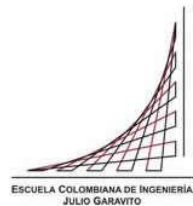


Maestría en Ingeniería Civil

Modelación física del efecto de la succión en la estabilidad de taludes en suelo fino.

Daniel Alejandro Carvajal Cárdenas

Bogotá, D.C., 28 de julio de 2021



**Modelación física del efecto de la succión en la estabilidad de taludes en
suelo fino.**

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

Directora

Dra. Catalina Lozada López

Bogotá, D.C., 28 de julio de 2021



La tesis de maestría titulada “**Modelación física del efecto de la succión en la estabilidad de taludes en suelo fino**”, presentada por Daniel Alejandro Carvajal Cárdenas, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

Director de la tesis

Catalina Lozada López

Jurado

Lina Ximena Garzón Ávila

Jurado

Juan Carlos Ruge

Bogotá, D.C., 28 de Julio de 2021

Dedicatoria

A mi familia que siempre me apoyo en los momentos difíciles, especialmente a mi tío William Sneyder Carvajal Rodríguez para el cual siempre fui el ingeniero y a mi hijo Juan Sebastián Carvajal que es el motor para seguir adelante y me da fortaleza para afrontar todas las dificultades que se presenten en el camino.

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a mi padre y a mi madre que siempre confiaron en mí, a mi pareja María Velosa que me apoyo y acompaño durante toda la maestría, y a mi mejor amigo y compañero Miguel Prada que estuvo conmigo desde el pregrado.

Agradezco a los laboratoristas Marco Contreras y Osmar Tolosa por haber apoyado en diversas actividades y a la Doctora Catalina Lozada por su acompañamiento, paciencia, guía y conocimientos, ya que sin su tutela no hubiera sido posible desarrollar y finalizar este trabajo

Finalmente, agradezco a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por haberme instruido y permitido ser parte de su equipo de trabajo.

Resumen

En los últimos años se han estudiado diversas formas de cuantificar la resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados, sin embargo, debido a los altos costos de la instrumentación y a su gran variabilidad en campo no ha sido posible aplicarla en los diseños geotécnicos. En consecuencia, los diseños actuales se han basado en la mecánica de suelos saturados, no obstante, en los últimos 30 años se han desarrollado ecuaciones teóricas en la cual se incorpora el aporte de la succión a la resistencia al corte del suelo.

Durante la última década, se han realizado investigaciones del efecto de la succión en diferentes aspectos geotécnicos, específicamente en la estabilidad de taludes de suelos arenosos, las más recientes han sido desarrolladas por Higo et al. (2015), Chen et al (2018), Matziaris et al. (2017) y Anbese & Juneja (2018).

Sin embargo, se han realizado pocas investigaciones para suelos finos, por lo tanto, en el presente trabajo se investigará el efecto de la succión en la estabilidad de taludes los suelos finos usando la centrifuga geotécnica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

En el presente trabajo de grado se realizó inicialmente una revisión teórica de las formulaciones existentes para evaluar la resistencia a corte para suelos parcialmente saturados, así mismo se investigaron las diferentes metodologías que existen para evaluar la succión y los parámetros de resistencia. Posteriormente, se elaboró una caracterización del material de estudio, la cual se realizó con las especificaciones del INVIAS 2013.

Una vez caracterizado el material, se efectuaron las modelaciones físicas en la centrifuga geotécnica en la cual se incorpora una nueva metodología de modelación de taludes de suelo fino para diferentes contenidos de humedad. Inicialmente se realizaron tres modelos saturados a los cuales se les evaluó los desplazamientos en la falla, posteriormente se elaboró siete modelos físicos en los cuales los contenidos de humedad utilizados en los modelos rondan valores entre 58 y 80%, donde también se evaluaron los desplazamientos que ocurrieron después del ensayo en la centrifuga geotécnica y se compararon con los modelos saturados.

Finalmente, se realizó una modelación numérica utilizando los softwares de Slide y Phase² con el fin de relacionar los resultados obtenidos físicamente con las modelaciones numéricas. Se comprobó que el cambio de humedad en los taludes de suelo disminuye drásticamente los desplazamientos en la falla, y se evidencio que la modelación numérica en términos de esfuerzos totales es la más aproximada a lo observado en la modelación física en centrifuga geotécnica.

Palabras clave: Succión, suelo parcialmente saturado, Centrifuga geotécnica, Estabilidad de taludes.

Abstract

In recent years, various ways of quantifying the shear strength of partially saturated soils have been studied; however, due to the high costs of instrumentation and its significant variability in the field, it has not been possible to apply it in geotechnical designs. Consequently, current designs have been grounded on the mechanics of saturated soils; however, in the last 30 years, theoretical equations have been developed in which the contribution of suction to the shear strength of the ground is incorporated.

During the last decade, investigations of the effect of suction on different geotechnical aspects, specifically on slope stability of sandy soils, have been carried out, most recently by Higo et al. (2015), Chen et al. (2018), Matziaris et al. (2017) and Anbese & Juneja (2018).

However, little research has been conducted for fine soils; therefore, in the present work the effect of suction on slope stability of fine soils will be investigated using the geotechnical centrifuge of the Colombian School of Engineering Julio Garavito.

In the present work, a theoretical review of the existing formulations to evaluate the shear strength of partially saturated soils was carried out, as well as an investigation of the different methodologies that exist to assess the suction and strength parameters. Subsequently, a characterization of the study material was carried out, which was performed according to the INVIAS 2013 specifications.

Once the material has been characterized, physical modeling is carried out in the geotechnical centrifuge, which incorporates a new methodology for modeling fine soil slopes for different moisture contents. Initially, three saturated models were made to which the displacements in the failure were evaluated. Subsequently, seven physical models were elaborated in which the moisture contents used in the models ranged between 58 and 80%, where the displacements that occurred after the test in the geotechnical centrifuge were evaluated and compared with the saturated models.

Finally, numerical modeling was carried out using Slide and Phase2 software to relate the physically obtained results to the numerical modeling. It was found that the change of moisture in the soil slopes drastically decreases the displacements in the failure, and it was evidenced that the numerical modeling in terms of total stresses is the closest to that observed in the physical modeling in a geotechnical centrifuge.

Keywords: Suction, partially saturated soil, geotechnical centrifuge, slope stability

Tabla de Contenido

Resumen	6
Abstract	7
1 Introducción	14
2 Problema de investigación:	14
2.1 Planteamiento del problema	14
2.2 Objetivos:	15
2.2.1 Objetivo general:	15
2.2.2 Objetivos específicos:	16
3 Marco teórico:	16
3.1 Resistencia al corte en suelos saturados	16
3.2 Teoría de succión total.	17
3.2.1 Succión matricial.....	18
3.2.2 Succión osmótica.....	20
3.3 Curva de retención de humedad para suelos parcialmente saturados.....	20
3.3.1 Medición de la succión usando centrifugas pequeñas	22
3.3.2 Ajuste de la SWRC	23
3.3.3 Modelo de Van Genuchten.....	24
3.4 Resistencia al corte en suelos parcialmente saturados.	25
3.5 Modelación física en centrifuga Geotécnica	30
3.5.1 Principio de funcionamiento	30
3.5.2 Leyes de escala para suelos parcialmente saturados	31
3.6 Modelación física del efecto de la succión en la estabilidad de taludes.....	33
3.6.1 Estudio de taludes en suelos Arenosos.....	33
3.6.2 Estudios de taludes en suelos finos	36
4 Metodología	37
4.1.1 Etapa 1: Caracterización del suelo:	37
4.1.2 Etapa 2: Modelación numérica de la pendiente del talud.....	38
4.1.3 Etapa 3: Fabricación de modelos físicos.	38
4.1.4 Etapa 4: Análisis de Imagen.....	40
4.1.5 Etapa 5: Validación de resultados	40
5 Resultados y análisis.	40
5.1 Caracterización del suelo saturado.	40
5.1.1 Límites de Atterberg y Gravedad específica.	40
5.1.2 Hidrometría	41
5.1.3 Consolidación.....	42
5.1.4 Ensayo de compresión simple y triaxial CU	43

5.2	Caracterización del suelo parcialmente saturado	46
5.2.1	Curva de retención de humedad (SWRC)	46
5.2.2	Ensayo de compresión simple en muestras con niveles de succión	48
5.3	Modelación numérica con parámetros saturados	50
5.4	Modelación física en centrifuga Geotécnica	53
5.4.1	Modelación física del talud saturado.....	53
5.4.2	Modelación física en taludes a diferentes niveles de succión.	56
5.5	Análisis de Imagen	65
5.6	Modelación numérica	72
5.6.1	Modelación en Slide 6.0.....	73
5.6.2	Modelación en Phase ²	74
5.7	Análisis de las modelaciones numéricas y físicas	78
6	Conclusiones	82
7	Recomendaciones	83
8	Bibliografía	84
	ANEXOS.....	87

Índice de tablas

Tabla 1. Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición (Meza, 2012)	22
Tabla 2 Leyes de escala usados para establecer la relación existente entre el modelo y el prototipo (Garnier & Gaudin, 2007)	31
Tabla 3. Propiedades del suelo arenoso (Yu et al., 2008).	34
Tabla 4 Resumen de las características de los taludes de arena (Yu et al., 2008).	34
Tabla 5 Propiedades de los suelos compactados (Ling et al., 2009)	35
Tabla 6 Propiedades físicas del suelo expansivo (T. lin Chen et al., 2018)	37
Tabla 7. Descripción de modelos físicos.	39
Tabla 8. Resultados obtenidos en la determinación de los límites de Atterberg	41
Tabla 9. Valores obtenidos de la Curva Granulométrica.	42
Tabla 10. Resultados de las pruebas de compresión simple o inconfinaada.	45
Tabla 11. Resultados de los triaxiales CU.	45
Tabla 12. Resultados de los ensayos de papel filtro.	47
Tabla 13. Valores de entrada para el ajuste de Van Genuchten.	47
Tabla 14. Valores obtenidos del programa RECT	47
Tabla 15. Parámetros ajustados para la construcción de la curva de retención de agua.	48
Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de compresión simple en muestras secadas.	49
Tabla 17. Parámetros de resistencia al corte del suelo de estudio parcialmente saturado.	50
Tabla 18. Parámetros de entrada y variables estudiadas en la primera ronda de modelaciones en SLIDE.	51
Tabla 19. Dimensiones y factores de seguridad obtenidos en la primera ronda de modelaciones.	51
Tabla 20. Parámetros de entrada y variables estudiadas en la segunda ronda de modelaciones en SLIDE.	52
Tabla 21. Dimensiones y factores de seguridad obtenidos en la segunda ronda de modelaciones.	52
Tabla 22 . Descripción de modelos físicos en taludes saturados.	54
Tabla 23. Descripción de los Taludes modelados.	57
Tabla 24. Diferencia del contenido de agua y aporte de succión matricial obtenida de los modelos físicos.	63
Tabla 25. Desplazamientos máximos generados alrededor del talud después del vuelo en la centrifuga geotécnica (En escala Prototipo).	72
Tabla 26. Factores de seguridad mínimos obtenidos en SLIDE de taludes con diferentes niveles de succión.	73
Tabla 27. Parámetros introducidos en el programa Phase ²	75
Tabla 28. Resultados obtenidos en las modelaciones numéricas en Phase ² en termino de esfuerzos totales.	75
Tabla 29. Resultados obtenidos en las modelaciones numéricas tipo 2 en Phase ² en termino de esfuerzos efectivos.	76

Índice de figuras

Figura 3.1 Perfil típico de presiones de agua; ciclos de humedecimiento – secado (Fredlund & Rahardjo, 1993).....	16
Figura 3.2. Perfil de agua subterráneo.....	18
Figura 3.3. a.)Tensión superficial y succión dentro de la matriz del suelo (Azizi, 2000) b.)Presiones y tensiones superficiales actuando en una superficie curva de dos dimensiones ...	19
Figura 3.4 Curva de retención de humedad en proceso de secado y mojado (Histéresis)(Alsherif et al., 2015).....	20
Figura 3.5 Fases o zonas de desaturación hasta llegar a un suelo parcialmente saturado.(Vanapalli et al., 1996).....	21
Figura 3.6. Principio de operación de las piedras porosas con alto valor de entrada de aire (Ning Lu & Likos, 2007).....	21
Figura 3.7.Principio del método para medir la succión en el suelo(Khazode et al., 2002)	23
Figura 3.8 Curva de retención de humedad que muestra la localización aproximada de contenido de agua residual θ_r , contenido de agua saturado θ_s y el valor de entrada de aire ψ_b (Ning Lu & Likos, 2007)	24
Figura 3.9.Sistema multifacético planteado por Fredlund (Fredlund & Rahardjo, 1993).....	25
Figura 3.10. Extensión de la envolvente de Mohr Coulomb para suelos no saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).....	27
Figura 3.11 Esfuerzo inercial en un modelo en centrifuga induciendo rotación sobre un eje fijo (Taylor, 2013)	30
Figura 3.12 Configuración y dispositivos para el experimento (Rezzoug et al., 2004)	32
Figura 3.13 Evolución de la altura capilar a diferentes gravedades con respecto a la ecuación teórica de Jurin (Crancon et al., 2000)	33
Figura 3.14 Curva granulométrica de la arena de Beijing (Yu et al., 2008).	34
Figura 3.15 a) Preparación de los taludes (a) Fotografía justo después de completar la compactación (b) Talud modelado para los ensayos (Higo et al., 2015)	36
Figura 4.1 Metodología que se realizara	37
Figura 5.1. Clasificación del suelo (Carta de plasticidad).....	41
Figura 5.2. Curva granulométrica del suelo.	41
Figura 5.3. Fotografía de la reconstitución del suelo en los consolidómetros electrónicos.	42
Figura 5.4. Curva de consolidación para un esfuerzo igual a 30 kPa.....	43
Figura 5.5. Fotografías del proceso de montaje; a) Proceso de corte; b) Montaje de muestra para el ensayo triaxial CU; c) Superficie de falla obtenida.....	43
Figura 5.6. Graficas de deformación unitaria (ϵ) en función del esfuerzo vertical aplicado (σ_v) obtenido de los ensayos de compresión inconfiada.....	44
Figura 5.7. Graficas de deformación unitaria (ϵ) en función del esfuerzo vertical aplicado (σ_v) obtenido de los ensayos triaxial consolidado no drenado (CU).	44
Figura 5.8. Graficas de esfuerzo vertical en función de la resistencia al corte del suelo.	45
Figura 5.9 Variación de la resistencia a corte no drenado (C_u) obtenidos de los ensayos triaxiales CU en función del esfuerzo de confinamiento.	46
Figura 5.10. Variación de la resistencia al corte no drenado obtenido de los ensayos de compresión inconfiada en función del esfuerzo de confinamiento.....	46
Figura 5.11. Curva de retención de humedad para el suelo de estudio.	48
Figura 5.12. Proceso de conformación de muestras cilíndricas de suelo; a) Reconstitución de las muestras de suelo; b) proceso de corte y tallaje de muestras; c) Ensayo de compresión inconfiada.	49
Figura 5.13 Grafica de la resistencia al corte no drenado en función de la succión matricial. ...	49
Figura 5.14. Grafica de la resistencia al corte en función de la succión matricial.	50
Figura 5.15. Esquema de dimensionamiento de los taludes modelados.....	51

Figura 5.16. Modelación de un talud con ángulo de inclinación igual a 60° y con dimensiones escaladas a 100 gravedades.	53
Figura 5.17. Proceso de formación del talud de suelo de prueba; a) Corte de material para la formación del talud; b) Trazado de la cuadrícula en la pared del talud; c) Ensamble de la caja con el talud y la cuadrícula.	53
Figura 5.18. Fotografías de la modelación en centrifuga geotécnica-Talud saturado No.1; a) Fotografía antes del vuelo; b) fotografía después del vuelo.	54
Figura 5.19. Fotografías del talud MV-5 con una humedad promedio igual a 79%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	55
Figura 5.20. Fotografías del talud MV-6 con una humedad promedio igual a 77.6%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	55
Figura 5.21. Condiciones ambientales en el laboratorio de Suelos y Pavimentos durante el secado del modelo T1.	56
Figura 5.22. a) Fotografía del montaje de muestras para controlar el nivel del agua; b) Acondicionamiento de las muestras.	56
Figura 5.23. Fotografías del modelo T5 con una humedad promedio igual a 73.38%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	58
Figura 5.24. Fotografías del modelo T 7 con una humedad promedio igual a 71.95%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	59
Figura 5.25. Fotografías del modelo T2 con una humedad promedio igual a 71.37%; a-c-d) Después del vuelo; b) Antes del vuelo.	59
Figura 5.26 Fotografías del modelo T 3 con una humedad promedio igual a 70.89%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	60
Figura 5.27. Fotografías del modelo T6 con una humedad promedio igual a 65.7%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	61
Figura 5.28. Fotografías del modelo T4 con una humedad promedio igual a 62.5%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	61
Figura 5.29. Fotografías del modelo T1 con una humedad promedio igual a 59.8%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.	62
Figura 5.30. Esquema de toma de muestras en los modelos físicos.	62
Figura 5.31. Perfiles de Humedad en los modelos en escala prototipo; a) Perfil de Humedad Modelo T1; b) Perfil de Humedad Modelo T2; c) Perfil de Humedad Modelo T3; d) Perfil de Humedad Modelo T4; e) Perfil de Humedad Modelo T5; f) Perfil de Humedad Modelo T6; g) a) Perfil de Humedad Modelo T7; h) Leyenda de graficas.	64
Figura 5.32. Procesamiento de las fotografías del modelo MV5(Humedad 79%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamientos en Y; d) Desplazamientos Totales.	66
Figura 5.33. Procesamiento de las fotografías del modelo MV6 (Humedad 77%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	66
Figura 5.34. Procesamiento de las fotografías del modelo T5 (Humedad 73.38%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	67
Figura 5.35. Procesamiento de las fotografías del modelo T7 (Humedad 71.9%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	67
Figura 5.36. Procesamiento de las fotografías del modelo T2 (Humedad 71.8%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	68

Figura 5.37. Procesamiento de las fotografías del modelo T3 (Humedad 70.9%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	69
Figura 5.38. Procesamiento de las fotografías del modelo T6; a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	70
Figura 5.39. Procesamiento de las fotografías del modelo T4; a) Vectores de desplazamientos; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.	70
Figura 5.40. Procesamiento de las fotografías del Modelo T1; a) Vectores de desplazamientos; b) Desplazamientos en X (mm); c) Desplazamiento en Y (mm); d) Desplazamiento Totales(mm).	71
Figura 5.41. Desplazamientos máximos obtenidos de los modelos físicos en escala prototipo.	72
Figura 5.42. Factores de seguridad en función de la succión matricial. Software Slide.	74
Figura 5.43 Modulo de elasticidad en función del contenido de Humedad.	75
Figura 5.44. Desplazamientos máximos horizontales obtenidos en la modelación en Phase ² y en las modelaciones físicas en escala prototipo	76
Figura 5.45. Desplazamientos máximos verticales obtenidos en la modelación en Phase ² y en las modelaciones físicas en escala prototipo.	77
Figura 5.46. Desplazamientos máximos totales obtenidos en la modelación en Phase ² y en las modelaciones físicas en escala prototipo.	77
Figura 5.47. Análisis cualitativo de modelo MV6; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	78
Figura 5.48. Análisis cualitativo de modelo T5; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	79
Figura 5.49. Análisis cualitativo de modelo T7; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	79
Figura 5.50. Análisis cualitativo de modelo T2; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	80
Figura 5.51. Análisis cualitativo de modelo T3; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	80
Figura 5.52. Análisis cualitativo de modelo T6; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	81
Figura 5.53. Análisis cualitativo de modelo T4; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	81
Figura 5.54. Análisis cualitativo de modelo T1; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase ² ; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase ² .	82

1 Introducción

La estabilidad de un talud se evalúa utilizando factores de seguridad mínimos obtenidos de un análisis matemático. Este análisis se realiza usando los métodos de equilibrio límite que requiere de parámetros de resistencia al corte del suelo, los cuales pueden estar expresados en términos de esfuerzos totales o efectivos.

Todas las metodologías de equilibrio límite han sido desarrolladas a partir de la mecánica de suelos saturados, sin embargo, en muchas ocasiones los suelos en campo se encuentran parcialmente saturados, ya sea por la posición del nivel freático o por las condiciones ambientales como temperatura, humedad, precipitación y velocidad del viento que alteran el grado de saturación del suelo.

