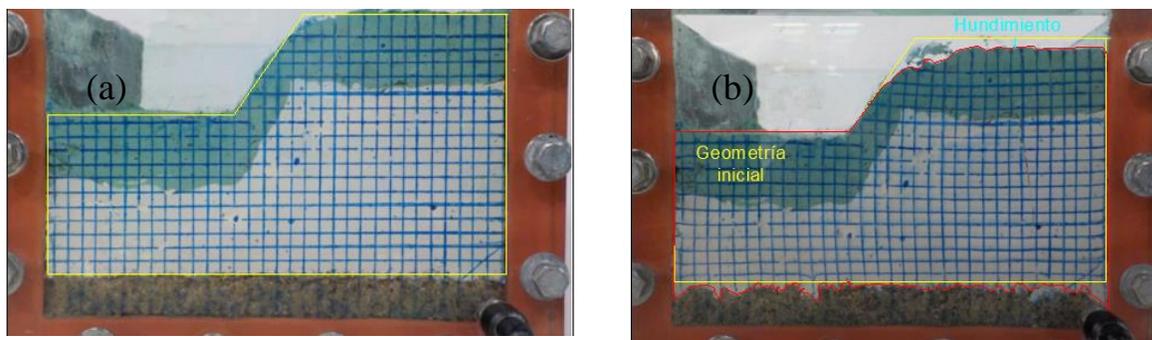


Figura N° 62. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el modelo M2- Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo).

Fuente propia.

- **Modelo M1 – Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

En la Figura N° 63 se presentan las dimensiones definitivas tanto para el prototipo como para la escala reducida N = 100 g después de la consolidación.

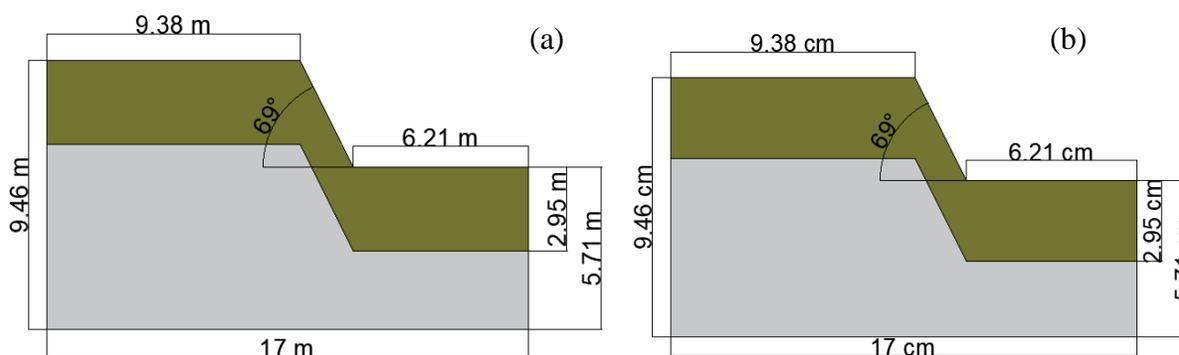


Figura N° 63. Geometría final del talud, después de la consolidación (a) en prototipo y (b) modelo a escala reducida, para el modelo M1 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Análisis del registro fotográfico

El registro fotográfico expuesto en la Figura N° 64 muestra el estado del talud que presenta este modelo antes y después de realizar el vuelo en la centrífuga geotécnica, con un refuerzo físico que alcanza una profundidad de 2.95 m a escala real (prototipo).

Es evidente que el modelo físico a escala real (prototipo) se estabiliza y que los movimientos que se presentan no generan una superficie de falla definida, lo que indica que el talud es muy estable (Suárez, 1998), sin embargo, ocurren movimientos de la magnitud de 7.26 m de profundidad y hundimiento del talud en la corona del talud de 0.19 m respecto a la condición inicial.

La estabilidad que presenta el modelo seguramente se debe al sistema de reforzamiento, el cual se encuentra distribuido en toda la superficie del talud representado como un estrato de suelo reforzado.

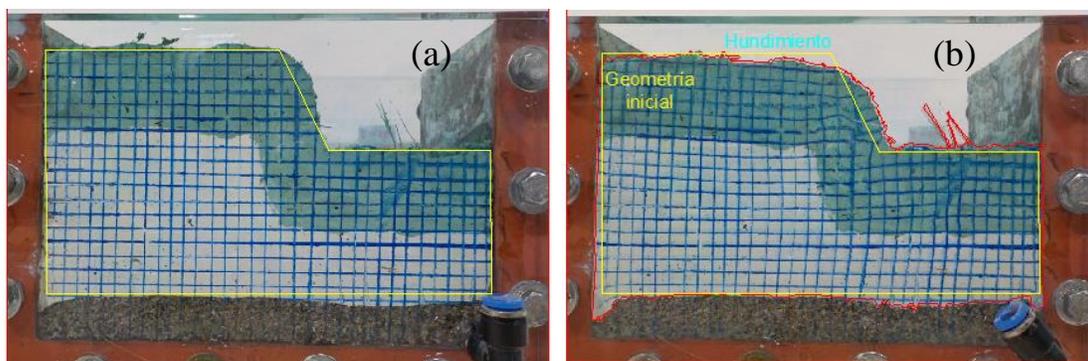


Figura N° 64. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el Modelo M1 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

- **Modelo M2– Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo) después de la consolidación:**

Las dimensiones definitivas de este modelo físico se presentan en la Figura N° 65, tanto para el prototipo como para la escala reducida $N=100$ g. Como se ha mencionado en los casos anteriores la geometría del talud planteada antes de la consolidación no tiene mayor diferencia con la obtenida después de la consolidación, esto se le atribuye al reforzamiento que impide que se generen grandes deformaciones verticales.

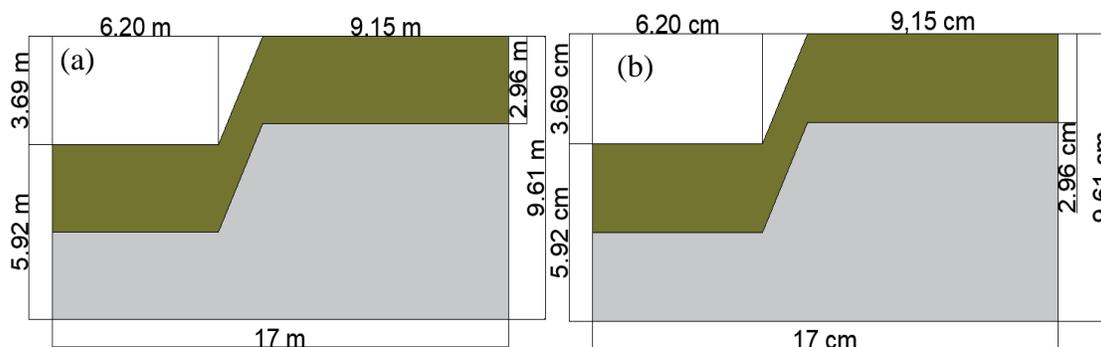


Figura N° 65. Geometría definitiva del talud (a) prototipo a escala real y (b) Modelo a escala reducida de Modelo M2 - Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

Análisis del registro fotográfico

En la Figura N° 66 se presenta el talud antes y después de realizar el proceso de vuelo en la centrífuga geotécnica, el cual, al igual que el Modelo M1-Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) muestra cierta producción de movimientos, pero no es evidente la superficie de falla como sí lo es para el suelo sin refuerzo. Las únicas deformaciones que se presentaron en este modelo corresponden a un hundimiento de 0.29 m en la corona del talud y otros pequeños movimientos en la profundidad. Lo anterior coincide con lo expuesto por el autor Suárez (1998), quien en su estudio explicó que para alcanzar una superficie de falla bien definida en un talud los movimientos que se producen deben ser significativos, o bien el material ha de ser lo suficientemente débil para que esta condición se cumpla.

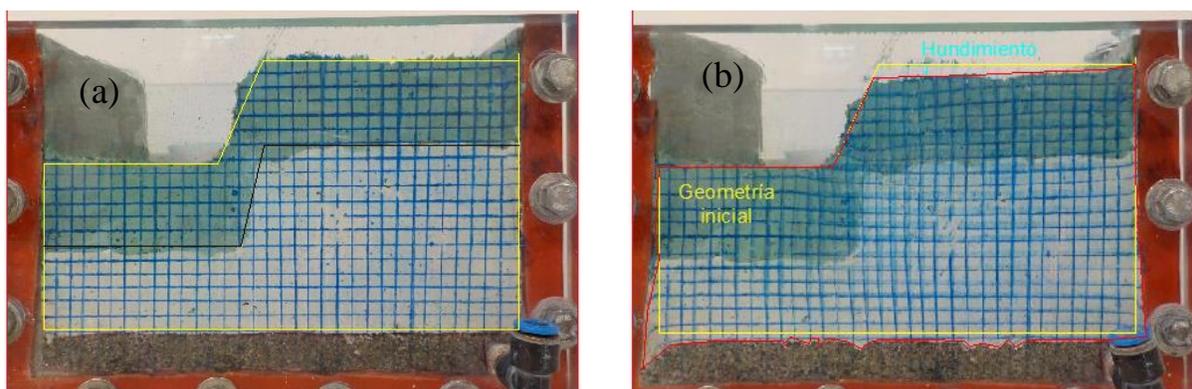


Figura N° 66. Comparación de modelos en centrífuga (a) antes y (b) después del ensayo en el Modelo M2- Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

Fotointerpretación: Análisis de vectores de desplazamiento a escala real (prototipo) usando AutoCAD.