Por tal motivo, en los últimos años se ha investigado la contribución que generan las presiones de poros negativas (Succión) en la resistencia al corte y el efecto que ocasionan en la estabilidad de los taludes. De los primeros análisis que se realizaron sobre el tema, Frenlund et al (1989) analizaron la importancia de las presiones negativas que se generaron en las laderas de un terraplén construido con limo lacustre de Columbia Británica Central, las cuales comenzaron a fallar a medida que se iban disipando las presiones de poros negativas.

Posteriormente con el avance de la tecnología, se implementó el uso de las máquinas centrífugas en las investigaciones de suelos parcialmente saturados, en las cuales se desarrolló diferentes leyes de escala que permitieran extrapolar las mediciones en el modelo hacia el prototipo, una de ellas ha sido la altura capilar (h_c) la cual puede ser medida fácilmente en la centrífuga y que fue comprobada por Rezzoug et al (2004) en arenas de Congleton por medio de ensayos en centrífuga.

Luego autores como Lu y Godt (2008), Vahedifard et al (2016), Anbese & Juneja (2018), Chen et al (2018) y otros, han ahondado en investigaciones relacionadas con la estabilidad de laderas usando centrifugas geotécnicas en el que el aporte de la succión desempeña un papel importante. Sin embargo, la mayoría de las metodologías que se desarrollaron en estas investigaciones se han enfocado en taludes conformados por suelos arenosos. Adicionalmente, debido a la alta complejidad de la modelación e instrumentación a nivel nacional pocos han realizado estudios de este efecto. Por lo tanto, en este trabajo se quiere estudiar el efecto de la succión en la estabilidad de taludes de suelos finos por medio de modelaciones en centrífuga geotécnica.

2 Problema de investigación:

2.1 Planteamiento del problema

Según la NSR-10 la estabilidad de un talud natural o artificial se evalúa utilizando factores de seguridad mínimos que indican que tan próximos se encuentran los esfuerzos actuantes en el talud al esfuerzo máximo que resiste. El cálculo de esos esfuerzos actuantes y resistentes son basados en principios de la mecánica de suelos básica, es decir, en conceptos de equilibrio de fuerzas y de momentos, que dependen de las propiedades y parámetros de resistencia (γ , C' , ϕ') del suelo o roca con el cual está formado el talud.

En este análisis se tiene en cuenta el efecto del agua cuando reduce la estabilidad del talud, es decir, cuando se generan condiciones de flujo debido a las presiones del agua, sin embargo, no se tiene en cuenta la contribución en la resistencia al corte de las presiones de agua negativas (succión) por encima del nivel freático, que por lo general se ignoran y son consideradas iguales a cero, esto conlleva a que la resistencia del suelo se subestime.

Frendlund (1978) propone una fórmula de resistencia al corte para suelos no saturados, en la cual la resistencia se ve afectada por dos variables de estado de esfuerzos independientes, posteriormente Frendlund et al (1989) analizan la importancia de las presiones negativas que se generan en las laderas de un terraplén construido con limo lacustre de Columbia Británica Central, las cuales comenzaban a fallar a medida que se iban disipando dichas presiones. Estudios más actuales como los de Lu y Godt (2008) analizaron la estabilidad de taludes infinitos en suelos arenosos y limosos en condiciones no saturadas en que la superficie de deslizamiento se encontraba por encima del nivel freático. Ellos encontraron que la contribución de los esfuerzos de succión por encima del nivel freático alcanzaba un mínimo de 8 kPa para los suelos arenosos y 24 kPa para suelos limosos.

Posteriormente Vahedifard et al (2016) analizaron el efecto de la succión en estructuras de suelos reforzadas con geosintéticos y en años posteriores otros autores incorporaron en sus estudios el uso de máquinas centrifugas (Anbese & Juneja, 2018) en donde tenían en cuenta las leyes de escala para condición no saturada en centrifuga las cuales fueron estudiadas y comprobadas por Esposito (2000), Knight et al. (2000) y Rezzoug et al (2004).

A pesar de la variedad de estudios realizados no se ha implementado el efecto de la succión en los diseños de estabilidad de taludes, debido a que este efecto está relacionado con las condiciones climáticas y ambientales que afectan el grado de saturación del suelo. A nivel nacional, pocos investigadores han realizado estudios que validen estas teorías dada la complejidad de modelación e instrumentación necesaria para estudiar este efecto, por lo cual el objetivo de este trabajo se basa en estudiar el efecto de la succión en taludes haciendo uso de la maquina centrifuga de la Escuela Colombiana de Ingeniería.



2.2 Objetivos:

2.2.1 Objetivo general:

- Determinar a través de modelos físicos en maquina centrifuga geotécnica la influencia de la succión en la estabilidad de un talud en suelo fino.

2.2.2 Objetivos específicos:

- Diseñar un proceso de modelación a escala reducida que genere las condiciones necesarias para estudiar el efecto de la succión en taludes de suelo fino en centrífuga geotécnica.
- Estudiar a través de un análisis de imágenes el efecto de la variación del contenido de humedad y de la succión en la estabilidad de taludes en suelos finos.
- Comparar los resultados experimentales con modelos numéricos en el software de equilibrio limite Slide y el software de elementos finitos phase2.

3 Marco teórico:

La interacción del clima con el suelo influencia el grado de saturación del suelo, el agua es removida ya sea por evaporación en la superficie o por evapotranspiración de la capa vegetal, pero a la vez se infiltra debido a lluvias o a otras diferentes formas de precipitación, estos procesos producen un flujo ascendente y descendente del agua en el suelo. Debido al constante cambio del contenido del agua se producen cambios en la distribución de presiones de poros con respecto a la profundidad, estos cambios se pueden observar en la siguiente figura.

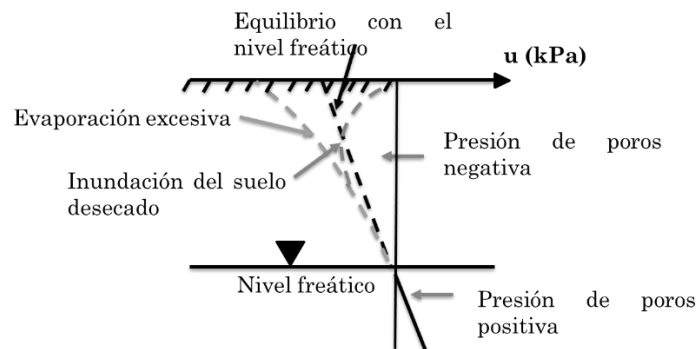


Figura 3.1 Perfil típico de presiones de agua; ciclos de humedecimiento – secado (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Estos cambios de la distribución de presiones de poros generan incrementos en la capacidad portante y en la resistencia al corte de los suelos, que no se toman en cuenta en la mecánica de suelos básica. Al margen de estos incrementos, la capa vegetal contribuye de la misma manera a la estabilidad de los suelos, especialmente en terrenos inclinados, dicha contribución a la estabilidad ocurre de dos maneras, mecánica e hidrológicamente (Eab et al., 2015), la contribución mecánica se genera por la geometría y distribución espacial de las raíces, mientras que la contribución hidrológica se genera por la succión que genera las raíces al transpirar agua.

3.1 Resistencia al corte en suelos saturados

El concepto de resistencia al corte se empieza a tratar a partir de una ecuación empírica, dada por Coulomb en 1776, posteriormente con estudios realizados por Mohr en 1900 se desarrolla la teoría de resistencia al corte de Mohr – Coulomb que es hasta el presente el método más usado para describir la resistencia al corte. Esta teoría establece que la falla en una masa de suelo se presenta no en el plano de mayor esfuerzo, si no en el plano en que la combinación de esfuerzos cortante τ y efectivo σ' es crítica.

$$\tau = C' + \sigma' \tan(\phi') \quad [1]$$

Donde:

σ' : Esfuerzo efectivo

C' : Cohesión efectiva entre las partículas de suelo:

ϕ' : Angulo de fricción del suelo

τ : Resistencia al corte

Dicha teoría no estaba establecida en términos de esfuerzos efectivos, si no en esfuerzos totales, hasta que en 1945 Karl Von Terzaghi propuso el principio de esfuerzos efectivos (Terzaghi, 1945), en el cual se establece que el comportamiento del suelo, especialmente la compresibilidad y la resistencia son controlados por el esqueleto mineral formado por las partículas del suelo, es decir, por el esfuerzo efectivo que es igual a:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad [2]$$

Donde:

σ : Esfuerzo total impuesto en las partículas del suelo y el agua de poros.

u_w : Presión de agua de poros causado por la carga aplicada.

La resistencia al corte se puede representar en el círculo de Mohr, en el cual se dibujan todas las posibles combinaciones de esfuerzos que se pueden presentar en el suelo. La ecuación [1] en el espacio $\sigma - \tau$ es representada como una envolvente de falla.

3.2 Teoría de succión total.

El comportamiento de suelos no saturados es más complejo que el de suelos saturados, dado que las variables que no se tienen en cuenta en la mecánica de suelos básica son cruciales para el comportamiento de los suelos parcialmente saturados, como lo es la interacción del aire con el agua y el suelo. Uno de los efectos que se genera en esa interacción es la succión, la cual está definida como el estado de energía libre del agua en el suelo y se puede medir en términos de la presión parcial del agua del suelo. La relación termodinámica existente entre la succión total en el suelo y la presión parcial de vapor de agua en el suelo se describe de la siguiente manera:

$$\psi = - \frac{RT}{v_{w0}\omega_v} * \ln \left(\frac{\bar{v}_w}{\bar{v}_{v0}} \right) \quad [3]$$

Donde:

Ψ : Succión total

R: Constante universal de gases [8.31432 J/ (Mol K)]

T : Temperatura absoluta [T=(273.26+t°) (K)]

v_{w0} : Volumen específico del agua o el inverso de la densidad del agua [m³/kg]

ω_v : Masa molecular del vapor de agua [18.106 kg/kmol]

\bar{v}_w : Presión parcial de vapor de agua [kPa]

\bar{v}_{v0} : Presión de saturación del vapor de agua sobre una superficie plana de agua pura a la misma temperatura [kPa].

El termino de \bar{v}_w/\bar{v}_{v0} es conocido como humedad relativa del aire en el suelo RH (%), una humedad relativa es igual al 100% indica que el suelo no presenta succión y valores menores indican que hay presencia de succión en el suelo. Desde el punto de vista de la termodinámica la succión total está compuesta de dos componentes, la succión matricial y la succión osmótica (D. Fredlund & Rahardjo, 1987).

3.2.1 Succión matricial

La componente de succión matricial se ha asociado al fenómeno de capilaridad, tensión superficial o fuerza intermolecular actuante en las moléculas de agua en las paredes contráctiles, y esta se expresa por la siguiente ecuación:

$$\psi_m = (u_a - u_w) \quad [4]$$

Donde:

u_a : Presión de poros del aire en el suelo.

u_w : Presión de poros del agua en el suelo

Esta succión se debe la curvatura del menisco (que es inversamente proporcional a la diferencia de presiones de aire y de agua), debido a la tensión superficial esta curvatura contribuye a la reducción de la humedad relativa (Fredlund & Rahardjo, 1993). Por encima del nivel freático es donde se presenta la succión, dicha zona se caracteriza por tener una zona capilar, una zona vadosa y una zona seca (Figura 3.2), tanto como en la zona capilar como en la vadosa se presentan presiones negativas las cuales se denominan succión.



Figura 3.2. Perfil de agua subterráneo.

La presencia del agua en estas zonas se debe principalmente al efecto capilar, el cual se presenta por las tensiones superficiales ocasionadas por la interfaz agua-aire o paredes contráctiles. Los vacíos entre las partículas sólidas se interconectan unos a otros formando complejas redes de canales por los cuales el agua asciende debido a la tensión superficial que se genera (Figura 3.3 – a.). La tensión superficial es una propiedad de la pared contráctil que permite el equilibrio de fuerzas a lo largo de la misma, esta actúa como una membrana elástica (Fredlund & Rahardjo, 1993) a la cual está sujeta a diferentes presiones de cada lado. Debido a estas presiones la membrana sume una forma cóncava y se genera una tensión para poder estar en equilibrio (Figura 3.3 – b)

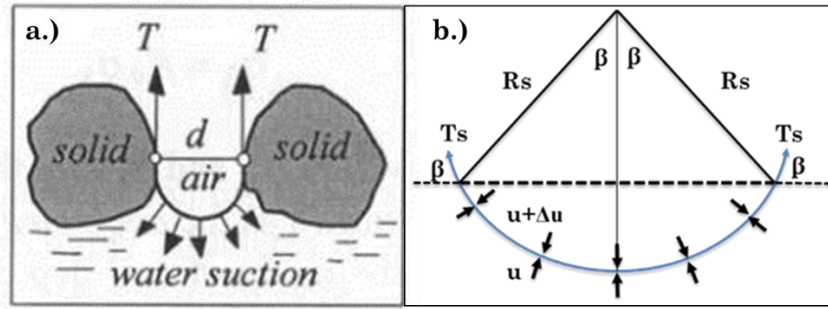


Figura 3.3. a.) Tensión superficial y succión dentro de la matriz del suelo (Azizi, 2000) b.) Presiones y tensiones superficiales actuando en una superficie curva de dos dimensiones

Al realizar equilibrio a lo largo de la membrana se obtiene que:

$$2 T_s \text{Sen}(\beta) + 2 R_s * \text{Sen}(\beta) * \Delta u = 0 \quad [5]$$

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad [6]$$

Donde:

T_s : Es la tensión superficial en la pared contráctil

R_s : Radio de curvatura de la membrana

Al considerar una membrana tridimensional la cual presenta dos radios iguales ($R_1 = R_2 = R_s$) la expresión anterior queda de la siguiente forma:

$$\Delta u = T_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad [7]$$

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad [8]$$

En los suelos parcialmente saturados la pared contráctil está sometida a la presión del aire la cual es mayor a la del agua, esta diferencia de presiones (succión) es la que genera la curvatura de la membrana, la siguiente expresión indica que a medida que el radio de curvatura aumenta la succión matricial disminuye.

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{R_s} \quad [9]$$

Como se mencionó anteriormente, esta tensión superficial provoca que se genere una elevación de agua o altura capilar en el suelo si asumimos el sistema mostrado en Figura 3.3 – a. Al realizar un equilibrio de fuerzas, donde el canal formado por los vacíos de las partículas tiene un diámetro d , se llega a la siguiente expresión (Azizi, 2000):

$$\pi * d * T - \Delta u * \pi * \frac{d^2}{4} = 0 \quad [10]$$

Donde $\Delta u = h_c * \gamma_w$ y al despejar la altura capilar h_c

$$h_c = \frac{4*T}{d*\gamma_w} \quad [11]$$

De la ecuación [11] se puede concluir que la altura capilar es inversamente proporcional al diámetro de los canales formados por los vacíos de las partículas, por otro lado, se asume que la diferencia de presión que se presenta en la pared contráctil debida a la presencia del aire y agua es igual a la presión que se genera por la altura capilar, por lo tanto:

$$\Delta u = h_c * \gamma_w = (u_a - u_w) \quad [12]$$

Por esta razón, la succión matricial está asociada al efecto de capilaridad del suelo.

3.2.2 Succión osmótica

La succión osmótica (π) está relacionada con el contenido de sales disueltas en el agua presente en el suelo, en el caso donde el contenido de sales es alterado, el efecto de la succión osmótica cambia el comportamiento del suelo (Fredlund & Rahardjo, 1993). Por lo tanto, la succión total se puede expresar:

$$\psi = \psi_m + \pi \quad [13]$$

3.3 Curva de retención de humedad para suelos parcialmente saturados.

La curva de retención de agua es una representación gráfica que indica el contenido de agua a medida que se van generando succión en el suelo. La curva de retención de agua es la base de la física del suelo moderna, la hidrología y la mecánica de suelos. Esta curva define las condiciones de equilibrio energético entre el contenido de agua (representado en términos de humedad gravimétrica, humedad volumétrica y el grado de saturación) y su potencial de energía en el agua (en términos de succión, presión del agua o succión matricial) (Alsherif et al., 2015).

Varios autores (Likos & Lu, 2004) (P. Chen et al., 2019) han estudiado la curva de retención de humedad debido a que esta varía dependiendo su historia de humedad del suelo (Rattan Lal, 2004), esto implica que la curva cambia dependiendo el proceso de secado y mojado como se muestra en la Figura 3.4.

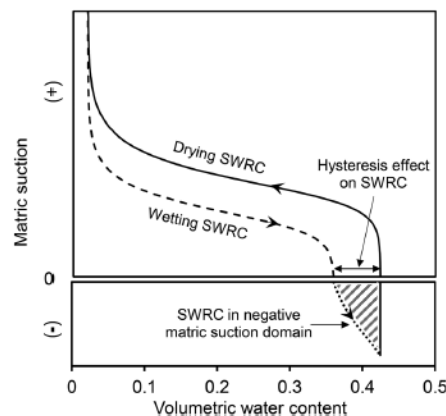


Figura 3.4 Curva de retención de humedad en proceso de secado y mojado (Histéresis)(Alsherif et al., 2015)

De igual manera la curva se rige por dos propiedades del suelo: La distribución de tamaño de los poros y las propiedades de la superficie interfacial (Alsherif et al., 2015).

La curva de retención de humedad presenta cuatro etapas como se observa en la Figura 3.5 (Vanapalli et al., 1996), en la primera fase el suelo esta esencialmente saturado, pero luego pasa a unas zonas de transición (fase 2 y 3) en las cuales el contenido de agua se reduce significativamente hasta llegar a una zona residual donde el menisco del agua es pequeño y genera grandes succiones, a medida que en el suelo va aumentando la cantidad de aire va generando mayores succiones en el suelo.

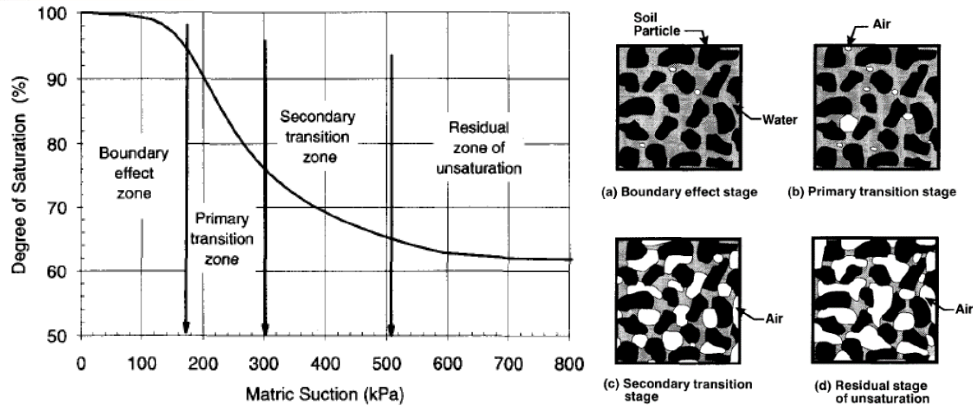


Figura 3.5 Fases o zonas de desaturación hasta llegar a un suelo parcialmente saturado. (Vanapalli et al., 1996)

Existen diferentes técnicas para medir la succión, las cuales se dividen en dos grandes grupos, las directas e indirectas. En la técnica de medición directa, la medida se toma in-situ o en el laboratorio, mientras que en las indirectas se toman características del suelo que se pueden relacionar con la succión.

Dentro de los métodos directos los más utilizados para medir la succión matricial son los tensiómetros y la técnica de translación de ejes, ambos métodos usan discos o piedras porosas con alto contenido de entrada de aire (HIGH-AIR-ENTRY), las piedras porosas cuando son saturados desarrollan una membrana debido a la tensión superficial, lo que permite que exista una diferencia de presión entre la fase agua y aire (Figura 3.6). Dicha membrana que separa las dos fases (aire – agua) permite medir directamente la presión negativa con el tensiómetro (Meza, 2012). El rango de medición de este instrumento es máximo 100 kPa pero en la actualidad se han desarrollado tensiómetros de alta capacidad que alcanzan mediciones de 15000 kPa. (Ridley & Burland, 1995)

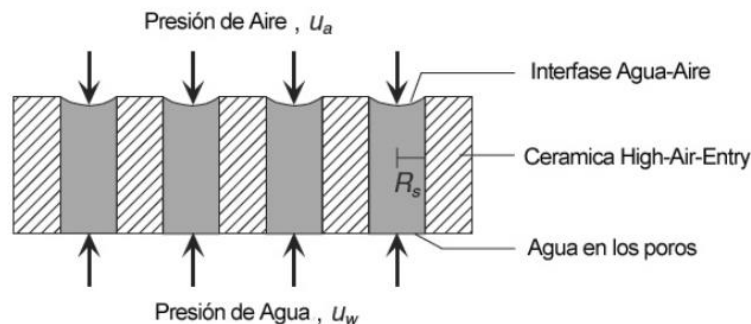


Figura 3.6. Principio de operación de las piedras porosas con alto valor de entrada de aire (Ning Lu & Likos, 2007)

Los equipos que utilizan la técnica de translación de ejes son los conocidos como placa de presión, estos permiten medición de succión de hasta 1500 kPa, que es el máximo valor de entrada de aire de las piedras porosas existen.

Dentro de los métodos indirectos utilizados para medir la succión matricial del suelo, está el método del papel filtro y el sensor de conductividad térmica o eléctrica. El método de papel filtro consiste en colocar el papel en contacto con el suelo, permitiendo que se genere una transferencia de humedad del suelo hacia el papel filtro, esta es controlada por la ascensión capilar y por las fuerzas de adsorción superficial de las partículas, por lo tanto la succión medida corresponde a la componente matricial de la succión (Meza, 2012). El papel filtro tienen un rango de medición de 0 a 150000 KPa, mientras que los de conductividad térmica miden de 10 a 15000 kPa, la siguiente tabla muestra un resumen de los rangos y otros métodos para determinar la succión en el suelo.

Tabla 1. Rango aproximado de medición de succión para varias técnicas de medición (Meza, 2012)

Componente de succión de medida	Técnica/ sensor	Rango de succión medido en kPa	Ensayo de campo o laboratorio
Succión matricial	Tensiómetros	0-100	Campo y laboratorio
	Técnicas de traslación de ejes	0-1500	Laboratorio
	Sensores de conductividad eléctrica y térmica	0-400	Campo y laboratorio
	Papel filtro (contacto)	Rango completo	Campo y laboratorio
Succión total	Psicrómetros termopares	100-8000	Campo y laboratorio
	Técnica de espejo enfriado	1000-450000	Laboratorio
	Papel filtro (sin contacto)	1000-500000	Campo y laboratorio

Existen diferentes métodos para calcular indirectamente la curva de retención de humedad, entre estos se encuentra la estimación de la curva por medio de la distribución del tamaño de los granos, esta consiste en generar una serie de incrementos de tamaños de partículas iniciando desde la más pequeña hasta llegar a la más grande para construir una curva característica general. Se transponen esos incrementos de tamaño de partículas uniformes para obtener la curva de retención de humedad del tamaño medio de las partículas, una vez analizada la curva de distribución de grano en forma incremental, se superponen las curvas de retención de humedad individuales para obtener la curva de retención total del suelo (M. D. Fredlund et al., 1997).

3.3.1 Medición de la succión usando centrifugas pequeñas

Otro método rápido de medir la curva de retención de humedad es utilizando solo pruebas en centrifugas pequeñas (Khanzode et al., 2002) combinándola con el método de punto de rocío (Rahardjo et al., 2019). El método de determinación de la succión en centrifuga consiste en colocar una columna de suelo con una humedad establecida sobre una cerámica saturada y porosa, la cual descansa en un depósito de agua que está expuesta a presión atmosférica. El perfil del contenido de agua en el suelo después de alcanzar el equilibrio en vuelo es similar al del agua cuando drena en condición in situ a un nivel freático, donde la gravedad aumenta varias veces. La Figura 3.7 muestra el principio del método para la medición de succión con centrifuga utilizando la ecuación [14] propuesta por Gardner (1937).

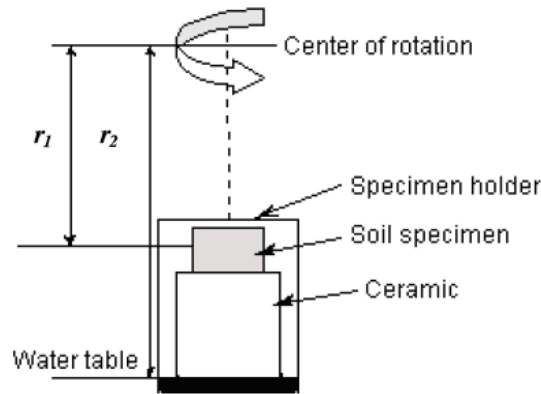


Figura 3.7. Principio del método para medir la succión en el suelo (Khanzode et al., 2002)

$$\Psi = \frac{\rho * w^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2) \quad [14]$$

Donde:

Ψ : Succión en el suelo

r_1 : Distancia radial hasta el punto medio del espécimen

r_2 : Distancia radial hasta la superficie libre de agua

w : Velocidad angular

ρ : Densidad del fluido

g : Aceleración debido a la gravedad

Se ha demostrado que la curva de retención de humedad obtenida por este método es razonablemente buena en comparación con resultados experimentales obtenidos con la placa de presión, adicionalmente la curva obtenida por este método se obtiene en un periodo de tiempo considerablemente menor que utilizando métodos convencionales.

3.3.2 Ajuste de la SWRC

Se han propuesto numerosos enfoques para la representación matemática de la curva de retención de humedad (SWCC), es decir, ecuaciones que permiten realizar ajustes para poder predecir la SWCC. Sin embargo, para representar matemáticamente la curva se necesita conocer unos puntos fijos de contenido de agua y de succión en condiciones específicas, como por ejemplo la humedad de saturación, la humedad o saturación residual y el valor de entrada de aire, adicionalmente se necesitan uno o más constantes de ajuste empíricas o semi - empíricas que se seleccionan para capturar la forma general de la SWCC (Ning Lu & Likos, 2007).

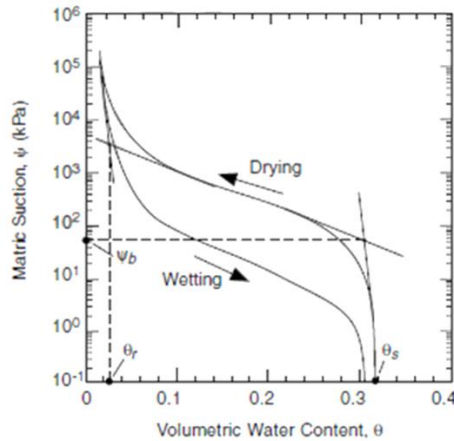


Figura 3.8 Curva de retención de humedad que muestra la localización aproximada de contenido de agua residual θ_r , contenido de agua saturado θ_s y el valor de entrada de aire ψ_b (Ning Lu & Likos, 2007)

Como se muestra en la Figura 3.8, el punto de la humedad de saturación θ_s define el punto donde todos los vacíos en el suelo son llenados con agua, es decir que está saturado, usualmente corresponde al punto de desorción de la curva. El valor de entrada de aire ψ_b , es la presión de succión que describe el punto donde el aire comienza a entrar a los poros más grandes del suelo y la desaturación comienza. La humedad residual θ_r , es el contenido de agua al cual el agua de los poros reside principalmente como meniscos pequeños y aislados que requieren cambios extremadamente grandes en la succión para eliminar el agua adicional del sistema. La forma de cuantificar la presión de entrada y el contenido de agua residual es construir un par de líneas tangentes a partir de los puntos de inflexión en la SWCC.

Para efectos de modelación se representa el contenido de humedad del suelo en una variable adimensional de contenido de agua, la cual se puede definir normalizando el contenido volumétrico de agua con sus valores saturados y residuales

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [15]$$

3.3.3 Modelo de Van Genuchten

Van Genuchten (1980) propuso un modelo, que está compuesto por tres parámetros para el cálculo de la SWCC y se expresa de la siguiente forma:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1 + (a \Psi)^n} \right]^m \quad [16]$$

Donde:

Ψ : Succión en el suelo que se puede expresar en kPa o en m columna de agua.

a : Parámetro de ajuste en unidades de presión inversa (kPa^{-1}) o en unidades inversas de cabeza (m^{-1}).

m : Parámetro de ajuste relacionado con la simetría general de la curva.

n : Parámetro de ajuste relacionado con la distribución del tamaño de los poros del suelo.

El modelo de Van Genuchten y Mualem (1976; 1980) tiene en cuenta un punto de inflexión, que permite una mayor flexibilidad que otros modelos sobre un rango más amplio de succión y captura

de mejor manera la curva en S de las curvas típicas. El parámetro m y n se restringe por su relación directa expresado de la forma:

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad ; \quad n > 1 \quad [17]$$

Estas restricciones reducen la flexibilidad del modelo, sin embargo, lo simplifica significativamente lo que da como resultado una mayor estabilidad durante optimización de los parámetros (Van Genuchten et al 1991). Los suelos con una curva característica “más plana” se capturan con mayor eficacia mediante valores grandes de n y los suelos con una presión de entrada de aire alta se caracterizan por valores más pequeños a (Ning Lu & Likos, 2007).

3.4 Resistencia al corte en suelos parcialmente saturados.

El comportamiento de suelos no saturados ha sido estudiado durante mucho tiempo, incorporando variables de esfuerzos independientes que describan el comportamiento de estos tipos de suelos (Coleman 1962; Bishop and Blight 1963; Burland 1965, Lu and Likos, 2004, 2006) de los primeros en incorporar uno de esos esfuerzos variables fue Bishop 1959 que propone una expresión de esfuerzo efectivo incluyendo la succión matricial en el cálculo.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad [18]$$

Donde:

χ : Es un parámetro relacionado al grado de saturación del suelo

u_a : Presión de poros debida al aire en el suelo

Donde el valor de χ es igual a la unidad cuando el suelo está saturado y cero cuando el suelo está en estado seco. Posteriormente investigadores como Aitchison (1961) y Jennings (1961) también proponen ecuaciones de esfuerzo efectivo en las cuales el cálculo depende de unos factores relacionados a la presión de poros y a la succión en el suelo. Siguiendo la ecuación [18] de Bishop e incorporándola en el criterio de falla de Mohr Coulomb, la resistencia al corte para suelos parcialmente saturados es:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan(\Phi') \quad [19]$$

Sin embargo, dado a que se estaba vinculando el comportamiento constitutivo del suelo directamente a los variables de esfuerzos y no como normalmente se hace, vincular el equilibrio de deformación con el comportamiento constitutivo, Fredlund y Morgenstern (1977) presentaron un análisis de esfuerzo teórico que se basa en una mecánica multifacética continua, en la cual un suelo parcialmente saturado consiste en un sistema de cuatro fases.

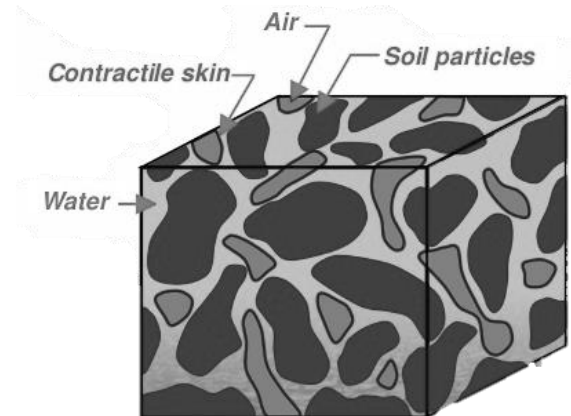


Figura 3.9. Sistema multifacético planteado por Fredlund (Fredlund & Rahardjo, 1993)

El sistema de fases se compone de unas partículas sólidas, agua, aire y paredes contráctiles o una interfaz entre el agua-aire, una representación idealizada se observa en la Figura 3.9, la pared contráctil es una membrana donde se generan tensiones superficiales a lo largo de la estructura del suelo. Si el aire en el suelo es continuo la pared contráctil interactúa con las partículas sólidas generando una influencia en el comportamiento del suelo, en cambio cuando el aire consiste en burbujas ocluidas, el fluido se convierte en un fluido compresible.

El análisis concluyó que hay dos de tres posibles combinaciones de variables de estado de esfuerzo que se pueden utilizar para definir un estado de esfuerzos en un suelo parcialmente saturado, estas combinaciones son las siguientes:

- $(\sigma - u_a), (u_a - u_w)$
- $(\sigma - u_w), (u_a - u_w)$
- $(\sigma - u_a), (\sigma - u_w)$

La primera combinación tiene como ventaja que proporciona una transición sencilla del caso saturado y parcialmente saturado, pero tiene como desventaja que cuando la presión de poros del agua cambia, las dos variables de estado esfuerzos son afectadas, mientras que en la segunda combinación la ventaja es que la variable de esfuerzo es afectada únicamente cuando la presión de poros del agua en el suelo cambia (D. G. Fredlund et al., 1978). Teniendo estas dos variables de estado independientes se analizan dos posibles ecuaciones de resistencia al corte, las siguientes son las ecuaciones:

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) * \tan \phi' + (u_a - u_w) * \tan \phi^u \quad [20]$$

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) * \tan \phi' + (u_a - u_w) * \tan \phi^b \quad [21]$$

Donde:

ϕ' : Angulo de fricción efectivo

c' : Parámetro de cohesión efectiva

ϕ^u : Angulo de fricción con respecto al cambio en $(u_a - u_w)$ cuando $(\sigma - u_w)$

ϕ^b : Angulo de fricción con respecto al cambio en $(u_a - u_w)$ cuando $(\sigma - u_a)$

En la ecuación [20] y [21], si en el suelo se presenta una succión positiva, es decir, $(u_a - u_w)$ es mayor a cero, se requiere de una tercera dimensión para representar el círculo de esfuerzos. En la Figura 3.10 se muestra la representación gráfica de los círculos de esfuerzos donde la tercera dimensión es $u_a - u_w$.

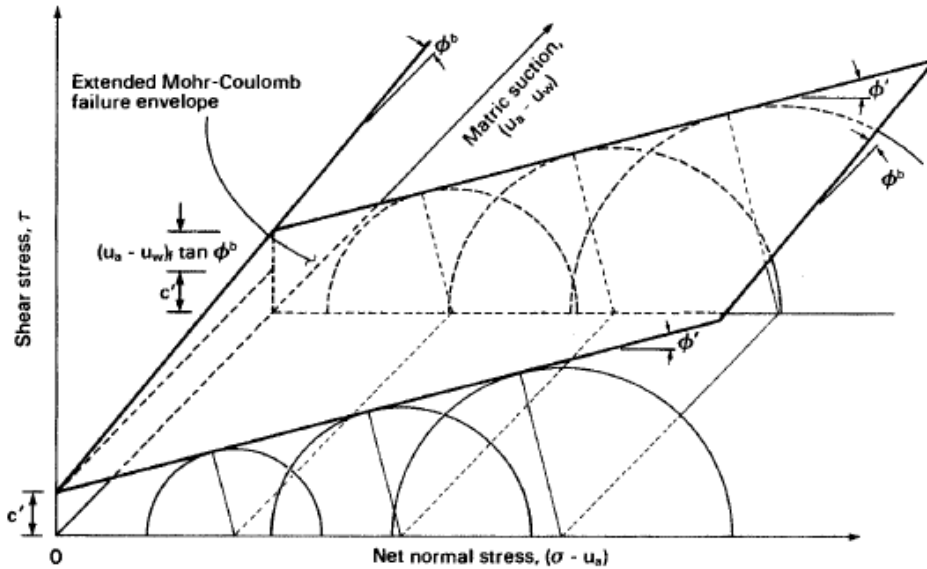


Figura 3.10. Extensión de la envolvente de Mohr Coulomb para suelos no saturados (Fredlund & Rahardjo, 1993).

En dado caso que la matriz de succión sea igual a cero, el tercer término en la ecuación [20] y [21] se elimina y por tanto las ecuaciones representarían la resistencia al corte en suelos saturados. Adicionalmente, en el segundo término de las ecuaciones el ángulo de fricción ϕ' es el ángulo de fricción efectivo, por lo tanto, al igualar ambas ecuaciones y al reorganizar la ecuación se llega a la relación entre los ángulos de fricción.

$$\tan \phi'' = \tan \phi^b - \tan \phi' \quad [22]$$

Posteriormente otros investigadores (Vanapalli et al., 1996) analizaron la resistencia al corte de los suelos parcialmente saturados relacionándola con la curva de retención de humedad. Los autores explican que a medida que un suelo saturado se va desaturando, es decir, que pierde cantidad de agua y va ganando aire en sus poros, el suelo pasa por 4 fases o zonas, como se explicó anteriormente.

A medida que se va acercando a esa zona residual, es decir, al ir entrando aire en el suelo y al ir aumentando la succión en el suelo, la resistencia al corte presenta un incremento no lineal, aunque lo anterior puede depender del tipo del suelo. Teniendo en cuenta lo anterior amplía la ecuación de resistencia al corte mediante una normalización de área de agua a_w . Donde el área normalizada de agua se define como la relación entre el área de agua correspondiente a cualquier grado de saturación y el área de agua al 100% de saturación, dado a que está relacionado con el grado de saturación se puede relacionar con el contenido de agua volumétrico.

$$a_w = \theta^k \quad [23]$$

Donde

θ : Contenido volumétrico

K: Parámetro de ajuste

Este parámetro de ajuste permite obtener una mejor correlación entre los datos medidos y los experimentales. Lo anterior concluye que el aporte de la succión a la resistencia al corte está dado por la siguiente ecuación:

$$\tau_{us} = (U_a - U_w) * \theta^k * \tan \phi' \quad [24]$$

Lo que permite extender la ecuación de Fredlund de la siguiente manera:

$$\tau = c' + (\sigma - U_a) * \tan \phi' + (U_a - U_w) * \tan \phi' * \theta^k \quad [25]$$

De la misma manera, proponen otra ecuación en donde en vez de usar el parámetro de ajuste k, se usa directamente el grado de saturación de la muestra:

$$\tau = c' + (\sigma - U_a) * \tan \phi' + (U_a - U_w) * \tan \phi' * \left(\frac{S - S_r}{100 - S_r} \right) \quad [26]$$

Donde:

S: Grado de saturación

S_r: Grado de saturación residual

Esta ecuación es favorable ya que el grado de saturación residual se puede determinar con la curva de retención de humedad. Esta ecuación fue validada por Vanapalli et al. (1996) utilizando una máquina de corte directo modificada realizaron ensayos dando una buena relación con lo predicho por la ecuación.

Otros investigadores como Lu & Likos (2006) han estudiado la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados considerando fuerzas microscópicas inter- particulares que no se tienen en cuenta en las teorías clásicas, tales como las fuerzas de Van der Waals, las fuerzas eléctricas de la doble capa difusa, las fuerzas de cementación, fuerzas de tensión superficial y las fuerzas que surgen de la presión negativa de los poros del agua, las anteriores las conceptualizan dando a lugar al esfuerzo de succión, que se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma'_s = \sigma_{pc} + \sigma_{cap} + x (u_a - u_w) - \sigma_{co} \quad [27]$$

Donde:

σ_{pc} : Esfuerzo total producido por la interacción físico químico

σ_{cap} : Esfuerzo debido a la fuerza capilar debida a la tensión superficial entre el agua-aire-suelo

σ_{co} : Esfuerzo neto de contacto entre las partículas

Cada componente del esfuerzo entre las partículas que comprende la succión está en función del contenido de agua y el grado de saturación. Por lo tanto, el esfuerzo de succión está en función de la curva de retención de humedad y se puede escribir de esta forma:

$$\sigma'_s = f(u_a - u_w) = f(S) = f(\theta) \quad [28]$$

O de la forma

$$\sigma'_s = \sigma_s - \sigma_{co} \quad [29]$$

Dónde:

σ'_s : Esfuerzo de succión

σ_s : Esfuerzo de succión no corregido

σ_{co} : Esfuerzo de tracción aparente en estado saturado

La magnitud del esfuerzo de succión depende de la succión matricial y de la cohesión aparente o del esfuerzo de tracción aparente que trata de ser consistente con la ecuación de Terzaghi, adicionalmente si consideramos el criterio de falla de Mohr Coulomb, la tracción aparente σ_{co} puede ser estimada como $C'/\tan(\phi)$. Así mismo la variación de la succión y del esfuerzo de

succión en estado parcialmente saturado se explica con las etapas de la curva de retención explicado en la sección 3.3.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma_s \quad [30]$$

Posteriormente (Lu et al., 2010) se basan en estos conceptos para encontrar un ecuación de forma cerrada para la curva característica del esfuerzo de succión en función de la succión matricial o la saturación del suelo, basándose en una formulación termodinámica donde tienen como hipótesis que el cambio de energía del agua en el suelo desde su estado de agua libre es en su mayoría consumida por el esfuerzo de succión.