- **Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

La Figura N° 67 muestra los vectores de desplazamiento del Modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo). En esta figura se puede observar una superficie de falla rotacional y un asentamiento del talud en los bordes de la caja, seguramente debidos al incremento de la gravedad, y también se observan grandes deformaciones tanto en la pata como la base del talud. En la base del talud se puede ver, además, un levantamiento del material que está indicado por los vectores que se desplazan hacia la parte superior de esta.

Se evidencia, además, un comportamiento inestable en el suelo y en la corona del talud donde los vectores se desplazaron más de 1 m del prototipo. Y también se observa una reducción de los movimientos en la parte inferior del talud, mientras que la superficie del modelo físico presenta grandes deformaciones las cuales generan un círculo de falla profundo, como es común que ocurra en este tipo movimientos (Suárez, 1998).

Al comparar los resultados de los vectores de desplazamiento con el registro fotográfico (Figura N° 54) se evidenció gran similitud, consistente en el hecho de que el modo de falla ocurre por desplazamientos rotacionales múltiples, lo que indica un comportamiento inestable y con grandes deformaciones en los dos casos.

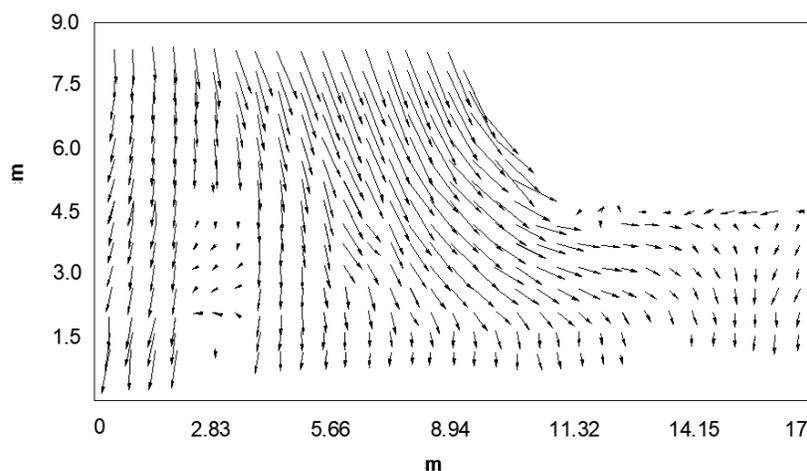


Figura N° 67. Diagrama de vectores de desplazamiento M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia

- **Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

En la Figura N° 68 se presentan los vectores de desplazamiento de los modelos M1 y M2 Tipo II, debido a que la geometría y los resultados de los análisis en AutoCAD fueron prácticamente iguales para los modelos físicos a escala real (prototipo) que fueron reforzados con 1.11 % de fibras de vidrio en un espesor de (a) 0.13 m y (b) 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo.

Los vectores de desplazamiento permiten observar las superficies de falla múltiples de tipo: talud, pie y base las cuales se desarrollan en estos modelos. Son evidentes también los hundimientos en la corona del talud respecto a la posición inicial, y el levantamiento de material en el pie de este. Adicionalmente, se puede ver que, a pesar de no tener un alto porcentaje de reforzamiento, se incrementa la estabilidad del talud (Suárez, 1998) y se presentan unos asentamientos en los bordes y la parte inferior de la caja, los cuales posiblemente se deben al incremento de la gravedad.

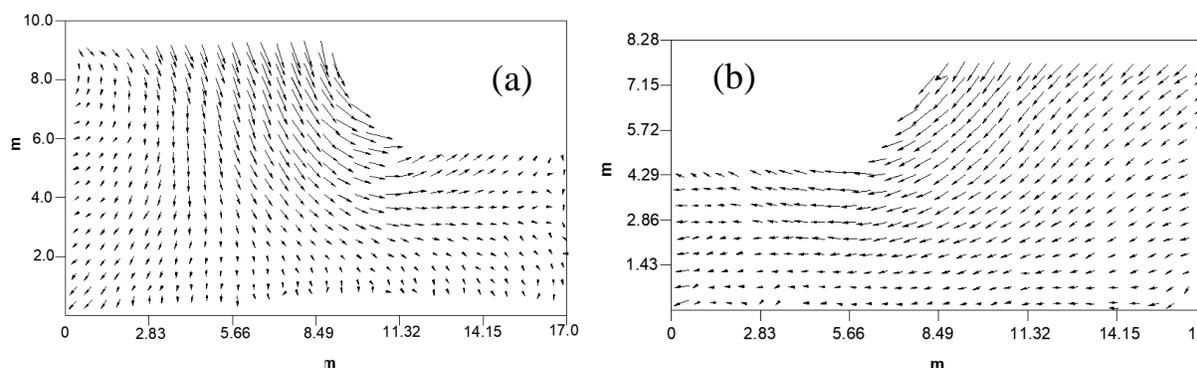


Figura N° 68. Diagrama de vectores de desplazamiento Modelo (a) M1- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

Los resultados obtenidos en los registros fotográficos y los vectores de desplazamiento dan cuenta de similitudes notables entre ambos modelos (M1 y M2 Tipo II). Uno de los puntos de confluencia más notable entre ambos modelos es que las superficies de falla desarrolladas son iguales en los dos análisis, además, estos tienen configuraciones geométricas parecidas que indican que la técnica de modelación física creada es repetible.

- **Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo)**

En la Figura N° 69 se presentan los vectores de desplazamiento en los cuales se pueden observar movimientos mínimos que no generan una superficie de falla definida, pues se requieren suelos débiles y movimientos de gran magnitud para que se produzca y se evidencie la superficie de falla en los taludes, según lo indicó Suárez (1998) en su trabajo de investigación. También se puede ver que gracias al reforzamiento de estos modelos se presenta una mayor estabilidad en la estructura e incluso se evita la ocurrencia de una ruptura del suelo, aun con los movimientos que se generaron en el vuelo, lo cual se debe a que los suelos reforzados generan una mayor estabilidad, como se indicó en las investigaciones de Herrera (2015) y Teerawattanasuk et al. (2014).

De otra parte, los análisis de imágenes en AutoCAD que se presentan en las Figura N° 58 y Figura N° 60 junto con los vectores de desplazamiento para los modelos M1-Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y M2-Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo) arrojaron información similar. En estos modelos físicos la estabilidad del talud es evidente, en comparación con los suelos que fueron reforzados en menor porcentaje y profundidad; aunque también se generaron desplazamientos que mostraron una tendencia horizontal cerca de la corona y una tendencia vertical en el resto del talud sin el desarrollo de la superficie de falla.

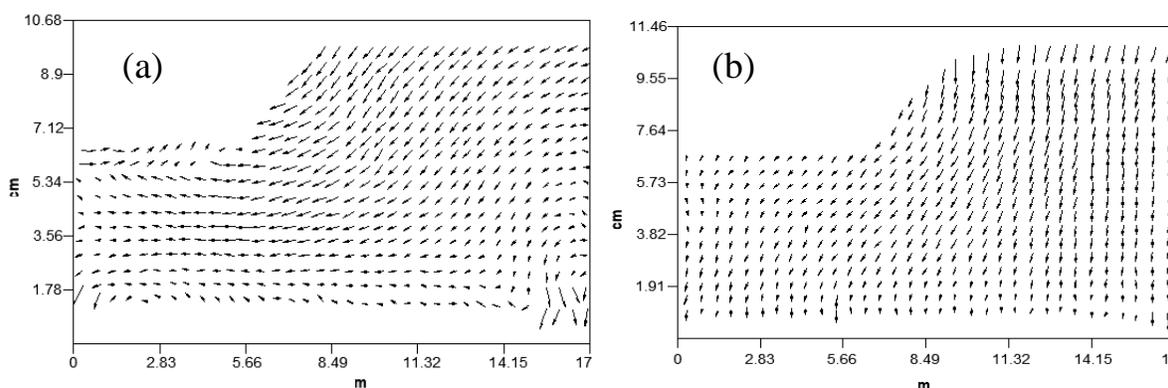


Figura N° 69. Diagrama de vectores de desplazamiento (a) Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

- **Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

En la Figura N° 70 se presentan los vectores de desplazamiento medidos a partir de las imágenes inicial y final del vuelo, donde se observan movimientos mínimos que no producen una superficie de falla visualmente definida.

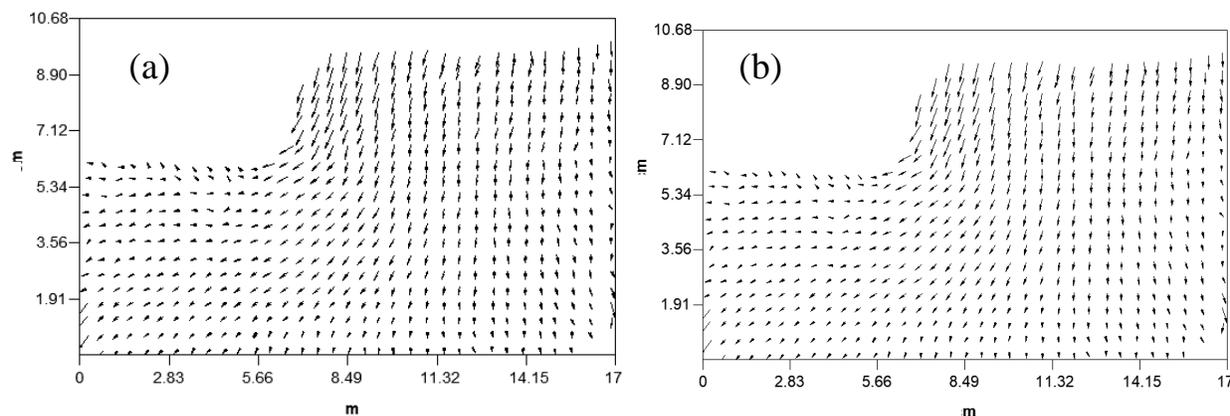


Figura N° 70. Diagrama de vectores de desplazamiento (a) Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y (b) Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo). Fuente propia.