Los autores definen la curva de retención de humedad como una función a trozos, que tiene en cuenta cuando se está presentando la entrada de aire como un medio continuo y después de la entrada de aire como el cambio de la energía del agua en su estado de agua libre, y la describen como:

$$\sigma_s = -(u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \leq 0 \quad [31]$$

$$\sigma_s = f(u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad [32]$$

Donde f es una función de escalado que describe el vínculo entre el esfuerzo de la succión y la succión matricial. Esta función se define como S_e que es la relación de volumen de agua libre y el agua total disponible para una saturación efectiva, es decir, que es un grado de saturación normalizado y llegan a la siguiente expresión de esfuerzo de succión:

$$\sigma_s = -(u_a - u_w) S_e \quad [33]$$

Donde:

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad [34]$$

Sin embargo, se realiza una extensión a esta expresión para aplicar la relación entre grado de saturación y la succión matricial. Utilizando el modelo de (Fredlund -Xing, 1980) para expresar el grado de saturación normalizado, el cual es el siguiente.

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad [35]$$

Donde n y α son parámetros empíricos de ajuste de las propiedades del suelo parcialmente saturado, siendo α la inversa de la presión de entrada de aire para el suelo saturado de agua y n el parámetro de distribución del tamaño de los poros. De aquí obtuvieron una expresión de forma cerrada para el cálculo del esfuerzo efectivo en todo el rango de presión de agua:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w) \quad (u_a - u_w) \leq 0 \quad [36]$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{\{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n\}^{1-1/n}} \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad [37]$$

Y al utilizar el principio de falla de Mohr Coulomb, la ecuación que representaría la resistencia al corte en suelos parcialmente saturados es la siguiente:

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (u_a - u_w) \leq 0 \quad [38]$$

$$\tau_f = c' + \left[(\sigma - u_a) + \frac{(u_a - u_w)}{\{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n\}^{1-1/n}} \right] \tan \phi' \quad (u_a - u_w) \geq 0 \quad [39]$$

3.5 Modelación física en centrifuga Geotécnica

La modelación en centrifuga geotécnica es una herramienta importante para los ingenieros geotécnicos, ya que permite el estudio y análisis de los diferentes problemas geotécnicos, esta permite modelar un suelo al cual se le realiza ensayos que reflejan la condición in situ y sus resultados se extrapolan a una situación similar del prototipo, pero para ello los eventos presentes en el modelo deben estar relacionados con unas apropiadas leyes de escala que permitan extrapolar el evento (Taylor, 2013).

Una característica especial de la modelación geotécnica es la necesidad de reproducir el comportamiento del suelo en términos de fuerza y de resistencia. En una condición real, los esfuerzos cambian con la profundidad y es bien conocido que el comportamiento del suelo está en función de su historia de esfuerzos, tratar de modelar dichos esfuerzos a escala real es sumamente costoso y dispendioso. Por lo tanto, la modelación en centrifuga geotécnica es de gran utilidad dado que permite modelar un suelo expuesto a grandes esfuerzos con menores costos y menores dimensiones.

3.5.1 Principio de funcionamiento

El suelo se ubica al final del brazo de una centrifuga en unos contenedores herméticos, los cuales se someten a un campo de aceleración centrífuga que con respecto al modelo, sentirá un campo de aceleración gravitatorio mucho mayor que el de la gravedad de la tierra. La relación entre la gravedad (g) que se modela con la centrifuga, la velocidad angular (w) con la que gira el modelo y el radio de la centrifuga (r) está dada por la siguiente ecuación:

$$g = w^2 r \quad [40]$$

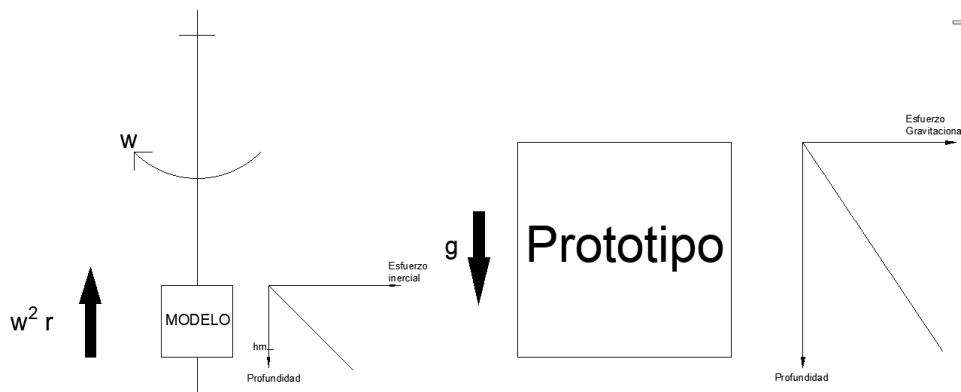


Figura 3.11 Esfuerzo inercial en un modelo en centrifuga induciendo rotación sobre un eje fijo (Taylor, 2013)

Como se observa en la Figura 3.11, al aumentar la velocidad angular se crea un campo de gravitatorio de N veces la gravedad de la tierra, por lo tanto, la relación del esfuerzo vertical y la profundidad en el modelo está dada por la siguiente ecuación (Taylor, 2013)

$$\sigma_{vm} = \rho N g h_m \quad [41]$$

Donde:

σ_{vm} : Esfuerzo vertical aplicado en el modelo

h_m : Profundidad del suelo en el modelo

N : Numero de veces que se aumentada la gravedad, g

ρ : Densidad del suelo en el modelo

En el prototipo se aplica la misma ecuación con la diferencia que el esfuerzo vertical está sometido a una gravedad (ecuación 42).

$$\sigma_{vp} = \rho g h_p \quad [42]$$

σ_{vp} : Esfuerzo vertical aplicado en el prototipo

h_p : Profundidad del suelo en el prototipo

Como la idea de la modelación en centrífuga es que los esfuerzos en el modelo y en el prototipo sean los mismos ($\sigma_{vm} = \sigma_{vp}$), al despejar las ecuaciones da como resultado que $h_m \cdot N = h_p$, es decir que el factor de escala (modelo: prototipo) para las dimensiones lineales es de 1: N. Este mismo principio se ha realizado para diferentes parámetros de modelación y variables que controlan el comportamiento del suelo llegando a diferentes leyes de escala para la modelación, la siguiente tabla muestra dichos factores.

Tabla 2 Leyes de escala usados para establecer la relación existente entre el modelo y el prototipo (Garnier & Gaudin, 2007)

Parámetros	Factor de escala	Parámetro	Factor de escala
Dimensión lineal	1/N	Gravedad	N
Área dimensional	1/N ²	Fuerza	1/N ²
Volumen	1/N ³	Tiempo difusión	1/N ²
Esfuerzo	1	Masa	1/N ³
Deformación	1	Peso unitario	N
Densidad	1	Velocidad	N
Permeabilidad	N	Gradiente hidráulico	1
Viscosidad	N		

3.5.2 Leyes de escala para suelos parcialmente saturados

Para la modelación de suelos parcialmente saturados en centrífuga se han desarrollado diferentes leyes de escala que permiten extrapolar las mediciones en el modelo hacia el prototipo, una de ellas ha sido la altura capilar (h_c) la cual puede ser medida fácilmente en la centrífuga. Sin embargo, estas leyes pueden variar dependiendo el tipo de suelo, efectos como la forma del menisco y la influencia de la velocidad de ascensión del agua capilar en contacto con el suelo a un ángulo específico. Actualmente la altura capilar se rige por el siguiente factor de escala:

$$h_{cp} = N h_{cm} \quad [43]$$

Dicha ecuación se ha comprobado en arenas de Congleton ($d_{10}/d_{50} = 0.1/0.15 \text{ mm}$) por medio de ensayos en centrífuga, los cuales consisten en humedecer desde su base una columna de arena para observar la evolución de la altura capilar en diferentes niveles de gravedad. En los experimentos se fija el nivel freático a un nivel constante por medio del tubo de Marriot mientras

se observaba la elevación del frente de humectación, la diferencia entre estas dos alturas se define como la altura capilar, la Figura 3.12 muestra el montaje y los dispositivos para realizar los experimentos (Rezzoug et al., 2004).

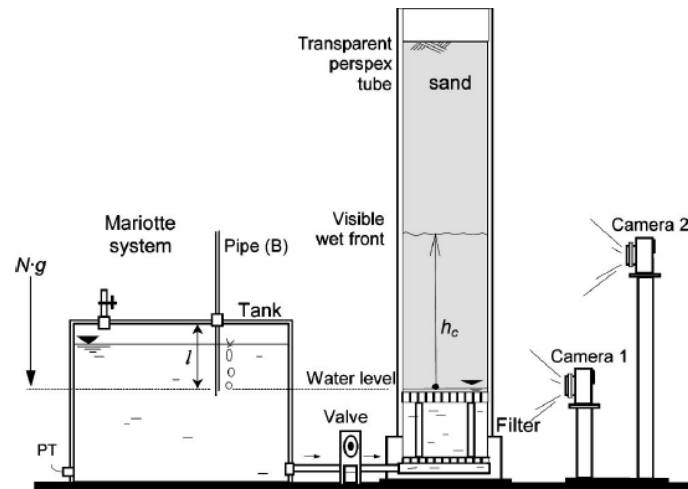


Figura 3.12 Configuración y dispositivos para el experimento (Rezzoug et al., 2004)

Al tiempo de la verificación del factor de escala para la altura capilar también se verifica el factor de escala para el tiempo (t), comparando los resultados obtenidos con ensayos a una gravedad, el factor de escala para el tiempo viene dado por la siguiente expresión:

$$t_p = N^2 t_m \quad [44]$$

Los resultados confirman que tanto el factor de escala para la altura capilar como el factor del tiempo son correctamente escalados para diferentes gravedades. Al igual que Rezzoug, König, y Triantafyllidis (2004) han estudiado el factor de escala utilizando diferentes aparatos de medida y ecuaciones teóricas comparativas verificando que estos factores son correctos. (Crancon et al., 2000) modelaron la altura capilar y calcularon la curva de retención de agua en arenas de Landes de Gascogne ($d_{10}/d_{50} = 0.1/0.3 \text{ mm}$) y en polvos de borosilicato sintético ($d_{10}/d_{50} = 0.2/0.3 \text{ mm}$) utilizando sensores tipo TDR, estos sensores miden el tiempo de viaje de pulsos electromagnéticos sobre una distancia conocida en una línea de transmisión enterradas en el suelo, a partir de esa lectura permite determinar el contenido de agua con una precisión aproximada del 2%, la altura capilar medida en el ensayo la verificaban con la ecuación teórica dada por la ley de Jurin's (Ecuación 45).

$$h_c = \frac{2 \sigma \cos(\beta)}{(\rho_w - \rho_A)gR} \quad [45]$$

Donde:

σ : Esfuerzo de tensión superficial, el cual fue tomado como 0.0725 N/m

β : Angulo de contacto, el cual fue tomado como 0

ρ_w : Densidad bulk del agua, el cual fue tomado como 1

ρ_A : Densidad bulk del aire, insignificante

R : Radios de los poros de la arena, el cual fue tomado como 70 μm

En la Figura 3.13 se observa que los resultados experimentales obtenidos en los modelos en centrífuga realizados por Crancon y sus colaboradores son aproximados a la curva generada con la ecuación de Jurin, verificando los factores de escala con dicha ecuación.

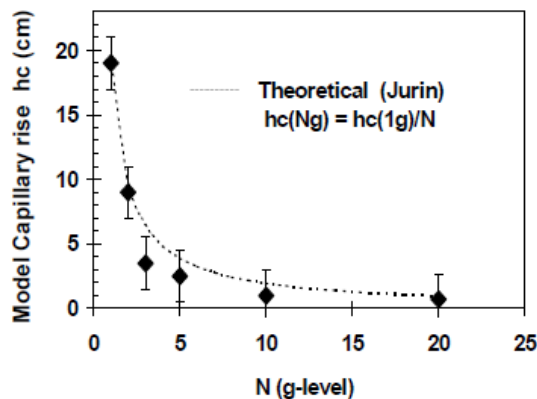


Figura 3.13 Evolución de la altura capilar a diferentes gravedades con respecto a la ecuación teórica de Jurin (Crancon et al., 2000)

Otros autores como Esposito (2000) y Knight et al (2000) se han dedicado a estudiar y comprobar la posibilidad de modelar derrames de hidrocarburos livianos en suelos arenosos saturados y parcialmente saturados, comparando las pruebas en centrífuga (gravedades menores a 50 g) con pruebas a una gravedad o con modelos computacionales, dichos estudios comprobaron similitud en los resultados escalados con las leyes de escala.

3.6 Modelación física del efecto de la succión en la estabilidad de taludes.

Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de la succión en la estabilidad de taludes, uno de los primeros análisis fue realizado por Fred Lund (1989) donde enfatiza la importancia de las presiones negativas que se generan en un terraplén construido con suelo limoso de la región de Columbia, el cual comienza a fallar a medida que se disipan dichas presiones.

Al margen de las presiones negativas, se ha comprobado que la vegetación aporta como medio ecológico a la estabilización de laderas, Ng, Kamchoom y Leung (2016) cuantifican los efectos hidrológicos y mecánicos de la geometría de las raíces en la estabilidad de las pendientes poco profundas, estas mediciones comprobaron que la succión generada por las raíces dentro de la profundidad de la raíz aportan considerablemente a la estabilización de deslizamientos poco profundos.

Actualmente en los estudios se utilizan maquinas centrífugas donde se modelan los taludes para medir y observar la succión que se genera. Una parte vital de estas modelaciones es la construcción del talud dado a que se debe lograr controlar una gran cantidad de parámetros tales como la densidad, el nivel freático, la humedad y la construcción de la pendiente, todo esto con el fin de centrar el estudio en el efecto de la succión del suelo.

A continuación, se enunciarán una serie de estudios en la estabilidad de taludes que presentan las técnicas de modelación de taludes.

3.6.1 Estudio de taludes en suelos Arenosos

3.6.1.1 Preparación con técnica de pluvitación.

En suelos arenosos se han realizado varios estudios de estabilidad de taludes utilizando modelos en centrífuga. Yu et al (2008) estudió la respuesta sísmica de una ladera de suelo arenoso del depósito de Beijing con contenido de agua residual de 0.55% y utilizó la técnica de pluvitación que consiste en caída libre de partículas de suelo no cohesivo en un molde y altura determinada para obtener una densidad seca (Lo Presti et al., 1992). Al material se le realizaron diferentes pruebas de propiedades físicas y de clasificación obteniendo los resultados de la Tabla 3. Así

mismo se realizó la curva granulométrica (Figura 3.14), en donde se obtiene que la arena posee un contenido de finos igual al 10 %.

Tabla 3. Propiedades del suelo arenoso (Yu et al., 2008).

Parámetro	Valor
Gravedad específica	2.66
Tamaño de partícula medio (mm)	0.17
Angulo de fricción pico	41.6
Contenido de humedad (%)	0.55
Máxima relación de vacíos	0.98
Mínima relación de vacíos	0.43

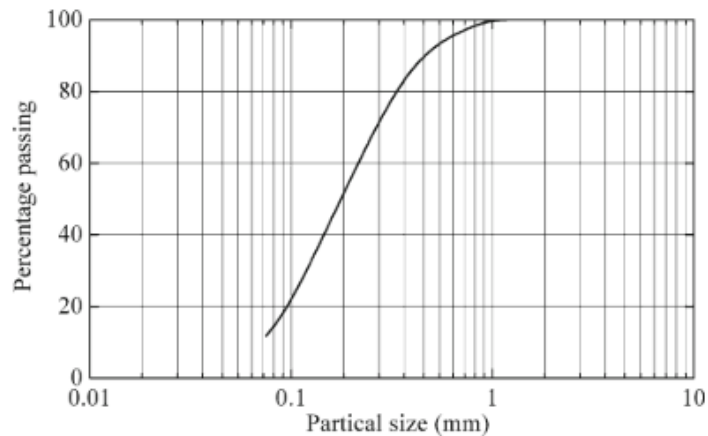


Figura 3.14 Curva granulométrica de la arena de Beijing (Yu et al., 2008).

La arena seca fue pluvizada a una altura fija ($H=1.2$ metros) para lograr uniformidad del modelo, posteriormente la superficie de arena fue aplanada y compactada para lograr una mejor densidad relativa; se colocaron pequeñas capas de arena negra que permitieron identificar las deformaciones. Cuando el depósito de arena alcanzó una altura de 310 mm se cortó con el perfil deseado. La Tabla 4 se resumen las características de los modelos que se realizaron.

Tabla 4 Resumen de las características de los taludes de arena (Yu et al., 2008).

Caso	Angulo del talud (°)	Altura del talud (m)	Densidad del modelo (g/cm^3)	Densidad relativa (D_r)
C-1	26.6	7.5	1.69	0.73
C-2	29.7	8.0	1.61	0.59
C3	34.8	8.5	1.71	0.76
C-4	37.3	9.0	1.66	0.69
C-5	36.9	9.0	1.66	0.69

3.6.1.2 Preparación con compactación.

Ling et al.(2009) demuestran el uso de una técnica de modelado en centrífuga para el estudio de la estabilidad en laderas, las cuales se sometieron a diferentes inclinaciones y se les indujo lluvias de diferentes intensidades, los modelos de taludes fueron preparados a partir de arena pura de Nevada mezclada con arcilla, la arena de Nevada tiene un diámetro medio de 0.15 mm y un peso unitario mínimo y máximo de 13.87 y 17.33 kN/m³, respectivamente. La caolinita usada para las mezclas de arena con arcilla tiene un límite líquido de 56% y un índice de plasticidad de 24%, la gravedad específica de la arena y la caolinita son respectivamente $G_{ss} = 2.67$ y $G_{sc} = 2.64$. La gravedad específica de las mezclas la obtienen dependiendo la fracción de la arena α ($0 < \alpha < 1$) y se relaciona con la siguiente expresión

$$G_s = \alpha G_{ss} + (1-\alpha) G_{sc} \quad [46]$$

La Tabla 5 muestra las propiedades del suelo modelado en los taludes:

Tabla 5 Propiedades de los suelos compactados (Ling et al., 2009)

Soil types	Sand	Sand with	Sand with
		15% fines	30% fines
Specific gravity, G_s	2.67	2.666	2.661
Maximum dry unit weight, γ_d (kN/m ³)	15.79	18.02	18.98
Optimum water content, w_{opt} (%)	11.19	7.66	8.87
Degree of saturation, S_r (%)	45.4	45.3	63.0
Total unit weight, γ_t (kN/m ³)	17.56	19.40	20.67
Relative density, D_r (%)	89.3	—	—

La pendiente de los taludes se formó compactando capas de suelo de espesor de 2.5 cm, mientras iban aumentando las capas se iba fijando un marco de acero en el interior de la caja ajustándolo para crear un revestimiento con la inclinación determinada (90°, 75°, 60°), de igual manera que el anterior estudio se coloca una fina capa de arena nevada coloreada para poder percibir las deformaciones. En este mismo estudio, se colocaron en la parte superior y en el frente de la pendiente transductores láser y de desplazamiento variable diferencial LVDT para medir los desplazamientos durante el vuelo, esto permite detectar desplazamientos que se producían de forma abrupta.

En el estudio realizado por Higo et al. (2015) el suelo usado para estudiar la estabilidad dinámica de laderas parcialmente saturadas con diferentes contenidos de agua es arena de Yodogawa levee, esta arena posee un porcentaje de suelo limoso igual a 14.2% y de arcilla igual al 11.3%, tiene un diámetro máximo de partícula de 2.0 mm y un diámetro promedio de 0.28.

La construcción de las ladera se inicia mezclando el suelo con agua para llegar a un contenido de humedad óptimo del 13.7%, posteriormente se introducen en el recipiente de manera uniforme y se compacta hasta lograr tener un grado de compactación de 91% ($\rho_d = 1.675 \text{ g/cm}^3$), a medida que se va compactando capa por capa se coloca un encofrado (Figura 3.15-a) para generar la pendiente del talud deseada y posteriormente se retira el suelo excedente (Figura 3.15-b).

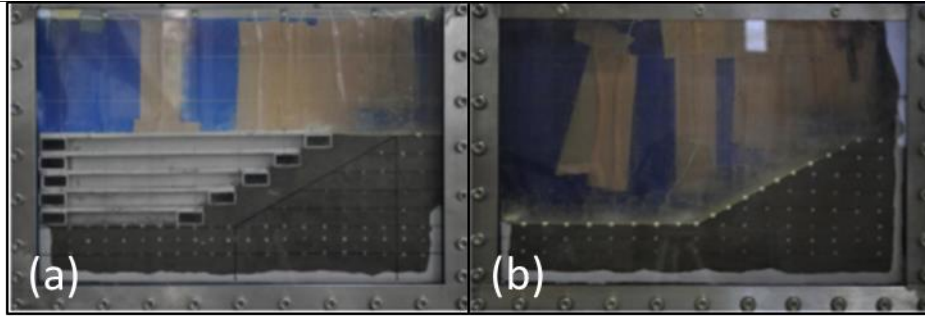


Figura 3.15 a) Preparación de los taludes (a) Fotografía justo después de completar la compactación (b) Talud modelado para los ensayos (Higo et al., 2015)

Otros autores estudian el efecto de las raíces y la succión que producen en el suelo (Ng et al., 2016; Sonnenberg et al., 2012), sin embargo el modelo de construcción de las laderas no difieren una con respecto a la otra, en ambos estudios se colocaba un molde que encofra el suelo con la pendiente deseada y se compacta en pequeñas capas con la caja en posición horizontal, una fue compactada con un contenido de humedad de 27.5% y la otra de 15.1%, en los estudios se utilizó arena fina mezclada con arcilla montmorillonita o con limos.

3.6.1.3 Preparación con pluvitación y compactación.

Matziaris et al. (2017) al igual que Ling realiza un estudio de la estabilización de las laderas sometidas a diferentes intensidades de lluvias pero difirieron en la construcción de los modelos, Matziaris construyó primero un bloque compactado de suelo dentro de la caja y luego lo corto para proporcionar la geometría requerida, se utilizó arena pura y arena mezclada con suelo limoso, el proceso de construcción de la arena pura se realizó primero con pluvitación seca, compactada a una densidad de 90%.

Posteriormente el bloque de arena se saturó y se permitió drenaje, luego de un tiempo se aplicó una presión de aire para generar desaturación, la succión generada permitió cortar el bloque a una pendiente con ángulo de 50°. En los modelos con arena limosa se mezcló con agua para lograr su contenido óptimo de humedad, y se dejó reposando 24 h, posteriormente se compactó en capas de 3 cm usando una placa de madera y un martillo Proctor estándar.

3.6.2 Estudios de taludes en suelos finos

3.6.2.1 Preparación con compactación

Otro investigador (Anbese & Juneja, 2018) analizó pendientes de tierra sometidos a cambios en el contenido de agua, el suelo utilizado para las pendientes fue un suelo limoso poco plástico (ML), el suelo se compactó en pequeñas capas de material hasta formar un bloque de suelo cuboidal, posteriormente se corta y se forma los taludes con pendientes de 60° hasta 75°, durante los vuelos se examinaron las pendientes con diferentes contenidos de agua hasta lograr la falla.

3.6.2.2 Preparación con compactación y consolidación en centrífuga.

En suelos finos (tamaño de partículas menores a 75 μm) también se han realizado estudios de estabilidad de taludes utilizando modelos en centrífuga, Chen et al (2018) analiza la estabilidad de los taludes conformados por suelos expansivos y que están expuestos a ciclos de humedecimiento y secado con inundación del pie del talud, dicho suelo expansivo posee las siguientes características.

Tabla 6 Propiedades físicas del suelo expansivo (T. lin Chen et al., 2018)

Specific gravity	Free expansion ratio δ_{ef} (%)	The saturated coefficient of permeability k_{sat} (cm/s)	Liquid limit w_l (%)	Plastic limit w_p (%)	The optimum water content w_{op}	The maximum dry unit weight γ_d (kN/m ³)	The size of particles (mm) and composition (%)			
							>0.5	0.5–0.075	0.075–0.005	<0.005
2.70	60	0.35×10^{-6}	42.2	22.9	19.7	16.9	0.0	25.2	51.6	23.2

La construcción de los modelos inicia con la mezcla de agua con suelo en estado seco hasta alcanzar un contenido de agua del 20% y 30%, se deja reposando durante un tiempo con tal que se homogenice la muestra, posteriormente con una placa vibradora de 50 mm x 50 mm el suelo es compactado en capas de 50 mm hasta llegar a una altura de 300mm. Todos los modelos de suelo con un peso unitario y contenido de agua deseado son llevados a centrífuga a un vuelo de 100 g, este es detenido cuando los asentamientos monitoreados sobre la superficie del suelo sean estables. Tras el proceso de consolidación con asentamientos de 20 mm, los modelos son cortados y excavados con la pendiente deseada para las diferentes pruebas en centrifuga.

4 Metodología

Para estudiar el efecto de la succión en la estabilidad del talud, la metodología de estudio se dividió en cinco etapas, las cuales se observan en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Metodología que se realizara

4.1.1 Etapa 1: Caracterización del suelo:

El fin de esta etapa fue conocer las propiedades mecánicas del suelo y las condiciones a las cuales se iba a estudiar. El suelo que se utilizó fue un suelo fino de color blanco y durante el desarrollo de la investigación se hizo uso del laboratorio de Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. La etapa de caracterización del suelo que se usó en este trabajo fue elaborada en conjunto como parte de la convocatoria interna de jóvenes investigadores aprobada en el año 2019.

La caracterización del suelo consistió en determinar las propiedades mecánicas del material por medio de ensayos de laboratorio, tales como gravedad específica, compresiones simples y triaxiales consolidados no drenados. De igual manera esta etapa tuvo como fin determinar los niveles de succión que se aplicaron en los modelos físicos, para ello se realizó la curva de retención de humedad del suelo de estudio.

4.1.2 Etapa 2: Modelación numérica de la pendiente del talud.

En esta etapa se realizó una modelación numérica preliminar en el software Slide y una modelación a escala reducida en centrifuga geotécnica, en la modelación numérica se determinó la pendiente de un talud con un factor de seguridad igual a uno y en la modelación a escala reducida se validó la pendiente hallada en condición saturada. Lo anterior tuvo como objetivo obtener un talud inestable que me permitiera generar diferentes niveles de succión y estudiar el efecto sobre este.

4.1.2.1 Proceso

- 1) En el programa Slide se modelaron taludes con diferentes pendientes y dimensiones dependiendo las gravedades posibles a utilizar, hasta encontrar un talud con un factor de seguridad cercano a uno. Estas modelaciones permitieron determinar la pendiente y la gravedad a la cual se realizaron los modelos en la centrifuga geotécnica.
- 2) Ya determinada la pendiente, se prepararon 3 modelos que obtuvieran una humedad igual a 1.5 veces el límite líquido, para ello se mezcló el suelo y el agua con ayuda del mezclador del laboratorio.
- 3) Posteriormente, se aceitaron las paredes de las cajas para generar las condiciones de fronteras necesarias y se compactó una pequeña capa de arena fina con el fin de proteger el agujero de salida del agua en la parte inferior de la caja, al finalizar se midió el peso de la caja más la capa de arena y el aceite.
- 4) Luego, se colocó un papel filtro en la superficie de la arena y se introdujo de manera uniforme el suelo en las cajas de acrílico en capas de igual espesor, la distribución del suelo se realizó de manera cuidadosa con el fin de que se generara la menor cantidad de vacíos en el suelo. Al llenar completamente la caja, se colocó otro papel filtro y se tomó el peso de todo el recipiente más el suelo.
- 5) Se llevaron las cajas de acrílico con el suelo a los consolidómetros y en estos se realizó el proceso de consolidación aplicando incrementos de cargas hasta llegar al esfuerzo de consolidación escogido.
- 6) Al tener los bloques de suelos ya consolidados, se desarmaron las cajas de acrílico y se realizó el proceso de corte a la pendiente deseada. El proceso de corte se realizó con ayuda de un alambre delgado que cortó el material suavemente para no alterar el suelo, al finalizar se volvió armar la caja.
- 7) Ya obtenido el talud, se llevó la caja a la centrifuga geotécnica y se realizó el ensayo de estabilidad a la gravedad determinada en la modelación numérica.

4.1.3 Etapa 3: Fabricación de modelos físicos.

La tercera etapa consistió en la preparación de 7 modelos físicos, los cuales pasaron por una fase de consolidación con la cual se llevó el material hasta un esfuerzo de consolidación definido en la etapa de caracterización, se continuo con una fase de corte a la pendiente determinada y por último una fase de secado.

Al obtener cada modelo a la humedad requerida se llevó los ensayos en la centrifuga geotécnica obteniendo 7 puntos con succiones diferentes. A continuación, se presenta una tabla con la descripción de cada modelo.

Tabla 7. Descripción de modelos físicos.

Modelos	Descripción
1	Succión 1
2	Succión 2
3	Succión 3
4	Succión 4
5	Succión 5
6	Succión 6
7	Succión 7

Se tomó una fotografía antes y después de cada vuelo que se utilizó para efectuar los análisis de imagen y el estudio del efecto de la succión en el campo de desplazamientos que se genera en el ensayo en centrifuga geotécnica.

4.1.3.1 Proceso

- 1) Se prepararon las muestras de suelo para que obtengan una humedad igual a 1.5 veces el límite líquido, para ello se mezcló el material y el agua con ayuda del mezclador del laboratorio.
- 2) Se aceitaron las paredes de las cajas para generar las condiciones de fronteras necesarias y se compactó una pequeña capa de arena fina con el fin de proteger el agujero de salida del agua en la parte inferior de la caja, al finalizar se midió el peso de la caja más la capa de arena y el aceite.
- 3) Se colocó un papel filtro en la superficie de la arena y se introdujo de manera uniforme el suelo en las cajas de acrílico en capas de igual espesor, la distribución del suelo se realizó de manera cuidadosa con el fin de que se generara la menor cantidad de vacíos en el suelo. Al llenar completamente la caja, se colocó otro papel filtro y se tomó el peso de todo el recipiente más el suelo.
- 4) Se llevaron las cajas de acrílico con el suelo a los consolidómetros, para realizar el proceso de consolidación aplicando incrementos de cargas hasta llegar al esfuerzo de consolidación escogido.
- 5) Al tener los bloques de suelos ya consolidados se desarmaron las cajas de acrílico y se realizó el proceso de corte a la pendiente deseada.
- 6) Ya obtenido el talud, se dejó secar el suelo por la parte superior durante un periodo de tiempo hasta obtener el contenido de agua necesario para generar el valor de succión requerido.

Para medir la humedad se pesaron los modelos periódicamente hasta alcanzar el nivel de humedad requerido en cada modelo, se instaló una manguera en el agujero inferior de la caja que permitió medir y controlar el nivel del agua en la caja desde la parte inferior del suelo de estudio.

- 7) Finalmente se llevó la caja a la centrifuga geotécnica para realizar el vuelo y al finalizar el ensayo se tomaron muestras del suelo para obtener el contenido de humedad a lo largo del talud, este proceso se realizó para los 7 modelos de suelo.

4.1.3.2 Equipos

- Maquina mezcladora
- Consolidómetros electrónicos
- Alambre delgado: elemento que permiten realizar cortes en el suelo
- Cajas de acrílico
- Maquina centrifuga geotécnica
- Racores
- Balanzas – Se utilizará una balanza de capacidad y aproximación de ± 1 g.
- Horno- Termostáticamente controlado y se dejara para el secado de la muestra con una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C.
- Elementos misceláneos: Juego de llaves – recipientes- reglas – espátulas

4.1.4 Etapa 4: Análisis de Imagen

En esta etapa se analizó los desplazamientos obtenidos en los ensayos en la centrifuga geotécnica junto con el cambio de la superficie de falla, esto se hizo con el fin de visualizar el cambio generado por la succión en la superficie de falla con diferentes niveles de succión.

4.1.5 Etapa 5: Validación de resultados

El objetivo de esta etapa fue realizar modelos numéricos de retro cálculo en el programa de Slide y/o Phase² junto con unos ensayos de compresión inconfiada, lo anterior tuvo como fin verificar el aporte cohesivo de la succión obtenido en las modelaciones a escala reducida. Las modelaciones numéricas se realizarán con el criterio de falla de Mohr Coulomb modificado y el análisis de estabilidad se plantea realizar con alguno de los métodos de equilibrio limite que ofrece Slide y Phase².

5 Resultados y análisis.

5.1 Caracterización del suelo saturado.

Se determinaron las propiedades del suelo y el esfuerzo al cual se va a modelar en la centrifuga geotécnica, para ello se realizaron los siguientes ensayos de laboratorio: límites de Atterberg (INV E 125 y 126-13), Gravedad específica (INV E-128-13), hidrometría (INV E -123), humedad (INV E 121-13), ensayo de compresión inconfiada (INV- 152 -13), ensayo de triaxial CU (INV E - 153) y determinación de la succión de un suelo usando papel filtró (INV- 159- 13).

5.1.1 Límites de Atterberg y Gravedad específica.

Se realizaron 3 ensayos para cada uno de los límites de Atterberg (limite líquido, limite plástico y límite de contracción), este proceso se realizó con el fin de ponderar los resultados y disminuir la incertidumbre de la variable, con esto se obtuvo que el límite liquido del material es igual a 73% como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos en la determinación de los límites de Atterberg

Ensayo	1	2	3	Promedio
Límite Líquido	71.04%	74.93%	74.04%	73.34%
Límite Plástico	46.9%	46.9%	42.6%	45.48%
Límite de Contracción	28.43%	36.41%	35.00%	33.28%
Índice de Plasticidad	24.1%	28.0%	31.4%	27.9%

Una vez calculado los límites, se procedió con el ensayo de gravedad específica, el cual permitía determinar la curva granulométrica por hidrometría. Según los resultados y la carta de plasticidad que se muestra en la Figura 5.1 el suelo se clasifica como un limo de alta plasticidad con una gravedad específica igual a 2.61.

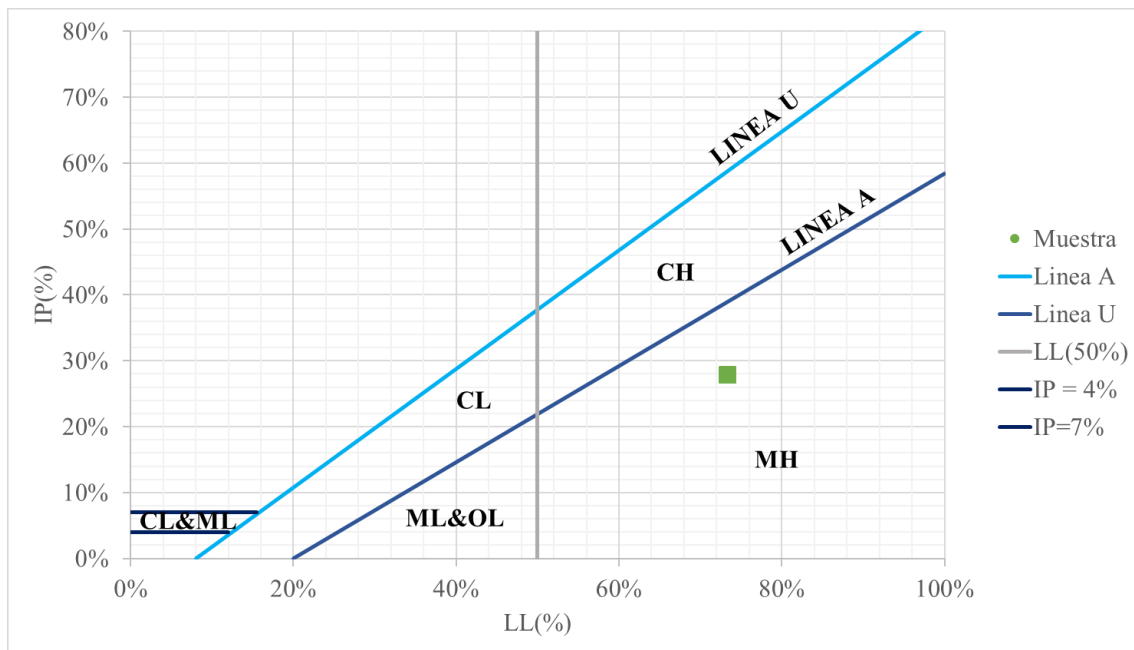


Figura 5.1. Clasificación del suelo (Carta de plasticidad).

5.1.2 Hidrometría

En la Figura 5.2 se muestra la curva granulométrica obtenida con las especificaciones en la norma Invias INV E-123 y en la Tabla 9 los valores obtenidos a partir de esta.

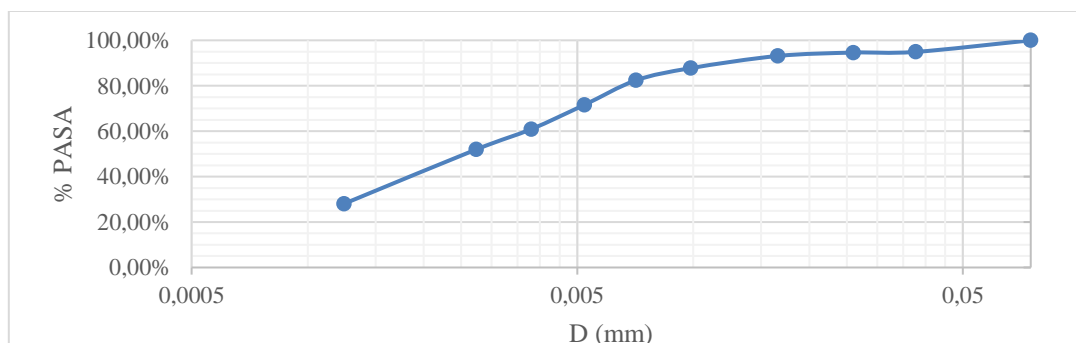


Figura 5.2. Curva granulométrica del suelo.

Como se observa en la Figura 5.2, en la gráfica no se alcanza a percibir un valor de D10, por lo tal se decide extrapolar el valor con los datos obtenidos y se obtiene un valor igual a 6×10^{-4} mm, valor coherente para suelos finos.

Tabla 9. Valores obtenidos de la Curva Granulométrica.

D10	6.0×10^{-4}
D60	3.80×10^{-3}
D30	1.30×10^{-3}

5.1.3 Consolidación

Como se expuso en la sección 4, el ensayo de consolidación fue el método que se utilizó para reconstituir las muestras de suelo que se utilizaron en los ensayos de resistencia al corte y los vuelos en la centrifuga geotécnica. Para ello se siguió con el proceso enunciado en esa sección 4.1.3.1 el cual explica a detalle el paso a paso para generar las muestras.

Se reconstituyeron 4 muestras de suelo, la primera se reconstituyó a un esfuerzo de 20 kPa, la segunda a 30 kPa, la tercera a 40 kPa y la última a 50 kPa, en la Figura 5.3 se observa el proceso de reconstitución de las muestras de suelo.



Figura 5.3. Fotografía de la reconstitución del suelo en los consolidómetros electrónicos.

La metodología del ensayo de consolidación se sigue bajo la norma INV E 151-13, el cual especifica que se debe generar una relación de incrementos de carga de 1.0, lo que se logra duplicando el esfuerzo axial total aplicado sobre el suelo hasta llegar al esfuerzo determinado. Para determinar la consolidación en cada incremento se utiliza la metodología D.W Taylor, la cual consiste en determinar el t_{90} (Tiempo requerido para alcanzar el 90% de consolidación primaria) de la gráfica de desplazamiento vertical vs la raíz de tiempo.

No fue necesario tomar las deformaciones en los instantes de tiempo en los que rige la INV E - 151, dado a que el equipo electrónico de aplicación de carga toma este valor cada 60 segundos. Con los datos obtenidos se logra graficar las curvas de consolidación para cada incremento, en la Figura 5.4 se muestra una de las gráficas de consolidación obtenidas para un esfuerzo de 30 kPa.

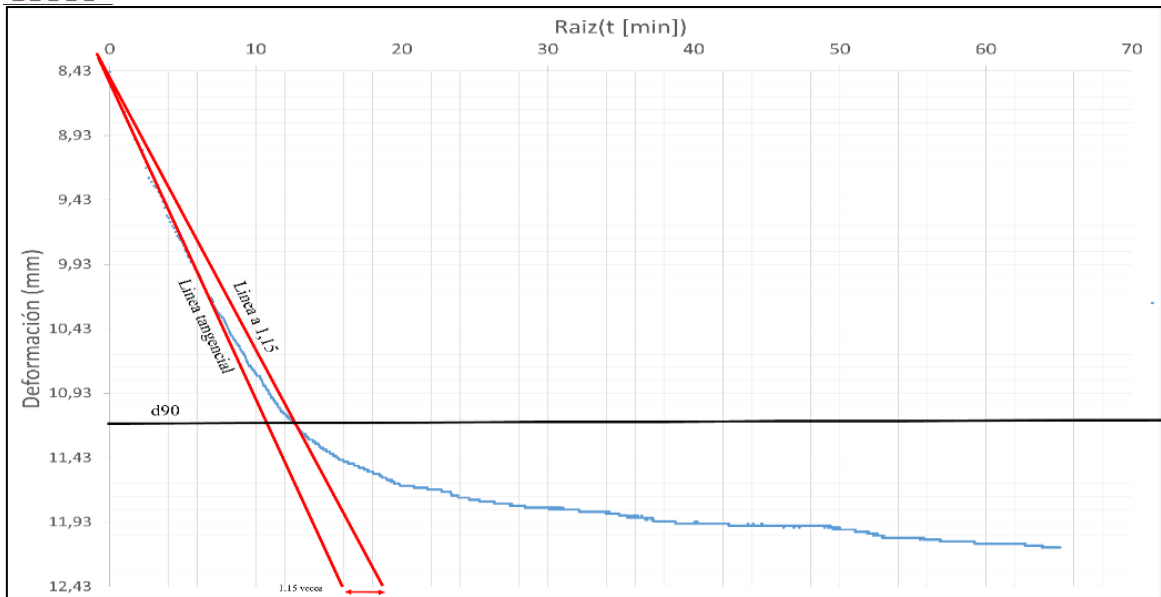


Figura 5.4. Curva de consolidación para un esfuerzo igual a 30 kPa.