Según los autores Chok et al. (2004) los suelos reforzados a profundidades mayores generan un aporte significativo en la estabilidad, lo que resulta evidente en estos modelos, es claro que un mayor porcentaje y profundidad de refuerzo hace que sea posible evitar la ocurrencia de grandes deslizamientos, aspecto que se analiza luego de ser comparado con el Modelo M2-Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo).

Finalmente, cabe destacar que el análisis del registro fotográfico comparado con los vectores de desplazamiento, tienen un comportamiento similar y se encuentran modelos muy estables. También es importante mencionar que ocurre un movimiento considerable en el Modelo M1-Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo), el cual seguramente se debió a la manipulación del modelo que se realizó antes de hacer el vuelo, pues al compararlo con el Modelo M2-Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo) no se mostró tendencia a la falla ni a los movimientos excesivos en esta configuración del talud.

7.4. Resultados de modelación numérica

Geometría a escala real (prototipo) definitiva (después de consolidar)

El método de análisis empleado en Slide para el cálculo de la estabilidad es el de equilibrio límite que recibe la denominación Bishop simplificado en condición no drenada. A continuación, en la Tabla 21 se presenta un resumen de las geometrías y las propiedades del suelo para los modelos numéricos definitivos (después de la consolidación).

Tabla 21. Resumen de los modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) después de la consolidación. Fuente propia

Modelos numéricos en Slide a escala real (prototipo) después de la consolidación						
Modelo	Su (kPa)		Peso unitario (kN/m²)		Profundidad	Pendiente
	Suelo Sin refuerzo	Suelo con refuerzo	Suelo Sin refuerzo	Suelo con refuerzo	de refuerzo	del talud
					m	°
M2 – Tipo I	10.58	-	14	-	0	64
M1 – Tipo II	10.58	12.47	14	16	0.13	57
M2 – Tipo II	10.58	12.47	14	16	0.15	59
M1 – Tipo III	10.58	13.81	14	14.1	1.89	54
M2 – Tipo III	10.58	13.81	14	14.1	1.98	56
M1 – Tipo IV	10.58	15.31	14	15.2	2.95	69
M2 – Tipo IV	10.58	15.31	14	15.2	2.96	67

- **Modelo M2 - Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

En la Figura N° 71 se presenta el Factor de Seguridad (FS) del Modelo M1 - Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), el cual corresponde a un valor de 0.992, es decir, tiene una condición de inestabilidad debido a que su $FS < 1.1$ (Gaivilanes, 2019).

Se puede evidenciar un deslizamiento rotacional con una superficie de falla de pie, lo que resulta común en los suelos homogéneos (Olarte, 2017), esta alcanza una profundidad de 3.4 m a escala real (prototipo). Según Suárez (1998) en este tipo de falla normalmente se desarrolla en un manto blando donde se concentran los esfuerzos que terminan por generar una falla profunda posteriormente.

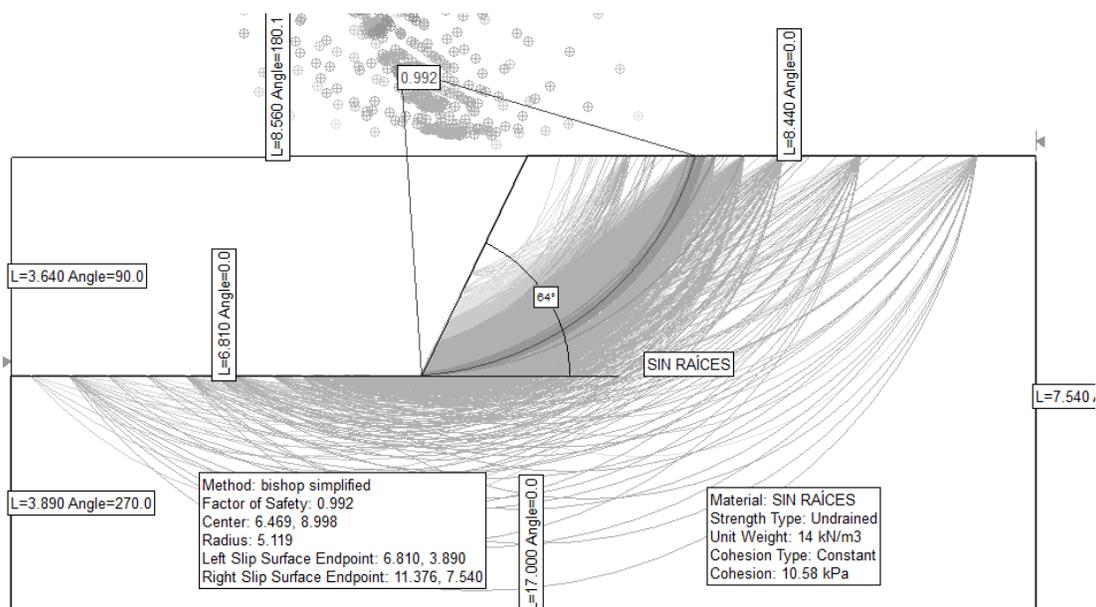


Figura N° 71. Modelo M2 - Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).

- **Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

El modelo numérico fue generado en Slide teniendo en cuenta los parámetros del suelo con y sin refuerzo. Tal como se muestra en la Figura N° 72, el Factor de Seguridad (FS) obtenido con esta modelación en el software corresponde a 1.139 ($FS > 1.1$), lo que quiere decir que el talud es moderadamente estable (Gaivilanes, 2019).

En este modelo el incremento en el Factor de Seguridad (FS) es de 14.82% con respecto al Modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), lo que indica un efecto positivo del refuerzo artificial en la estabilidad del talud. La superficie de desplazamiento mínima global alcanza una profundidad de 3.62 m.

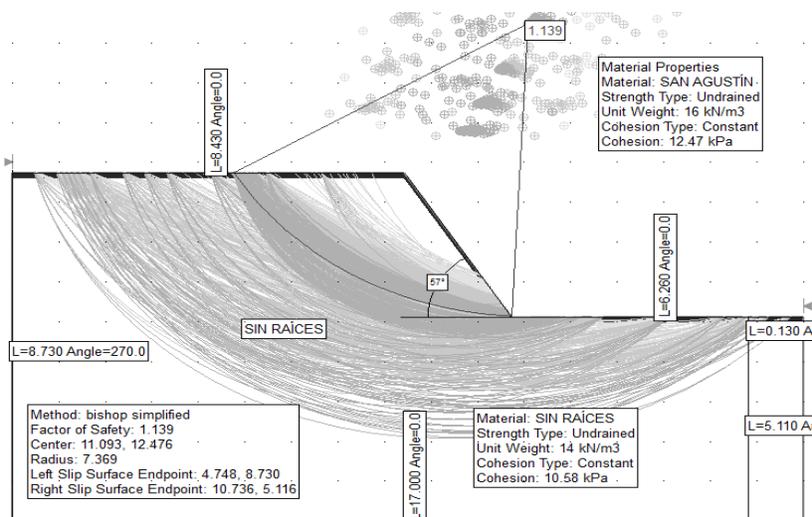


Figura N° 72. Modelo M1 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia

- **Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

El Factor de Seguridad (FS) obtenido en Slide para este modelo corresponde a 1.132 (FS > 1.1), es decir, se generó un incremento en el FS de 14.11 %, respecto al modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), lo que indica que el talud es moderadamente estable (Gaivilanes, 2019). Y en cuanto a la superficie de desplazamiento mínima global esta es de 3.54 m. Ver Figura N° 73.

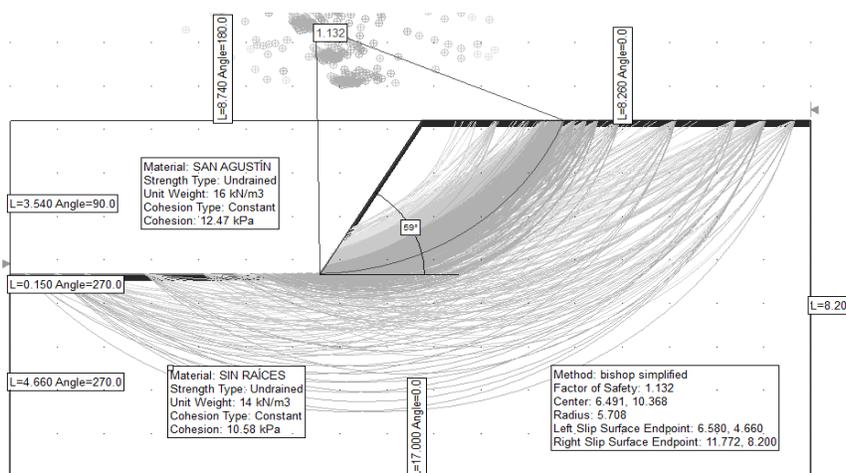


Figura N° 73. Modelo M2 - Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente

propia

- **Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

En este modelo se obtuvo un Factor de Seguridad (FS) de 1.318 (ver Figura N° 74), lo cual indica que a mayor profundidad y porcentaje de refuerzo del suelo mayor será el incremento que se generará en la estabilidad del talud. En este caso el FS aumentó un 32.86 % respecto al modelo en el que no se aplicó refuerzo. Dado que el $FS > 1.1$ se concluyó que el talud es estable en estas condiciones (Gaivilanes, 2019).