Al llegar al esfuerzo objetivo de cada ensayo, a cada muestra se le extraen dos muestras cilíndricas de suelo para realizar los ensayos de compresión confinada y triaxial consolidado no drenado que se explican a continuación.

5.1.4 Ensayo de compresión simple y triaxial CU

Para estimar el efecto de la succión en la estabilidad de los taludes primero se debe determinar la resistencia al corte no drenado en el suelo saturado, por lo cual, con las muestras cilíndricas obtenidas se determinó la resistencia al corte no drenado con los ensayos de compresión simple y triaxial CU.

La extracción de las muestras cilíndricas se realizó cortando las muestras reconstituidas con un cilíndrico metálico hueco el cual estaba aceitado en las paredes internas y poseía una pestaña afilada en una de sus caras.

Posteriormente se extrae la muestra con cuidado y se disminuye su diámetro hasta obtener una muestra de suelo con una relación altura-diámetro de 2 a 2.5 veces. El montaje y el criterio de falla adoptado para ensayo triaxial consolidado no drenado (CU) se realiza como lo especifica la norma INV E – 153 – 13, lo anterior se puede observar en la Figura 5.5.

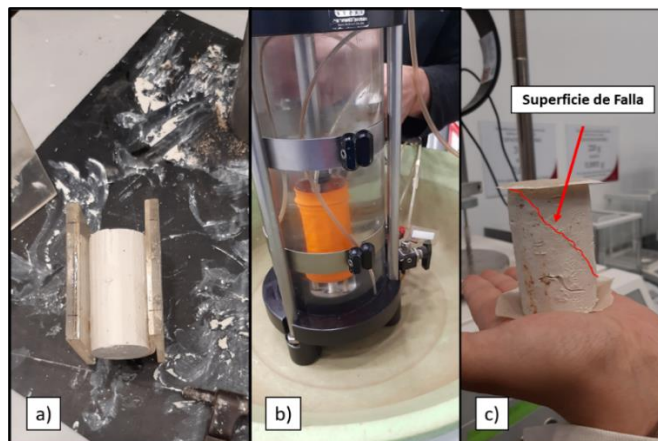


Figura 5.5. Fotografías del proceso de montaje; a) Proceso de corte; b) Montaje de muestra para el ensayo triaxial CU; c) Superficie de falla obtenida.

En la Figura 5.6 y Figura 5.7 se observan que las cargas máximas obtenidas en los ensayos de compresión simple y triaxial CU aumentan a un mayor nivel de confinamiento. Así mismo se observa que al inicio de la aplicación de la carga hay una menor capacidad de carga en la muestra consolidada a un esfuerzo de 40 kPa que la consolidada a 30 kPa, esto se pudo presentar debido a un ajuste entre la máquina de aplicación de carga y la muestra.

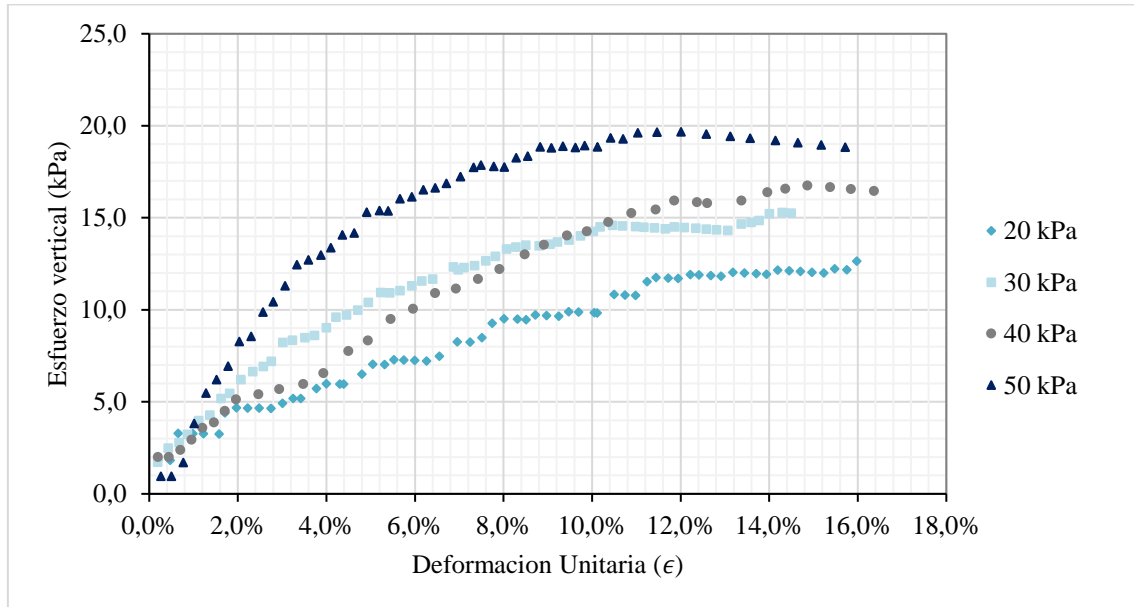


Figura 5.6. Gráficas de deformación unitaria (ϵ) en función del esfuerzo vertical aplicado (σ_v) obtenido de los ensayos de compresión inconfiada.

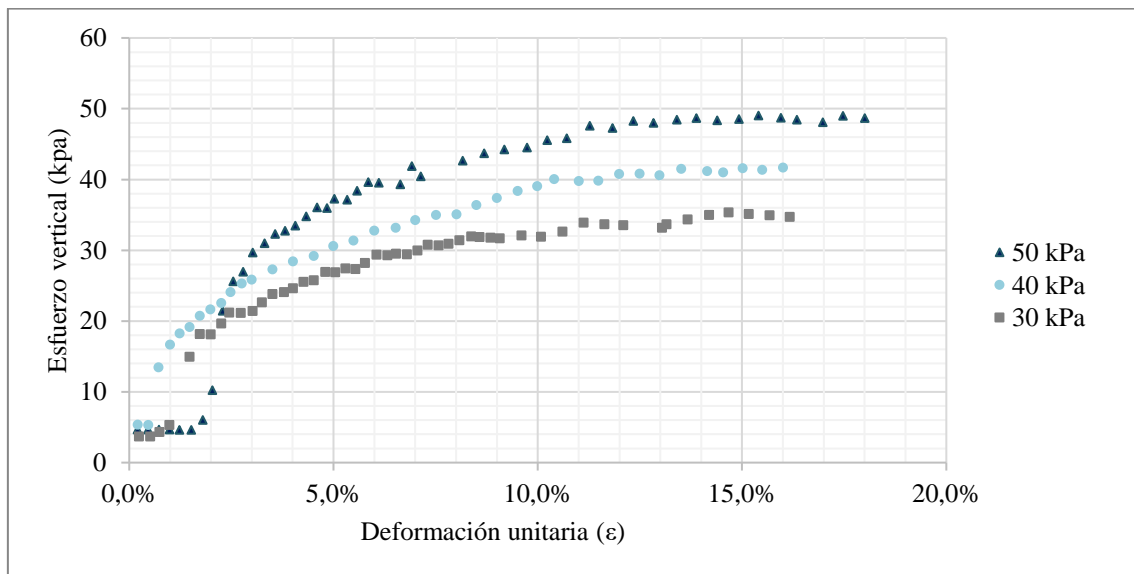


Figura 5.7. Gráficas de deformación unitaria (ϵ) en función del esfuerzo vertical aplicado (σ_v) obtenido de los ensayos triaxial consolidado no drenado (CU).

Adicionalmente se determinaron los parámetros de resistencia al corte de suelo en términos totales y efectivos graficando los círculos de Mohr como se muestra en la Figura 5.8. Los resultados muestran que el suelo de estudio posee una cohesión y ángulo de fricción efectivo de 5,5 kPa y 24° respectivamente.

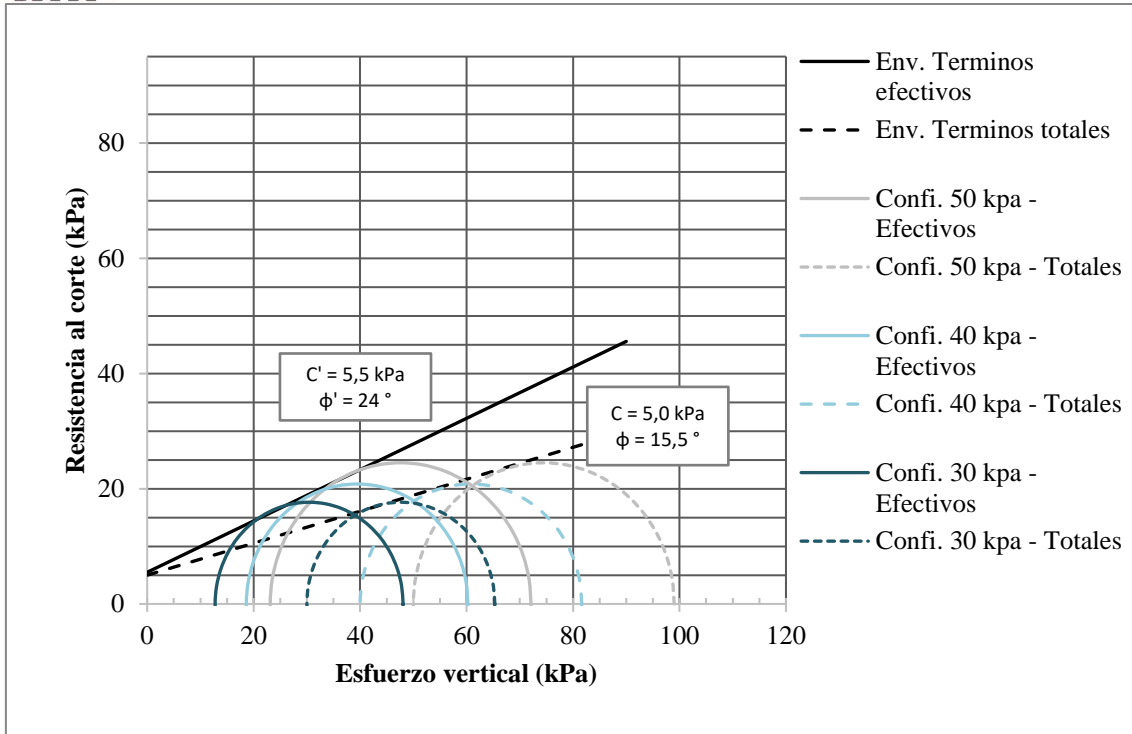


Figura 5.8. Graficas de esfuerzo vertical en función de la resistencia al corte del suelo.

La Tabla 10 muestra los resultados de los ensayos de compresión simple y la Tabla 11 muestra los resultados de los triaxiales CU.

Tabla 10. Resultados de las pruebas de compresión simple o inconfiada.

σ_c (kPa)	20	30	40	50
q_u (KPa)	12,64	15,29	16,75	19,67
S_u (KPa)	6,32	7,64	8,38	9,83
S_u (kg/cm ²)	0,064	0,078	0,085	0,100

Tabla 11. Resultados de los triaxiales CU.

(σ_c) (kPa)	30,00	40,00	50,00
C_u (kPa)	17,65	20,82	24,50

Se puede observar que las resistencias al corte no drenado obtenidas de los ensayos triaxiales CU duplican los valores obtenidos de los ensayos de compresión simple, esto se debe a que en los ensayos triaxiales se tiene una presión de confinamiento que aumenta la resistencia al corte (C_u). En la Figura 5.9 se muestra la variación de la resistencia al corte no drenado (C_u) obtenida de los ensayos triaxiales en función del esfuerzo alcanzado de la muestra reconstituida (σ_c) y en la Figura 5.10 se muestra la variación de la resistencia al corte no drenado (C_u) obtenida de los ensayos de compresión simple.

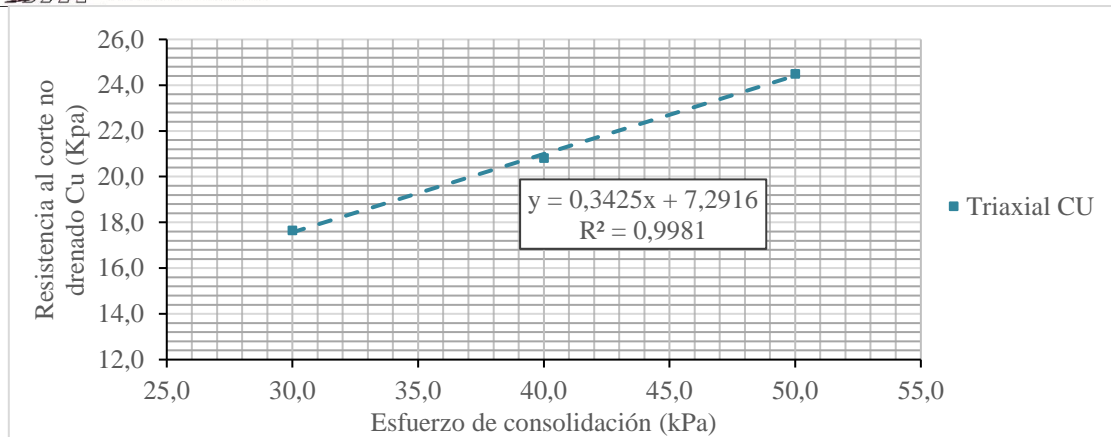


Figura 5.9 Variación de la resistencia a corte no drenado (C_u) obtenidos de los ensayos triaxiales CU en función del esfuerzo de confinamiento.

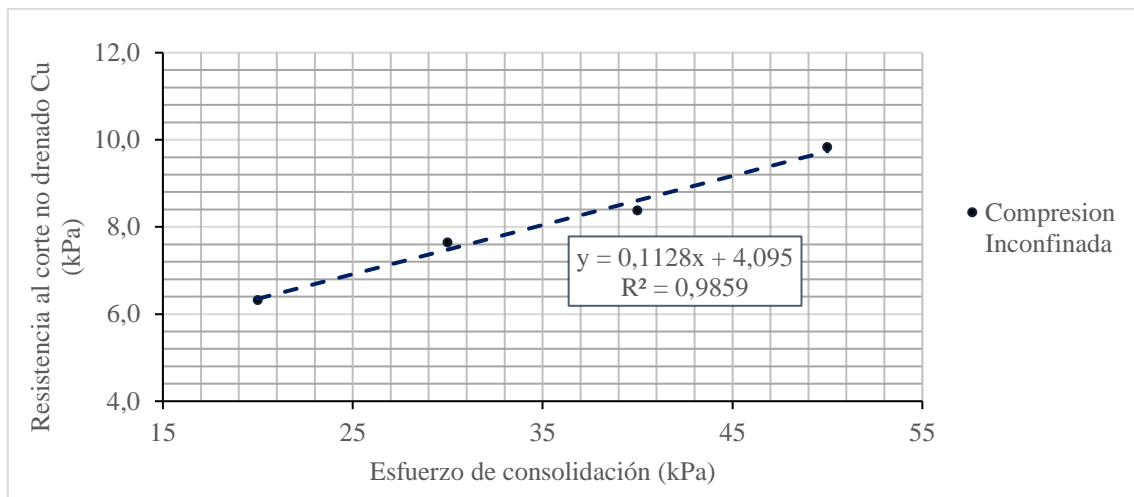


Figura 5.10. Variación de la resistencia al corte no drenado obtenido de los ensayos de compresión inconfiada en función del esfuerzo de confinamiento.

5.2 Caracterización del suelo parcialmente saturado

5.2.1 Curva de retención de humedad (SWRC)

Para establecer los niveles de succión que se generaron en los modelos físicos se determinó la curva de retención de humedad por medio del ensayo de papel filtro como lo especifica la norma INV E – 159 – 13. En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos en 9 muestras de suelos a las cuales se le determinó la succión matricial para diferentes contenidos de humedad.

Tabla 12. Resultados de los ensayos de papel filtro.

Humedad (%)	Succión Matricial h(kPa)
42%	214,93
55%	149,96
64%	13,77
63%	63,33
78%	42,28
77%	7,63
63,0%	98,37
67%	60,29
52,0%	812,15

Para determinar la curva SWRC se realiza el ajuste por el modelo Van Genuchten y Mualen explicado en la sección 3.3.2 y 3.3.3, para ello se calcularon los valores θ_s y θ_r experimentalmente, el primer valor se determinó por medio de relaciones de fase cuando el grado de saturación es 100% y el segundo se estima dejando secar las muestras hasta que el grado de saturación no cambia.

Tabla 13. Valores de entrada para el ajuste de Van Genuchten.

w	θ (m ³ /m ³)
80%	0,67
4,5%	0,08
SWRC - Succión Matricial	
m	0,47
n	1,9
α	0,0049

Para establecer los valores de n y α se utilizó un software de optimización llamado RECT de la compañía PC-PROGRESS, la cual utiliza mínimos cuadrados para estimar los coeficientes de ajuste del modelo de Van Genuchten. Al software se le ingresaron los parámetros de entrada iniciales que se muestran en la Tabla 13 y los valores obtenidos experimentalmente de la Tabla 12. Los valores obtenidos por el programa son los siguientes:

Tabla 14. Valores obtenidos del programa RECT

Succión Matricial			
N	SSQ	α	n
0	0.00439	0.0049	1.9
1	0.00388	0.0051	1.5822
2	0.00367	0.0056	1.5435
3	0.00366	0.0057	1.5351
4	0.00366	0.0057	1.5328
5	0.00366	0.0057	1.5322
6	0.00366	0.0057	1.5321
7	0.00366	0.0057	1.5321

Como se observa en la Tabla 14, el programa en ambos análisis finaliza con máximo 7 iteraciones donde para los últimos valores la suma de los cuadrados SSQ tiene el mismo valor, por lo tanto, se tomaron los últimos valores para construir la curva de retención de humedad. Al ingresar los valores en la ecuación [16] se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura 5.11.

Tabla 15. Parámetros ajustados para la construcción de la curva de retención de agua.

SWRC - Succión Matricial	
m	0,35
n	1,5321
α	0,0057

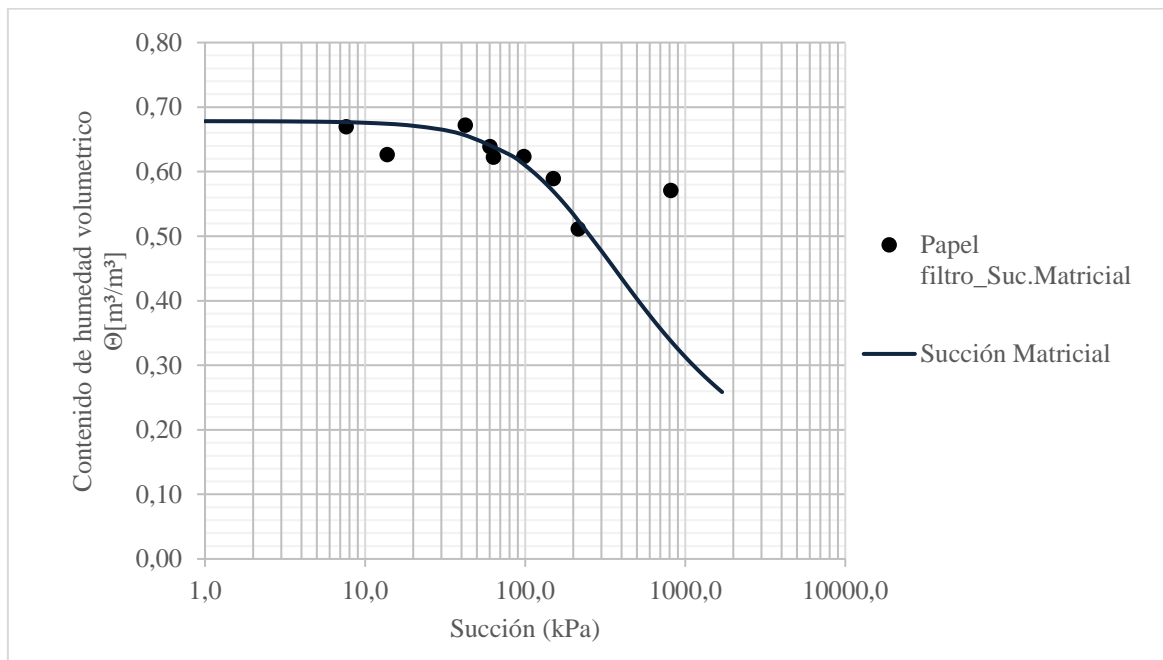


Figura 5.11. Curva de retención de humedad para el suelo de estudio.