La superficie de desplazamiento mínima global es de 7.5 m en el modelo y ocurre a esta profundidad porque, según lo expuesto por Gentile et al. (2010), la falla crítica se desarrolla por debajo del suelo reforzado y no en la superficie. El incremento significativo del factor de seguridad se asocia al aporte mecánico en el suelo reforzado en la estabilización, tal y como lo manifestaron en sus estudios investigadores como Herrera (2015) y Teerawattanasuk et al. (2014), pues en los ensayos realizados por estos autores se evidenció un incremento en los parámetros de resistencia del suelo y por lo tanto en el factor de seguridad.

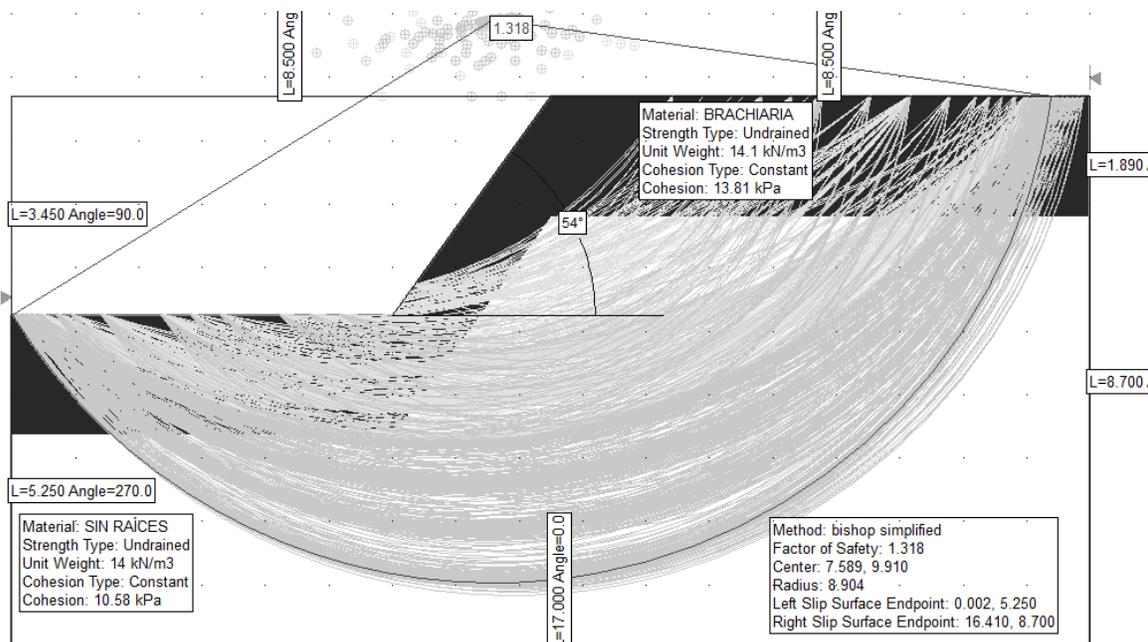


Figura N° 74. Modelo M1 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente

propia

- **Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

En la Figura N° 75 se presentan los resultados obtenidos de la modelación en el software Slide, donde se puede ver que el modelo arrojó un FS de 1.228 que se incrementó en un 23.8 % en comparación con el Modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo de prototipo). Dado que el FS > 1.1 se concluyó que el talud es estable (Gaivilanes, 2019).

Para este modelo la superficie de desplazamiento mínima global fue de 7.49 m, lo que significa que la falla crítica en el talud aumentó su profundidad con respecto al modelo en el que no aplicó refuerzo. Este comportamiento es común en suelos reforzados con vegetación donde la superficie de falla se desarrolla por debajo del suelo reforzado y no desde la superficie, como lo indicaron Gentile et al. (2010).

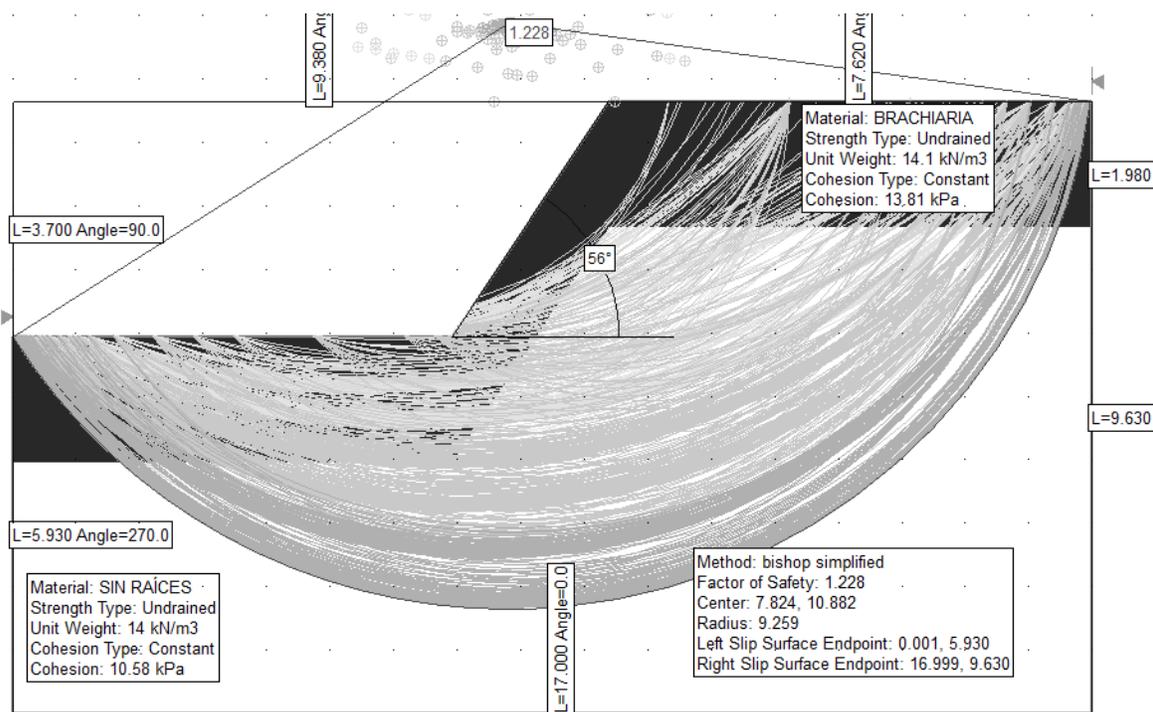


Figura N° 75. Modelo M2 - Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente

propia

- **Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

El Factor de Seguridad (FS) obtenido mediante la modelación numérica en Slide fue de 1.355, tal y como se muestra en la Figura N° 76. Estos resultados indican que a una profundidad de refuerzo de 2.95 m y un refuerzo de 7.34 % con fibras de vidrio se genera un incremento en el FS de 36.59 % con respecto al modelo sin refuerzo.

La superficie de desplazamiento mínima global en el modelo numérico a escala real (prototipo) que arrojó el software fue de 7.73 m. En comparación con los modelos que presentaron menor porcentaje de refuerzo en este modelo se observa una profundidad mayor en la superficie de la falla crítica, lo cual se explica, como se mencionó previamente, por el desarrollo de esta que ocurre por debajo del suelo reforzado y no sobre la superficie del talud (Gentile et al., 2010).