5.2.2 Ensayo de compresión simple en muestras con niveles de succión

Para determinar la resistencia al corte que se genera en los taludes con diferentes niveles de succión, se reconstituyeron 8 muestras de suelo a un esfuerzo de consolidación igual 30 kPa con el mismo proceso de reconstitución enunciado en la sección 4.1.3.1, con la diferencia que antes del proceso de corte se permite un proceso de secado de la muestra hasta obtener la humedad deseada.

La razón por la cual las muestras se reconstituyeron a un esfuerzo de 30 kPa, serán explicadas más adelante en la sección 5.3. Las muestras se prepararon y se secaron durante 5, 12 y 14 días, una vez optimada la humedad deseada (Figura 5.12- a) a la muestra se realiza un proceso de corte y tallaje en la cual se extraen 2 cilindros de suelo por muestra (Figura 5.12- b).

Al obtener las muestras cilíndricas, a cada una se le realiza el ensayo de compresión inconfiada (Figura 5.12-c) en el cual se le determina la resistencia al corte no drenado.

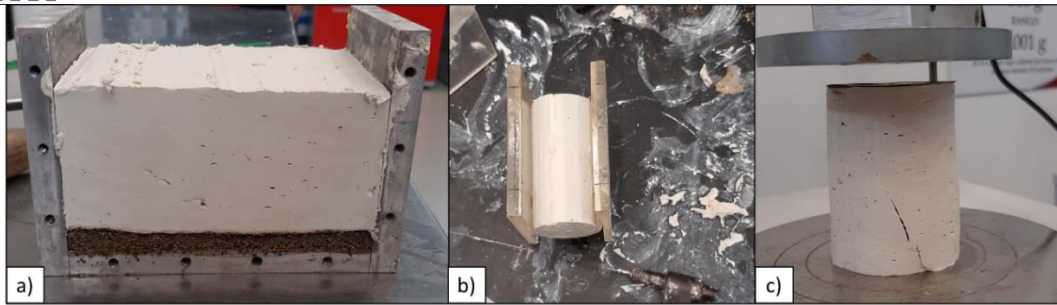


Figura 5.12. Proceso de conformación de muestras cilíndricas de suelo; a) Reconstitución de las muestras de suelo; b) proceso de corte y tallaje de muestras; c) Ensayo de compresión inconfínada.

En la Tabla 16 se observan los resultados obtenidos en los ensayos de compresión simple y la succión estimada con el ajuste del modelo de Van Genuchten y Mualem (1976; 1980) realizado en la sección 5.2.1. Al graficar la resistencia al corte no drenado (C_u) en función de la humedad se presenta una tendencia lineal como se muestra en la Figura 5.13.

Tabla 16. Resultados obtenidos en los ensayos de compresión simple en muestras secadas.

Muestra	Humedad (%)	θ (m^3/m^3)	Θ	q_u (kPa)	S_u (kPa)	$(U_a - U_w)$ [kPa]
1	75,1%	0,67	0,98	17,1	8,6	29,5
2	74,8%	0,66	0,98	17,7	8,9	31,0
3	56,8%	0,60	0,86	96,5	48,3	116,2
4	58,2%	0,60	0,87	104,5	52,3	108,6
5	56%	0,59	0,86	92,9	46,4	121,3
6	55,88%	0,59	0,85	94,4	47,2	122,0
7	43,37%	0,52	0,73	207,7	103,8	224,2
8	75,00%	0,67	0,98	15,3	7,6	30,0

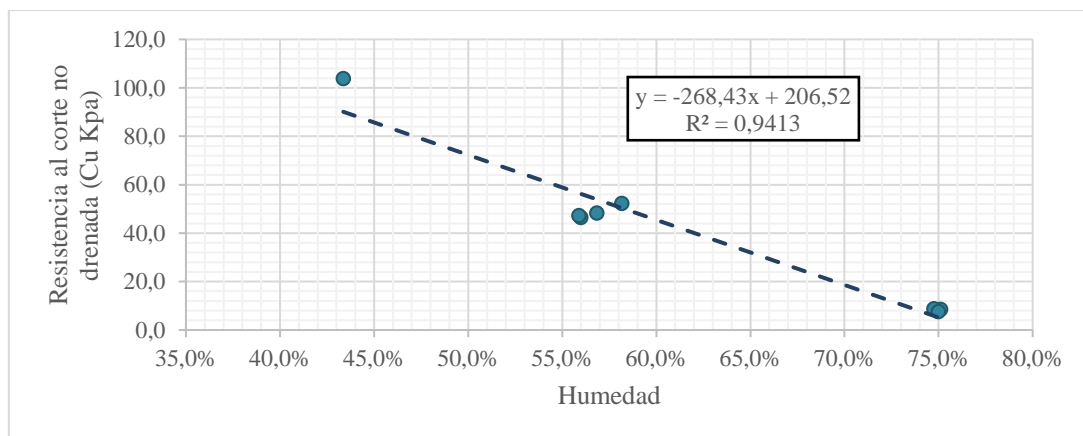


Figura 5.13 Grafica de la resistencia al corte no drenado en función de la succión matricial.

Según Fredlund & Rahardjo (1993), la resistencia al corte no drenado (C_u) obtenida en ensayos sin drenaje y con muestras parcialmente saturadas, puede tomarse como la resistencia al corte del material (T) únicamente si se cumple con la condición en donde el esfuerzo de confinamiento es igual a cero.

Con base a lo anterior, en la Figura 5.14 se observa la resistencia al corte del suelo (T) en función de la succión matricial ($U_a - U_w$) obtenida en los ensayos. A partir de esta grafica se obtiene los

parámetros resistencia al corte del criterio de falla de Mohr Coulomb extendido que se muestra en la Tabla 17, teniendo en cuenta que la cohesión efectiva (C') del material es igual a 5.5 kPa y al asumir C_u como la resistencia al corte (T) del material.

Tabla 17. Parámetros de resistencia al corte del suelo de estudio parcialmente saturado.

Tan (ϕ_b)	0,3914
(ϕ_b)	21,6
C'	5,5
ϕ'	24

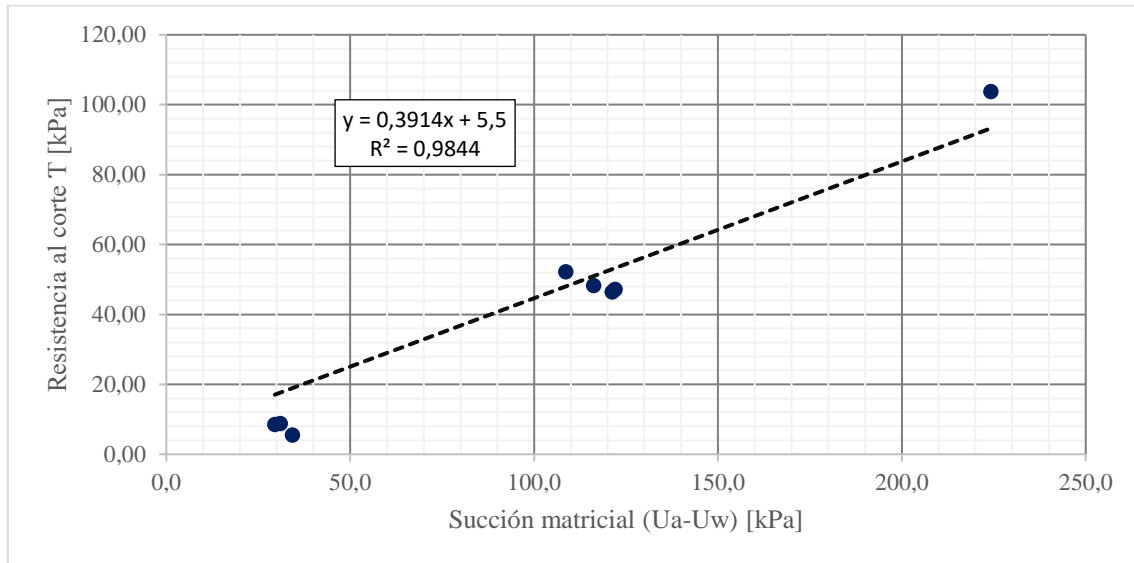


Figura 5.14. Gráfica de la resistencia al corte en función de la succión matricial.

5.3 Modelación numérica con parámetros saturados

Las modelaciones numéricas se realizaron en el programa SLIDE 6.0 de Rocscience, las cuales se efectuaron en condición no drenada inicialmente, por lo cual, los parámetros de entrada que se introdujeron fueron los obtenidos en los ensayos triaxiales. En estas modelaciones se tuvo en cuenta el factor de escala al cual iba estar expuesto los modelos físicos, por lo cual, para cada nivel de gravedad aplicado se variaban las dimensiones de los taludes modelados. En la Tabla 18 se muestran los parámetros de entrada y las variables de cada modelación y en la Figura 5.15 se observa el dimensionamiento general de cada talud.

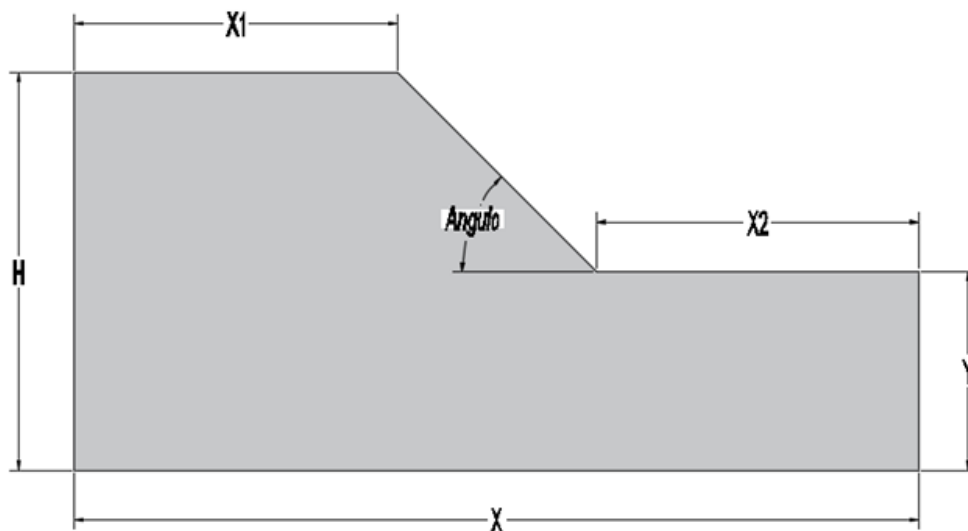


Figura 5.15. Esquema de dimensionamiento de los taludes modelados.

Inicialmente se pensaba reconstituir los modelos a un esfuerzo de consolidación igual a 40 kPa, que corresponde a una resistencia al corte igual a 20.8 kPa, según el ensayo triaxial CU realizado en la sección 5.1.4.

En la Tabla 19 se observan las dimensiones de los taludes modelados y los factores de seguridad obtenidos para un limo de alta plasticidad con resistencia al corte igual a 20.8 kPa.

Tabla 18. Parámetros de entrada y variables estudiadas en la primera ronda de modelaciones en SLIDE.

γ (kN/m ³) = 14.2			C_u (kN/m ²) = 20.8		
Modelo	Angulo (°)	Gravedad (g)	Modelo	Angulo (°)	Gravedad (g)
1	90	50	1	90	150
2	45	50	2	45	150
1	90	100	1	90	200
2	45	100	2	45	200
3	60	100	3	60	200

Tabla 19. Dimensiones y factores de seguridad obtenidos en la primera ronda de modelaciones.

N (g)	Angulo	H (m)	X(m)	x1(m)	x2(m)	y(m)	Min F.S
50	90	4	8,5	4,25	4,245	2	2,71
50	45	4	8,5	3,25	3,25	2	4,04
50	60	4	8,5	3,25	4,1	2	3,72
100	90	8	17	8,5	8,49	4	1,35
100	45	8	17	6,5	6,5	4	2,01
100	60	8	17	6,5	8,2	4	1,86
150	90	12	25,5	12,75	12,735	6	0,90
150	45	12	25,5	9,75	9,75	6	1,35
150	60	12	25,5	9,75	12,3	6	1,24
200	90	16	34	17	16,98	8	0,68
200	45	16	34	13	13	8	1,01
200	60	16	34	13	16,4	8	0,93

Con estos resultados se concluyó que el talud crítico a modelar debía tener una inclinación igual a 90° y estar expuesto a una gravedad igual o mayor a 150 G, sin embargo, al ser los primeros ensayos en la centrifuga geotécnica se consideró que era una gravedad demasiado alta.

Es por lo anterior que se decidió realizar una segunda ronda de modelación numérica en la que la resistencia al corte no drenado sea igual a 17.65 kPa, que corresponde a un nivel esfuerzo de consolidación igual a 30kPa. En la Tabla 20 se muestran los parámetros de entrada que se introdujeron en las modelaciones y en la Tabla 21 se observan los resultados obtenidos en la segunda ronda de modelación.

Tabla 20. Parámetros de entrada y variables estudiadas en la segunda ronda de modelaciones en SLIDE.

γ (kN/m ³) = 14.2			Cu (kN/m ²) = 17.65		
Modelo	Angulo (°)	Gravedad (g)	Modelo	Angulo (°)	Gravedad (g)
1	90	50	1	90	150
2	45	50	2	45	150
3	60	50	3	60	150
1	90	100	1	90	200
2	45	100	2	45	200
3	60	100	3	60	200

Tabla 21. Dimensiones y factores de seguridad obtenidos en la segunda ronda de modelaciones.

N (g)	Angulo	H (m)	X(m)	x1(m)	x2(m)	y(m)	Min F.S
50	90	4	8,5	4,25	4,245	2	2.39
50	45	4	8,5	3,25	3,25	2	3.57
50	60	4	8,5	3,25	4,1	2	3.29
100	90	8	17	8,5	8,49	4	1.19
100	45	8	17	6,5	6,5	4	1.78
100	60	8	17	6,5	8,2	4	1.50
100	70	8	17	6,5	9	4	1.44

Se decidió que el talud óptimo a modelar en la centrifuga geotécnica debería tener una inclinación igual a 70° y estar expuesto a 100 G, ya que es una pendiente sencilla para general en el modelo y que al estar expuesto a ese nivel de gravedad genera un factor de seguridad cercano a uno.

En la Figura 5.16 se observa la modelación numérica realizada con las superficies de fallas generadas y con el factor de seguridad mínimo obtenido.

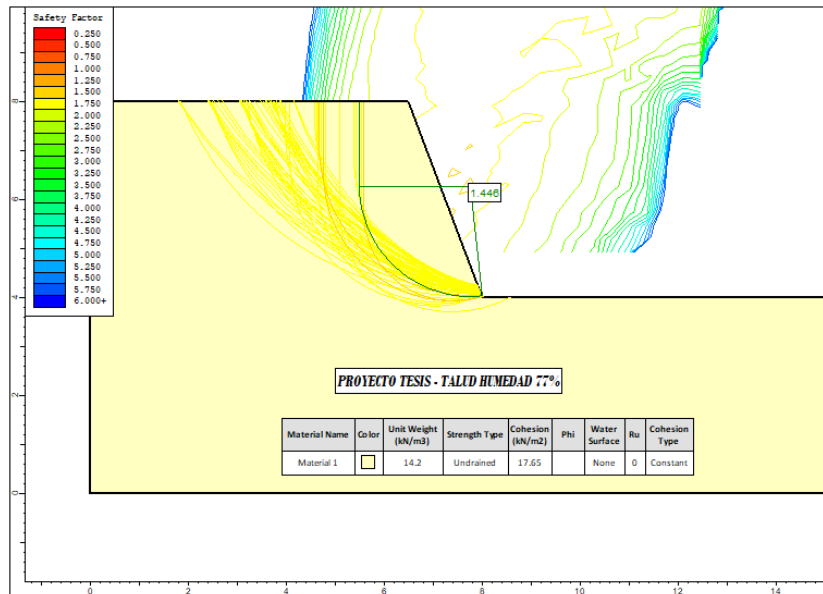


Figura 5.16. Modelación de un talud con ángulo de inclinación igual a 60° y con dimensiones escaladas a 100 gravedades.

5.4 Modelación física en centrifuga Geotécnica

5.4.1 Modelación física del talud saturado

Una vez se determinó el ángulo de inclinación de los taludes se procedió con la modelación física, la cual tiene como objetivo validar que el talud de estudio falle efectivamente en condición saturada. Para ello lo primero que se realizó fue la reconstitución del suelo con la diferencia de que el esfuerzo de confinamiento final debía ser igual a 30 kPa, cabe aclarar que durante este proceso se debe agregar constantemente agua con el fin de que la muestra permanezca saturada.

Terminado el proceso de reconstitución se procedió a la construcción del talud recortando el suelo con una inclinación de 70°, este proceso de corte se realizó con mucha precaución dado que cualquier alteración de la muestra podría alterar el resultado, así mismo se debe realizar con gran velocidad para que el suelo no pierda humedad.

En la Figura 5.17-a se observa el modelo construido con una inclinación de 70°, el cual se formó con un hilo metálico delgado que cortaba el material en pequeñas capas hasta llegar a la profundidad deseada. Posteriormente se procedió al trazado de una malla o cuadrícula (Figura 5.17-b) que permitiera identificar la falla después del vuelo, finalmente como se observa en la Figura 5.17-c se ensambló la caja con el talud en su interior.



Figura 5.17. Proceso de formación del talud de suelo de prueba; a) Corte de material para la formación del talud; b) Trazado de la cuadrícula en la pared del talud; c) Ensamble de la caja con el talud y la cuadrícula.

Para esta etapa se realizaron 3 modelos físicos, que después del proceso de consolidación y de corte fueron llevados a la centrífuga geotécnica inmediatamente, en la Tabla 22 se muestra la descripción de cada modelo y la humedad registrada al final del ensayo.

Tabla 22 . Descripción de modelos físicos en taludes saturados.

Modelo	Humedad promedio
No. 1	No registrada
MV-5	79%
MV-6	77%

El vuelo se realizó durante 6 minutos a una gravedad $N=100G$, que equivale para el modelo prototipo a 41.67 días. De la Figura 5.18 a la Figura 5.20 se muestran las respectivas fotos tomadas antes y después del vuelo en la centrífuga geotécnica. Efectivamente como se observa en la Figura 5.18. b el talud falla por su propio peso y se alcanza a formar una falla circular.

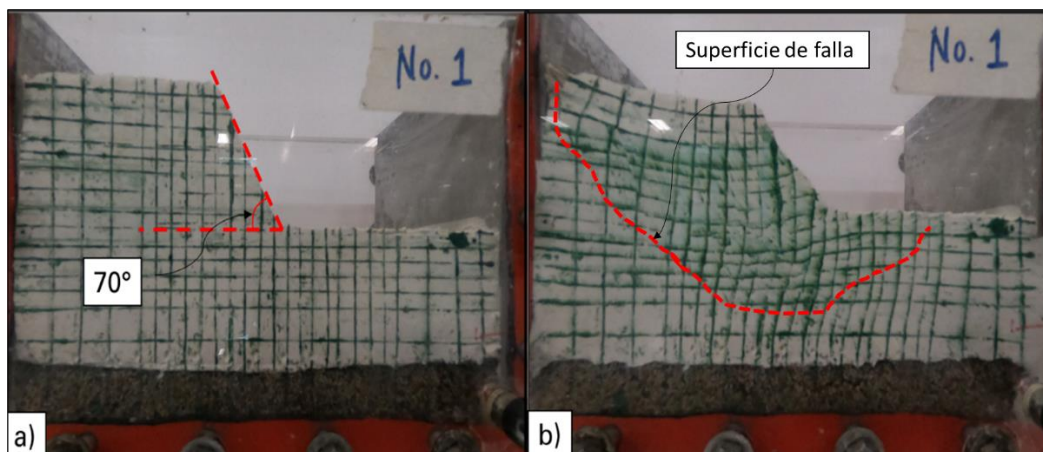


Figura 5.18. Fotografías de la modelación en centrífuga geotécnica-Talud saturado No.1; a) Fotografía antes del vuelo; b) fotografía después del vuelo.