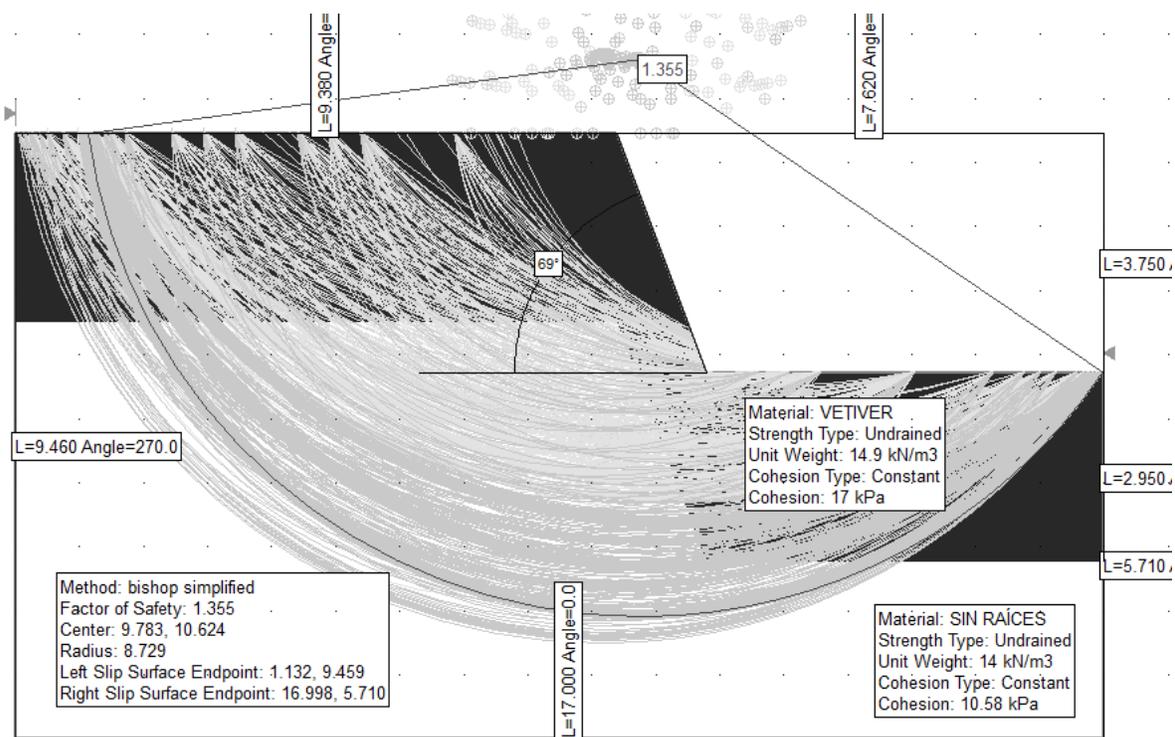


Figura N° 76. Modelo M1 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia

- **Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar).**

La Figura N° 77 muestra los resultados obtenidos en la modelación numérica en el software Slide, donde se observa que este modelo registró un FS de 1.374 que se incrementó en un 38.5 % en comparación con el valor obtenido en el modelo sin refuerzo. Dado que el factor de seguridad del Modelo M2-Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo) es mayor que 1.1 se concluyó que el talud es estable (Gaivilanes, 2019).

La superficie de desplazamiento mínima global para este modelo fue de 7.76 m. Esto significa que el Modelo M2-Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) presenta este comportamiento porque la falla se desarrolla por debajo del suelo reforzado, a diferencia de lo que ocurre con los suelos que muestran menores porcentajes de profundidad y reforzamientos, según lo explicaron Gentile et al. (2010). Por su parte, Gray y Leiser (1982) expusieron en su estudio que las raíces o las fibras incrementan la resistencia al corte, debido a que el suelo se comporta como un material compuesto que genera mayor resistencia a la tensión, por lo cual también el factor de seguridad tiende a incrementar.

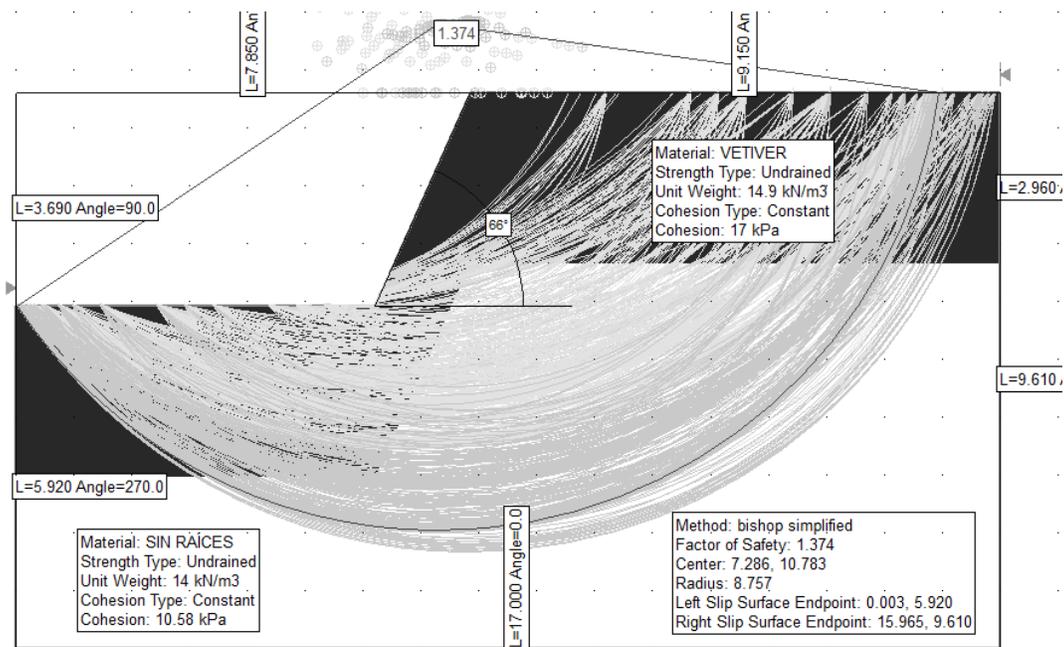


Figura N° 77. Modelo M2 - Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo), geometría definitiva a escala real (después de consolidar). Fuente propia.

Análisis del factor de seguridad (FS) obtenido en las modelaciones numéricas (prototipo):

Las modelaciones se realizaron en el software Slide con el propósito de cuantificar el factor de seguridad (FS) y su incremento ΔFS (%) de acuerdo con cada uno de los porcentajes de refuerzo obtenidos. En la Tabla 22 se resumen estos resultados.

Tabla 22. Recopilación de factores de seguridad obtenidos en cada modelo numérico vs % de refuerzo del prototipo. Fuente propia.

Profundidad de reforzamiento (m)			% Refuerzo con fibras de vidrio	Factor de seguridad			ΔFS (%)
M1	M2	Promedio		M1	M2	Promedio	
-	-	-	-	0.992	0.992	0.992	-
0.13	0.15	0.14	1.11	1.139	1.132	1.136	14.52
1.89	1.98	1.93	4.23	1.318	1.228	1.273	28.32
2.95	2.96	2.955	7.34	1.355	1.375	1.365	37.6

En la Figura N° 78 se graficaron los datos obtenidos en relación con el porcentaje de fibras de vidrio, los cuales concuerdan con los hallazgos presentados en los estudios de autores como Herrera (2015), Teerawattanasuk et al. (2014), León (2001), Suárez (2009), Gentile et al. (2010), entre otras investigaciones en las que se ha evidenciado que el suelo reforzado (natural o artificialmente) tiene un Factor de Seguridad mayor que el suelo sin refuerzo. Este comportamiento desarrolla resistencia a la tracción al evitar su rompimiento y retardar la falla de suelo, lo cual indica que el comportamiento presentado en la gráfica tiene relación con los resultados obtenidos en otros trabajos de investigación.

Además del porcentaje de fibras de vidrio, en este estudio se ha podido observar que otro factor que influye en la estabilidad de los taludes es la profundidad del refuerzo cuyo comportamiento se puede estudiar a partir de la gráfica presentada en la Figura N° 79, donde se muestran los datos promedios encontrados en el análisis numérico, mediante el Factor de Seguridad, es importante destacar que este aumenta según el sistema de reforzamiento, el cual está dado por el porcentaje de fibras de vidrio y la profundidad del refuerzo.

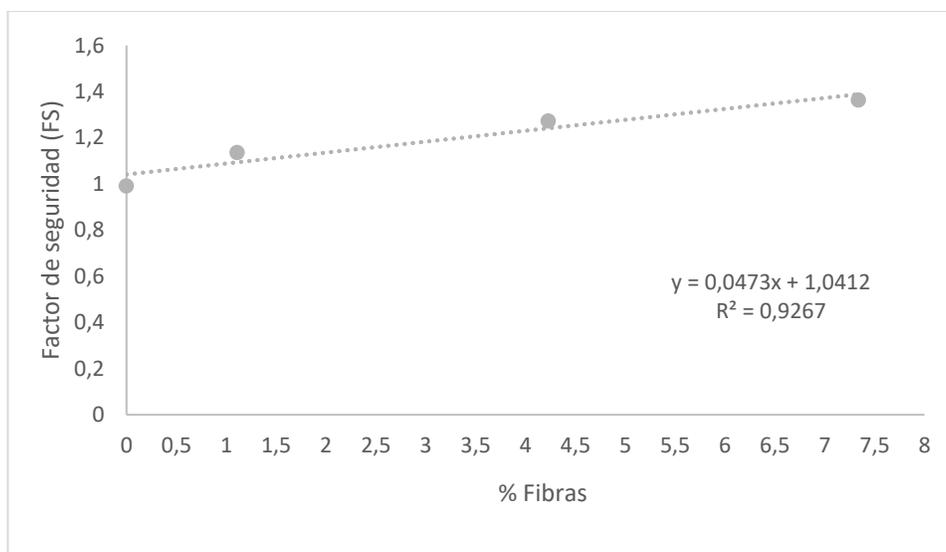


Figura N° 78. Grafica de factor de seguridad Vs. % Fibras de vidrio. Fuente propia.