Con el fin de verificar la repetibilidad del ensayo, en la Figura 5.19 y en la Figura 5.20 se muestran otros dos taludes con inclinación de 70° los cuales se ensayaron a una gravedad de $100G$ (resultados tomados del proyecto de Convocatoria Interna 2019), en estas figuras se observa que en ambos modelos se generó una ruptura de corte alrededor de la pendiente del talud, por lo cual se evidencia que estos modelos fallaron generando una superficie de falla más abrupta.

En el modelo MV5, en la Figura 5.19-c-d se observa que la superficie de falla inicia con una grieta a tracción en el primer centímetro en la corona del talud. Así mismo, se observa en la Figura 5.19-d una superficie de falla que inicia en la corona y finaliza delante del pie del talud.

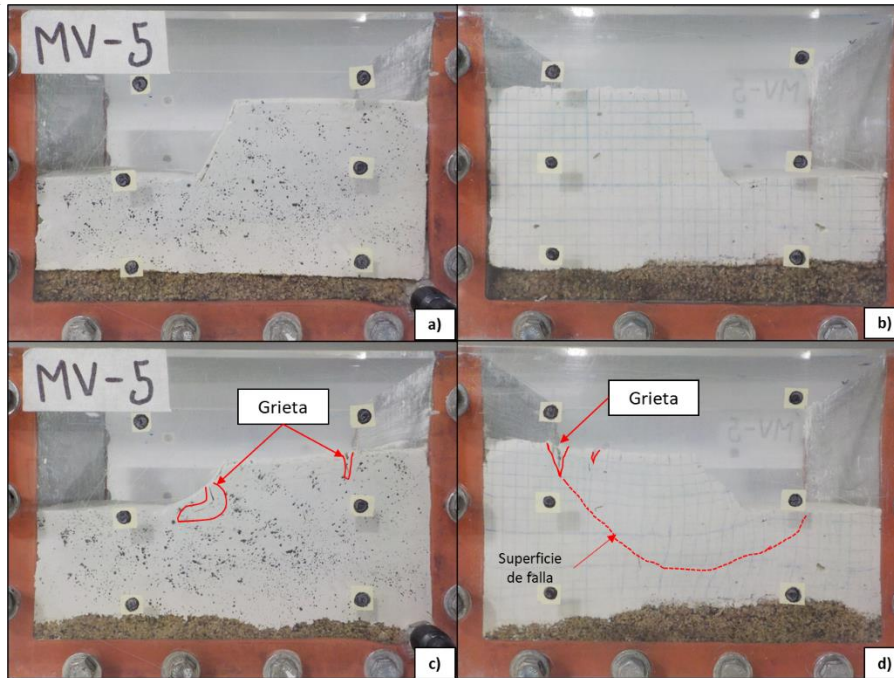


Figura 5.19. Fotografías del talud MV-5 con una humedad promedio igual a 79%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

De igual manera, en la Figura 5.20-d del modelo MV6 se observa que también se presenta la grieta a tracción en la corona del talud y adicionalmente presenta una falla de corte abrupta debajo del pie del talud. En este modelo se presentaron más mecanismos abruptos de corte que se pueden deber a los espacios vacíos que presentaba el modelo antes del vuelo en la centrifuga geotécnica (Ver Figura 5.20-b).

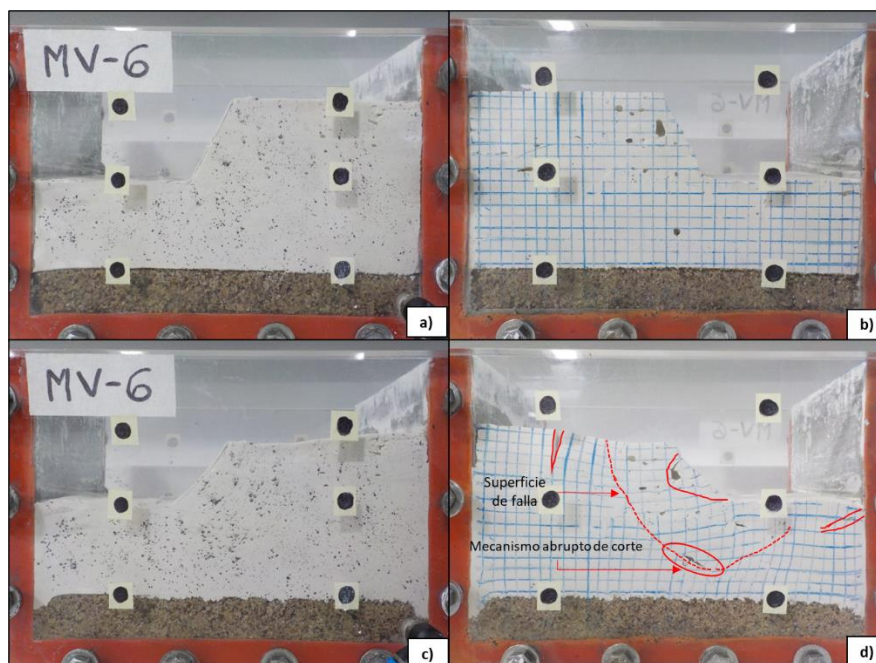


Figura 5.20. Fotografías del talud MV-6 con una humedad promedio igual a 77.6%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

5.4.2 Modelación física en taludes a diferentes niveles de succión.

Se reconstituyeron las muestras de suelo con un esfuerzo de pre-consolidación igual a 30 kPa y se realizó la etapa de corte del talud a 70°, una vez conformado el talud se permitió el secado durante diferentes periodos de tiempo para obtener distintos puntos de humedad. El lugar donde se permitió el secado fue en el laboratorio de suelos y pavimentos, en la Figura 5.21 se muestra la temperatura promedio de 23°C y una humedad relativa promedio igual a 43% durante los días de secado de uno de los modelos.

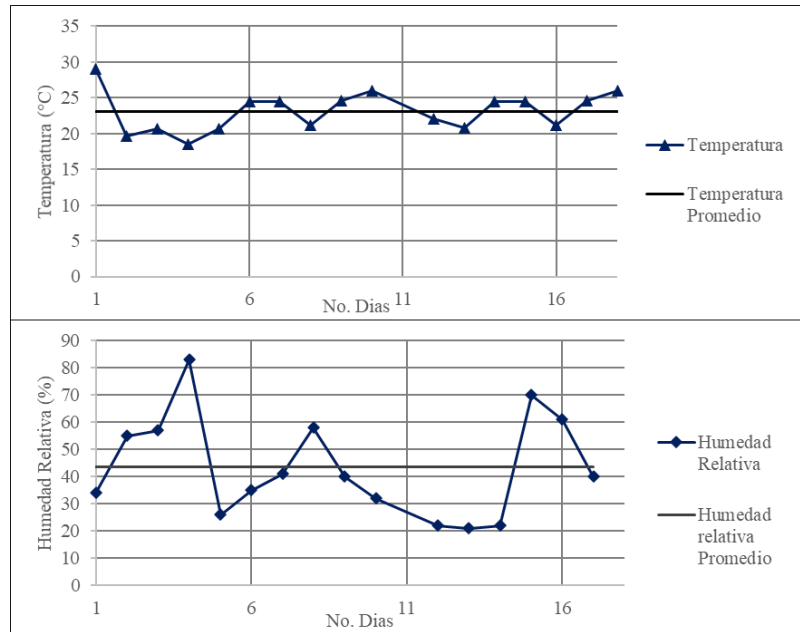


Figura 5.21. Condiciones ambientales en el laboratorio de Suelos y Pavimentos durante el secado del modelo T1.

Para mantener el nivel de agua constante sobre la capa de arena, se instaló una jeringa a un costado del recipiente, que a la vez estuviera conectada a una manguera como se muestra en la Figura 5.22-a.

Adicionalmente, se tuvo precaución con el acondicionamiento de las muestras, ya que podrían sufrir de secado por las caras laterales, por lo cual se cubrieron los taludes lateralmente con cajas de icopor como se muestra en la Figura 5.22-b, el nivel de agua se mantenía a una distancia constante de 8 cm desde la corona del talud.

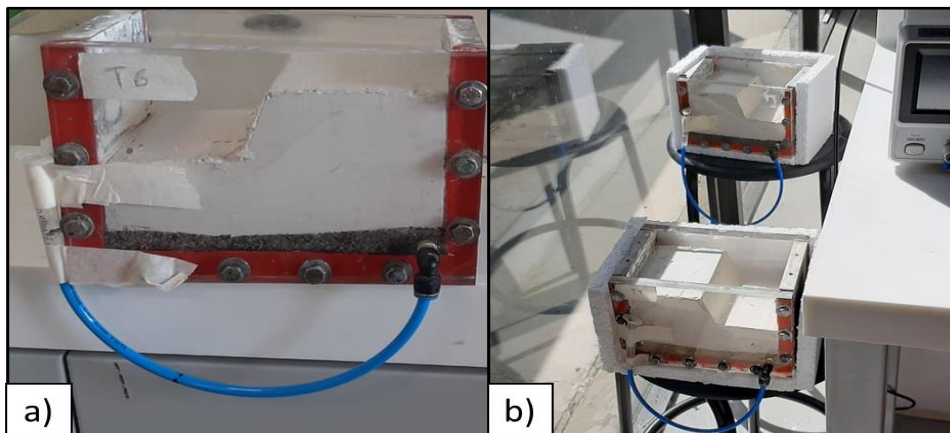


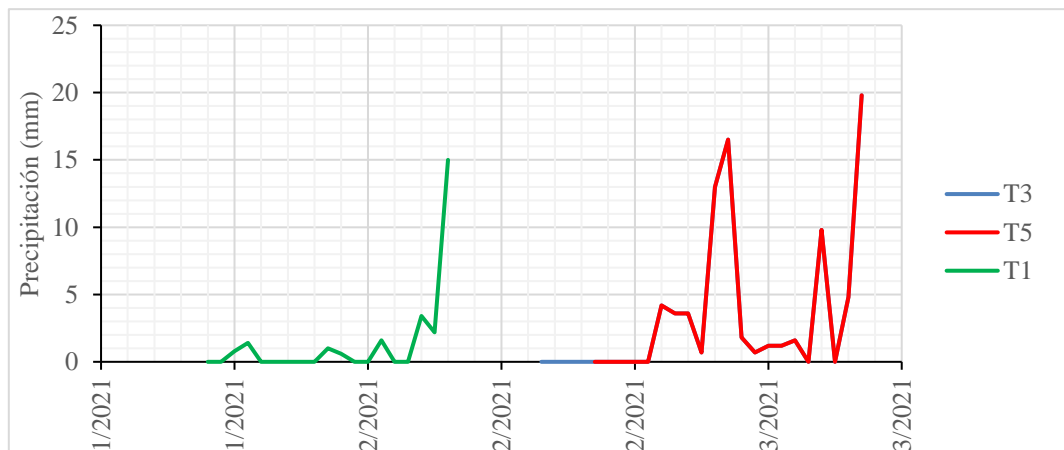
Figura 5.22. a) Fotografía del montaje de muestras para controlar el nivel del agua; b) Acondicionamiento de las muestras.

Posteriormente, se realizó un mallado con tinta de color en una de las caras del talud y en la otra se aplicó uniformemente carboncillo en polvo. Se realizaron en total 7 taludes con diferentes niveles de succión, en la Tabla 23 se muestra la descripción de cada modelo de mayor a menor humedad.

Tabla 23. Descripción de los Taludes modelados.

Modelo	Tiempo de secado (Días)	Humedad [kPa]	Succión Matricial (Ua-Uw) [kPa]
T5	20	73,4%	37,03
T7	8	71,9%	43,15
T2	9	71,4%	43,85
T3	24	70,9%	47,69
T6	11	65,7%	70,40
T4	10	62,5%	85,69
T1	18	58,4%	104,12

Como se puede observar, los números de días que duro cada modelo en el proceso de secado difiere con respecto a los demás, esto se debe a que en cada modelo se presentó diferentes condiciones ambientales, como se puede observar en la Gráfica 1 durante los días de secado del modelo T3 y T5 se presentó fuertes periodos de lluvia que no permitió el secado constante de la muestra, a diferencia del modelo T1 donde la mayor parte de tiempo se presenta un periodo seco.



Gráfica 1. Precipitación ocurrida durante los días de secado de los modelos T1, T3 y T5.

El nivel de succión alcanzado se calculó a partir de la curva SWRC determinada en la sección 5.2.1. En los siguientes modelos físicos no se presenta la de falla con mecanismos de ruptura del talud como en los modelos saturados, no obstante, a continuación, se explica de manera cualitativa lo observado después de los ensayos en la centrifuga geotécnica.

En el modelo T5, como se muestra en la Figura 5.23-c, se observa unas líneas rojas punteadas que representan la malla antes del vuelo y unas líneas continuas que representan la malla después del vuelo en centrifuga, se puede observar que se presentaron grandes deformaciones horizontales y verticales alrededor del talud. Adicionalmente, en la Figura 5.23-d se muestra el contorno del talud antes y después del vuelo en la centrifuga geotécnica (línea negra y verde respectivamente), como se observa se presenta deformación vertical en la corona del talud y deformación horizontal cerca al pie del talud.

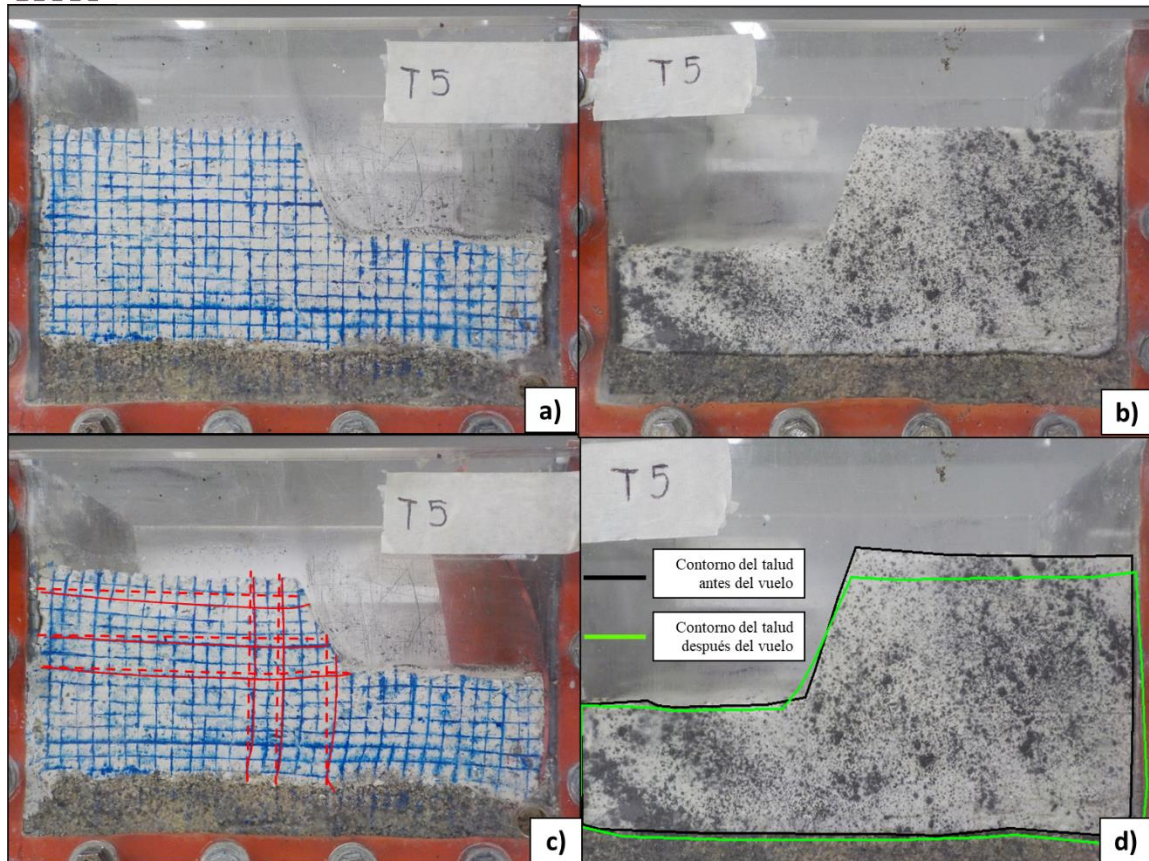


Figura 5.23. Fotografías del modelo T5 con una humedad promedio igual a 73.38%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

Al igual que en el modelo anterior las líneas rojas punteadas y continuas de la Figura 5.24-c y de la Figura 5.25-c representa el mallado antes y después del vuelo respectivamente de los modelos T7 y T2. Ambos modelos presentaron un contenido de humedad promedio similar, sin embargo, visualmente en el modelo T2 se aprecian más las deformaciones horizontales en la corona del talud (Ver Figura 5.25-c).

A diferencia del modelo T7, donde se observaron desplazamientos horizontales de menor tamaño (Ver Figura 5.24-c). Esto se debe a que el perfil de humedad de ambos modelos es diferente, y genera que se presente diferentes deformaciones, el perfil de humedad de los modelos T7 y T2 se analizado más adelante.

Adicionalmente en el modelo T7 y T2, se observa que se presentó una deformación vertical uniforme en la corona y grandes deformaciones horizontales cerca al pie del talud como se observa en la Figura 5.25-a y Figura 5.24-d. Adicionalmente se observa en la Figura 5.25-a que al unir los puntos de cambio de curvatura del mallado se puede formar superficies de falla que son representados con las líneas rojas.

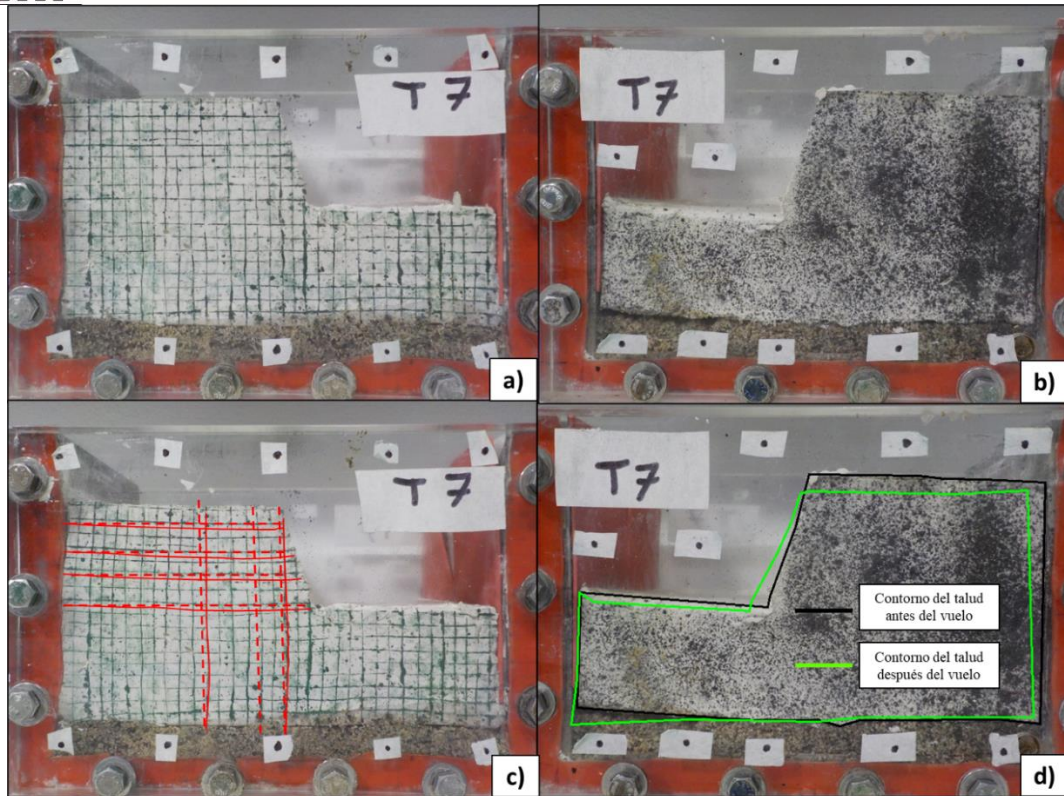


Figura 5.24. Fotografías del modelo T7 con una humedad promedio igual a 71.95%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