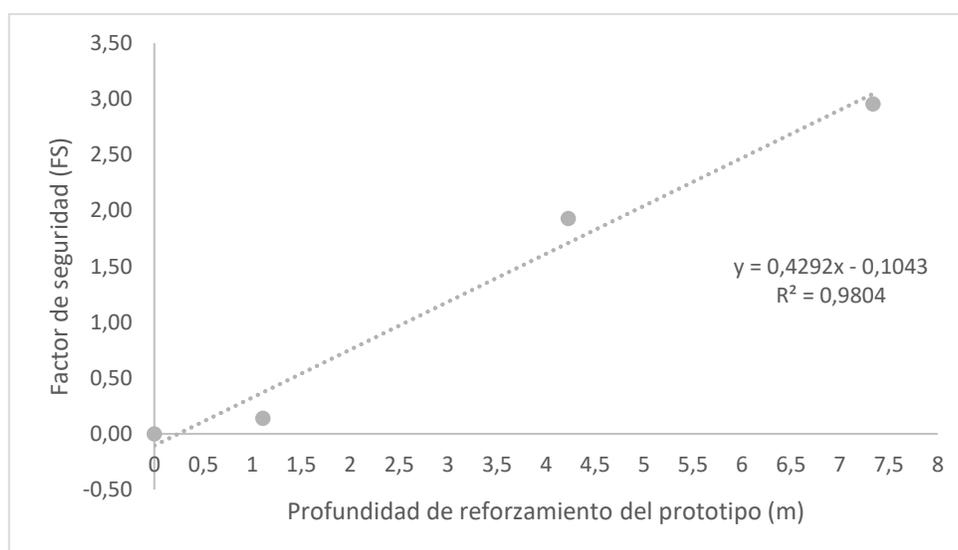


Figura N° 79. Grafica de factor de seguridad Vs. Profundidad de reforzamiento del prototipo. Fuente propia.

En la Figura N° 80 y Figura N° 81 se pueden ver los resultados del incremento del FS que muestran el comportamiento de los suelos analizados, los cuales son coherentes con los hallazgos presentados en la literatura consultada, tal es el caso de la investigación realizada por los autores Teerawattanasuk et al. (2014). En estos resultados se evidencia que a mayor porcentaje de fibras que simulan las raíces y a mayor profundidad en el talud se tiene un incremento en el factor de seguridad.

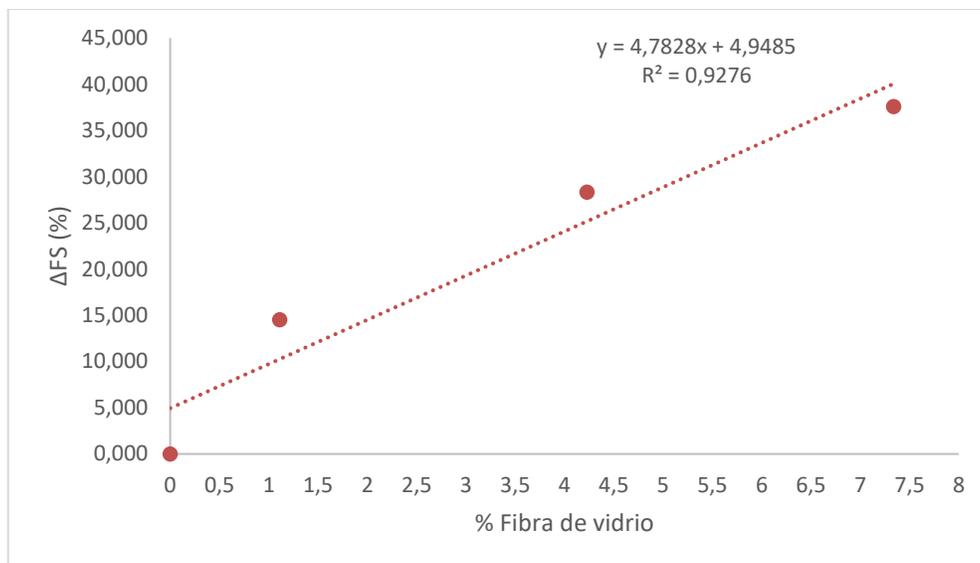


Figura N° 80. Grafica de incremento del factor de seguridad Vs. % fibras de vidrio. Fuente propia.

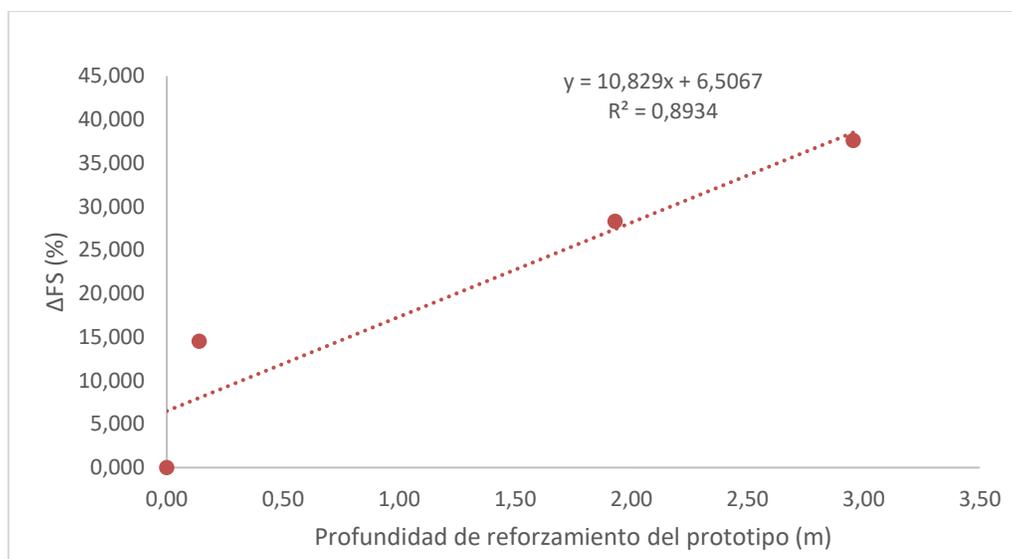


Figura N° 81. Grafica de incremento del factor de seguridad Vs. Profundidad de refuerzo. Fuente propia.

7.5. Comparación entre modelación física y numérica (prototipo)

Análisis comparativo entre modelación física y numérica de cada sistema de reforzamiento:

- **Modelo M2- Tipo I (0% fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo).**

Después de realizar el análisis de las imágenes en AutoCAD y los vectores de desplazamiento se determinó que la superficie de falla del talud se generó de manera progresiva, se produjeron grandes deformaciones debido a la homogeneidad y la debilidad del material, y se presentaron grietas de tracción que son provocadas generalmente en este tipo de fallas. Estos resultados de la modelación física indican que el talud es inestable, debido a que presenta grandes deformaciones y desplazamientos. El tipo de falla determinada para este modelo se denomina *falla circular de pie*, clasificación que al igual que para cada uno de los modelos se obtuvo al comparar sus características con la descripción dada por Suárez (1998) y Hutchinson (1988) respecto a este tipo de comportamientos.

En la modelación numérica realizada en el software Slide se presentaron dos resultados. El primero dio lugar previo a la realización de los ensayos en el laboratorio, los cuales las geometrías estuvieron sujetas a cambios posteriores debido a la consolidación del material y en los que se encontró un factor de seguridad de 1.048; el segundo resultado fue el modelo con geometría definitiva que arrojó un factor de seguridad de 0.992. En estos resultados se evidenció la influencia que tiene la geometría en la estabilidad del talud y la importancia de considerar los cambios que se van dando en la práctica como, por ejemplo, los observados en este caso en específico donde la geometría final mostró grandes modificaciones con respecto a la teoría a raíz de la consolidación del material. No obstante, en términos generales, los análisis finales se realizaron con el último Factor de Seguridad y la geometría definitiva después de la consolidación, lo que quiere decir que en la modelación numérica los resultados de este talud evidenciaron una inestabilidad debido a que el $FS < 1$ (Herrera, 2015).

Al comparar los resultados de la modelación física con los obtenidos en la modelación numérica se concluye que para este modelo se presenta una condición de inestabilidad.

- **Modelo M1- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2- Tipo II (1.11% fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

En el análisis de las imágenes y la modelación física se presenta una superficie de falla que se genera de manera progresiva, inicialmente esta se presenta como una falla de pie a 3.59 m de

profundidad y luego como dos fallas circulares profundas de 4.58 m y 5.73 m en escala de prototipo (Suárez, 1998) en el Modelo M1-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo). En el Modelo M2-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo) también se encuentra una superficie de falla de tipo circular de pie que coincide con los resultados mostrados en el análisis del estudio de Gentile et al. (2010), lo que corrobora que en los suelos reforzados la falla se desarrolla debajo de este, generando así mayor profundidad. Esto se puede evidenciar tanto en el registro fotográfico como en los vectores de desplazamiento, lo cual indica que el comportamiento de estos modelos se debe principalmente a la influencia que tiene cada tipo de refuerzo en el suelo (Chok et al., 2004).

Para la modelación numérica de los distintos modelos en el software Slide se consideraron dos análisis en dos momentos diferentes: un análisis que se realizó previo a la consolidación, el cual generó un factor de seguridad de 1.06; y un análisis que se llevó a cabo después de la consolidación donde se presentó un factor de seguridad de 1.139 y 1.132 en cada caso, es decir, un valor de 1.136 en promedio, y un incremento del factor de seguridad (ΔFS) de 14.52 % en promedio.

En los modelos matemáticos se desarrollaron superficies de tipo circular de pie y progresivas, mientras que en los modelos físicos ocurrieron fallas locales que alcanzaron una superficie de falla circular profunda, lo cual indica que la profundidad de la falla de los modelos físicos es menor respecto a los resultados obtenidos en la modelación numérica.

Al comparar los resultados obtenidos se evidenció una similitud entre la modelación física y la numérica. Sin embargo, es importante reconocer que existen diferencias entre los resultados obtenidos, las cuales están dadas porque en la modelación física realizada en esta práctica se limita el alcance a los movimientos y las deformaciones, y en este caso la modelación numérica únicamente cuantifica el Factor de Seguridad y no se contemplan las deformaciones. Por ello se resalta la necesidad de complementar una modelación con la otra y considerar ambas en los estudios para poder comprender el comportamiento de los suelos reforzados y analizados desde diferentes perspectivas.

- **Modelo M1- Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2- Tipo III (4.23% fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

Estos modelos poseen una profundidad de reforzamiento considerable que los convierte en modelos altamente estables, debido a que al no presentar grandes movimientos no se observa la superficie de la falla (Suárez, 1998).

Al comparar los dos tipos de modelaciones (física y numérica) se encontraron similitudes en cuanto al efecto del refuerzo artificial que en ambos casos generó estabilidad del talud. Sin embargo, estas modelaciones tienen enfoques diferentes, por lo que también se presentan limitaciones al compararlas entre sí. Estas limitaciones ya se han mencionado anteriormente, pero es importante resaltar que al complementarse entre sí estas generan aportes significativos para conocer el comportamiento de estos taludes.

- **Modelo M1- Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y Modelo M2- Tipo IV (7.34% fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo):**

Estos modelos presentan resultados similares en cuanto a la profundidad que mostraron después de la consolidación, la cual es prácticamente igual, debido a que se utilizó el mismo sistema de reforzamiento. En este caso el talud se encuentra reforzado de tal manera que no es posible identificar las superficies de falla. El desplazamiento vertical (hundimiento) de los modelos respecto a su condición inicial (en prototipo) se modificó 0.19 m y 0.29 m respectivamente, y en el registro fotográfico analizado en AutoCAD y los vectores de desplazamiento se evidenció que el talud conserva en gran medida la geometría inicial.

En la modelación numérica en Slide se obtuvo un FS de 1.396 para los dos modelos preliminares, y un FS para la geometría definitiva en cada caso de 1.355 y 1.375 (FS promedio de 1.365). Esto quiere decir que en estos últimos modelos el incremento del factor de seguridad ΔFS (%) es en promedio de 37.6 %.

8. Conclusiones

- Del análisis de los ensayos realizados se establece que a pesar de las limitaciones técnicas se obtuvo un aporte importante en el campo de la Geotecnia, principalmente respecto a la técnica de modelación física experimental. Estos resultados muestran incertidumbres que podrán resolverse con la práctica y mejora de la metodología planteada.
- En las modelaciones físicas y numéricas del Modelo M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo) se concluyó que el talud se encontraba en condición de inestabilidad debido a que arrojó un FS de 0.922 ($FS < 1.1$). Este resultado sirvió como base para analizar el comportamiento del suelo al agregar un sistema de refuerzo. Se considera una incertidumbre debido a que para este modelo solo se realizó un proceso de consolidación; mientras que en los suelos con estratos reforzados con fibras de vidrio se aplicaron dos consolidaciones al suelo sin refuerzo por el método constructivo.
- En las modelaciones físicas y numéricas a escala real (prototipo) de los modelos M1-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y M2-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo) se obtuvo un factor de seguridad promedio de 1.136, es decir, el FS incrementó un 14.52 % en promedio respecto al suelo sin refuerzo. La información suministrada por los vectores de desplazamiento respecto a las deformaciones y los movimientos del talud mostró que estos modelos son estables.
- Los modelos M1-Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.89 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y M2-Tipo III (4.23 % fibras de vidrio – 1.98 m de profundidad de refuerzo del prototipo) mostraron un FS promedio de 1.273, y un incremento promedio del FS de 28.32% respecto al talud sin refuerzo. Los resultados de la fotointerpretación mostraron que hubo una mayor estabilidad debido a que se presentaron menores deformaciones, las cuales no generaron una superficie de falla definida en estos modelos, pero sí algunos movimientos considerables y profundos.

- En los modelos a escala real (prototipo) M1-Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.95 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y el M2-Tipo IV (7.34 % fibras de vidrio – 2.96 m de profundidad de refuerzo del prototipo) se produjo un FS promedio de 1.367. El tipo de reforzamiento aplicado en estos modelos aportó considerablemente a la estabilidad de los taludes dado que su contenido de fibras de vidrio distribuidas en la extensión total del talud, según las profundidades mencionadas, incrementó 37.6 % el FS con respecto al modelo sin refuerzo.
- La fotointerpretación en AutoCAD permitió determinar que los modelos físicos a escala real (prototipo) generaron movimientos suficientes para causar una superficie de falla definida y en los modelos M2-Tipo I (0 % fibras de vidrio – 0 m de profundidad de refuerzo del prototipo), el M1-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.13 m de profundidad de refuerzo del prototipo) y el M2-Tipo II (1.11 % fibras de vidrio – 0.15 m de profundidad de refuerzo del prototipo); en los demás casos se produjeron movimientos a grandes profundidades, los cuales no alcanzaron la ruptura del material. El sistema de reforzamiento empleado en cada modelo para las simulaciones físicas y numéricas aporta significativamente a la estabilidad del talud, lo cual depende de la profundidad y el porcentaje de fibras de vidrio que se empleen para el reforzamiento artificial, esto quiere decir que un mayor sistema de reforzamiento generará mayor estabilidad porque aumenta la resistencia al corte no drenado S_u y el FS en cada caso.
- Se evidenció un incremento notable en la estabilidad de los modelos, los cuales fueron aumentando de acuerdo con la cantidad de fibras de vidrio y la profundidad del refuerzo.
- En la modelación física se obtuvieron resultados cualitativos respecto a los registros fotográficos, también se logró medir de manera indirecta, es decir efectuadas no sobre los taludes sino sobre las imágenes de estos, las deformaciones, los movimientos y las superficies de fallas; Por otro lado, en la modelación numérica se obtuvo información cuantitativa respecto al Factor de Seguridad, pero no se consideraron las deformaciones ni movimientos. Sin embargo, al combinar estos dos análisis es posible evidenciar el efecto de los sistemas de reforzamiento en la estabilidad de los taludes.

9. Recomendaciones

Basado en la modelación física y los análisis realizados se recomienda usar las técnicas de estabilización de taludes con vegetación como alternativa en la ingeniería civil, las cuales prometen generar grandes aportes en este campo de estudio debido al refuerzo que generan, además de ser significativo, contribuye a la conservación del medioambiente. Además, se recomienda que, aun cuando los suelos reforzados hayan mostrado un buen comportamiento mecánico, se cuente con la asesoría de profesionales que no solo conozcan las áreas de geotecnia, sino que también estén relacionados con las especies de vegetación, las principales ventajas que estas generan, cuáles son los requerimientos de siembra y mantenimiento, y los conozcan todas las condiciones necesarias para conseguir proyectos de bioingeniería que sean eficientes, sostenibles, rentables y amigables con el medioambiente.

Dadas las limitaciones y las dificultades técnicas que se presentaron durante la elaboración de este trabajo se recomienda que en futuras investigaciones se cuente con una cámara especializada que genere capturas de imágenes durante el ensayo, para así conocer el comportamiento de los modelos en cada etapa, y no solo al inicio y al final de este. Además, se recomienda realizar modelaciones con softwares como Plaxis para comparar los resultados obtenidos con métodos de análisis más avanzados.

En futuras investigaciones se recomienda analizar el comportamiento del talud sin refuerzo tras la consolidación secundaria señalada en el documento, para comprobar si ocurre un exceso en el aporte a la estabilidad de los taludes reforzados. Se recomienda además analizar si el tinte mineral tiene un efecto en los parámetros de resistencia, realizando la inclusión de este colorante en las muestras de los ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU). Por otro lado en futuras investigaciones se sugiere generar puntos de referencias según los requerimientos de softwares como GeoPIV para garantizar mayor precisión en los análisis de imágenes.

10. Referencias

- Abe, K., & Iwamoto, M. (1986). An Evaluation of Tree-Root Effect on Slope Stability by Tree-Root Strength. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 68(12), 505–510. https://doi.org/https://doi.org/10.11519/jjfs1953.68.12_505
- Azizi, F. (2000). *Applied Analyses in Geotechnics* (E. & F. Spon (ed.)). CRC Press. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=_MzWBetcVhAC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Applied+Analyses+in+Geotechnics&ots=PueqOznluC&sig=ZgGgTVGUPagezsfYj7nolHcoYfw&redir_esc=y#v=onepage&q=Applied+Analyses+in+Geotechnics&f=false
- Cardozo, L. (2020). 3.1 *Fotogrametría*. <https://www.academia.edu/38294082/Fotogrametría>
- Chacón, J., Fernández, C. I., Francisco Lamas Fernández, & Hamdouni, R. El. (2004). MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS Prácticas y Ensayos. In J. Chacón, C. Irigaray, H. El Hamdouni, & F. Lamas (Eds.), *ResearchGate* (p. 241) (1 st, Issue June 2014). Chacón, José Irigaray, C El Hamdouni, Hamdouni Lamas, Francisco. https://www.researchgate.net/publication/258857638_MECANICA_DE_SUELOS_Y_ROCAS_Practicas_y_Ensayos/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic
- Chok, Y. h, Kaggwa, W. S., Jaksa, M. B., & Griffiths, D. V. (2004). Modelling the effects of vegetation on stability of slopes. *Proceedings, 9th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, Auckland, 391–397. <http://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/29278>
- Chomchalow, N. (2000). *Manual of the International Training Course on the Vetiver System* (N. Chomchalow (ed.); Issue November). Office of the Royal Development Projects Board.
- Corominas, J., & De Caminos, I. (2004). Tipos de rotura en laderas y taludes. In *Tipos de rotura en laderas y taludes* (Issue 1989, pp. 1–17).
- Cuenca, A. (2013). Aplicaciones del ensayo triaxial. In *UNIVERSIDAD DE ALICANTE*.
- Eab, K. H., Likitlersuang, S., & Takahashi, A. (2015). Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation. *Soils and Foundations*, 55(5), 1270–1281. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.025>
- Escobar, D. E., & Camacho, L. O. (2014). *VIABILIDAD DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PASTO VETIVER PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN COLOMBIA PERÍODO I, AÑO 2014*. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

- Gaivilanes J., H. (2019). Curso de explotación de canteras. *Parámetros Geotécnicos y Estabilidad de Taludes*, 1–87.
- García, E. J., & Melentijevic, S. (2015). Centrífuga Geotécnica Geotechnical Centrifuge. *Revista Digital Del Cedex*, 178. <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/549/522>
- García, G. (2018). Compresibilidad de Suelos. Teoría de la Consolidación. *Universidad Europea de Madrid*, 51. <http://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/1>. Tema 1 Consolidacion.pdf
- Gentile, F., Elia, G., & Elia, R. (2010). Analysis of the stability of slopes reinforced by roots. *DESIGN AND NATURE 2010 Volume: 138, June*, 189–200. <https://doi.org/10.2495/DN100171>
- Gómez, D. A. (2011). *Iniciación de la modelación física en centrífuga geotécnica de un muro de contención con geoceldas*. La universidad de los Andes.
- Gonzalez, D. A., & Sierra, M. S. (2014). ESTUDIO COMPARATIVO DE TRES ESPECIES VEGETALES Y UNA TECNICA DE SIEMBRA UTILIZADAS COMO COBERTURA VEGETAL PARA LA ESTABILIZACION DE TALUDES CON CATEGORIA DE PENDIENTES EN EL AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA DANIELA [Universidad de Santander]. In *Implementation Science* (Issue 1). <http://repositorio.udes.edu.co/handle/001/2912>
- Grimshaw, R. G., & Barker, D. (1995). VETIVER GRASS – ITS USE FOR SLOPE AND STRUCTURE STABILIZATION UNDER TROPICAL AND SEMI TROPICAL CONDITIONS. In *Vegetation and slopes: Stabilisation, protection and ecology* (pp. 26–35). Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/10.1680/vasspae.20313.0003>
- Hengchaovanich, D. (2003). Vetiver System for Slope Stabilization. *APT Consult Co., Ltd, Bangkok, Thailand Abstract.*, 301–309. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.482.7620&rep=rep1&type=pdf>
- Hengchaovanich, D., & Nilaweera, N. S. (2007). AN ASSESSMENT OF STRENGTH PROPERTIES OF VETIVER GRASS ROOTS IN RELATION TO SLOPE STABILIZATION. *Springer Lexikon Kosmetik Und Körperpflege*, 582–582. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71095-0_11028
- Herrera, J. M. (2015). *EVALUACIÓN DE PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE EN*

SUELOS DE LADERA CUBIERTOS CON PASTO VETIVER (CHRYSOPOGON ZIZANIOIDES) EN LA VÍA NEIVA-VEGALARGA DEPARTAMENTO DEL HUILA (Vol. 97, Issue 12). ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO.

- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. In *US Geological Survey Circular* (Issue 1325). <https://doi.org/10.3133/cir1325>
- Hutchinson, J. N. (1988). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. *Landslides. Proc. 5th Symposium, Lausanne, 1988. Vol. 1, 26(2)*, 3–35. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)90310-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)90310-0)
- León, J. D. (2001). *Estudio y control de la erosión hídrica* (U. N. de Colombia (ed.); Vol. 1). Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20071>
- Liang, T., Bengough, A. G., Knappett, J. A., MuirWood, D., Loades, K. W., Hallett, P. D., Boldrin, D., Leung, A. K., & Meijer, G. J. (2017). Scaling of the reinforcement of soil slopes by living plants in a geotechnical centrifuge. *Ecological Engineering, 109*, 207–227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.067>
- Liang, T., Knappett, J., Bengough, A., & Ke, Y. (2017). Centrifuge modelling of the influence of slope height on the seismic performance of rooted slopes. *Géotechnique, 14(5)*, 1–15. <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.072>
- Madrid, R., Giráldez, J. V., Rodríguez, A., Contreras, V., Landa, B. B., Taguas, E. V., Viedma, A., Vanwalleghem, T., & Gómez Calero, J. A. (2014). *MANUAL DE TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN BIOTÉCNICA EN TALUDES DE INFRAESTRUCTURAS DE OBRA CIVIL* (A. de O. P. de la J. de A. C. F. y V. J. de Andalucía (ed.)). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13039/501100000780>
- Matteis, Á. F. (2003). Geología y Geotecnia Tema: Estabilidad de taludes [Universidad Nacional de Rosario]. In *Estabilidad de taludes*. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-nacional-autonoma-de-mexico/geologia-y-geomorfologia/apuntes/estabilidad-de-taludes/4258934/view>
- Mickovski, S. B., Hallett, P. D., Bransby, M. F., Davies, M. C. R., Sonnenberg, R., & Bengough, A. G. (2009). Mechanical Reinforcement of Soil by Willow Roots: Impacts of Root Properties and Root Failure Mechanism. *Soil Science Society of America Journal, 73(4)*, 1276–1285. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0172>
- Miranda, R. (2016). Revisión Panorámica del uso del Pasto Vetiver en Restauración de Taludes

- como Técnica de Bioingeniería del Suelo. In *Fundación UUniversidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano* (Vol. 1). FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO FACULTAD.
- Mitsch, W. J. (1998). Ecological engineering—the 7-year itch. *Ecological Engineering*, 10(2), 119–130. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00009-3)
- Ng, C. W. W., Kamchoom, V., & Leung, A. K. (2016). Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes. *Landslides*, 13(5), 925–938. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0645-7>
- Olarte, J. M. (2017). Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia. In *Clasificación de movimiento en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. <https://doi.org/10.32685/9789585978218>
- Olivera, Y., Machado, R., & Pozo, P. P. (2006). Características botánicas y agronómicas de especies forrajeras importantes del género *Brachiaria*. *Pastos y Forrajes*, 29(1), 1–13. [https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path\[\]=715](https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path[]=715)
- Pasto Tek. (2013). *Viveros Guerra GreenOutlet*. Pastos San Agustín. <https://pastotekmx.com/nuestros-pastos/pastos-san-agustin/>
- Pastos y Forrajes. (2018). *Características botánicas y agronómicas de especies forrajeras importantes del género del Brachiaria*. [https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17928/1/PASTOS Y FORRAJES DEL ECUADOR.pdf](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17928/1/PASTOS_Y_FORRAJES_DEL_ECUADOR.pdf)
- Quirós, A. (2012). *Efecto de las raíces sobre la resistencia al corte en suelos Informe* (Vol. 53, Issue 9). Universidad de Costa Rica.
- Ramirez, E. P. (2020). *Fotogrametría y fotointerpretación*.
- Sonnenberg, R., Bransby, M. F., Hallett, P. D., Bengough, A. G., Mickovski, S. B., & Davies, M. C. R. (2010). Centrifuge modelling of soil slopes reinforced with vegetation. *Canadian Geotechnical Journal*, 47(12), 1415–1430. <https://doi.org/10.1139/T10-037>
- Southernmedia. (2021). *How to Plant St Augustine Grass Using Plugs - Lawn and Petal*. How to Plant St Augustine Grass Using Plugs. <https://www.lawnandpetal.com/how-to-plant-st-augustine-grass-using-plugs/>
- Stokes, A., & Mattheck, C. (1996). Variation of wood strength in tree roots. *Journal of Experimental Botany*, 47(5), 693–699. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.5.693>

- Suárez, J. (1998). Caracterización de movimientos. In I. de suelos Ltda (Ed.), *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (Vol. 21, p. 560).
- Suárez, J. (2001). La Vegetación - Capítulo 8. In U. Industrial de Santander (Ed.), *CONTROL DE EROSIÓN En zonas tropicales* (p. 556).
<http://www.erosion.com.co/presentaciones/category/14-libro-deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales-jaime-suarez.html?download=149:231-8-vegetacionybioingenieria>
- Suárez, J. (2009). Capítulo 9: La vegetación y los deslizamientos. In Universidad Industrial de Santander (Ed.), *Deslizamientos: Técnicas de Remediación* (2nd ed., Vol. 2, Issue Tomo II. Editorial Universidad Industrial de Santander., p. 590). www.erosion.com.co
- Taylor, R. . (2018). *Geotechnical Centrifuge Technology* (R. N. Taylor (ed.)). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781482269321>
- Teerawattanasuk, C., Maneecharoen, J., Bergado, D. T., Voottipruex, P., & Le, G. L. (2014). ROOT STRENGTH MEASUREMENTS OF VETIVER AND RUZI GRASSES. *Lowland Technology International*, 16(2), 71–80. https://doi.org/10.14247/lti.16.2_71
- Walker, B., & Fell, R. (2013). Capítulo 5: Slope Stabilization techniques and their application. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Fecha de Recepción:

Julio 07 de 2021

yurleidy Rocha S.

Catalina Lozada

Firma del Estudiante

Firma del director del Trabajo Dirigido

(ESPACIO RESERVADO)

Fecha de presentación: 16 de Julio 2021.

a. Aprobado: _____ Aplazado: _____ Rechazado: _____

Jurado 1: _____

Jurado 2: _____

b. Observaciones:
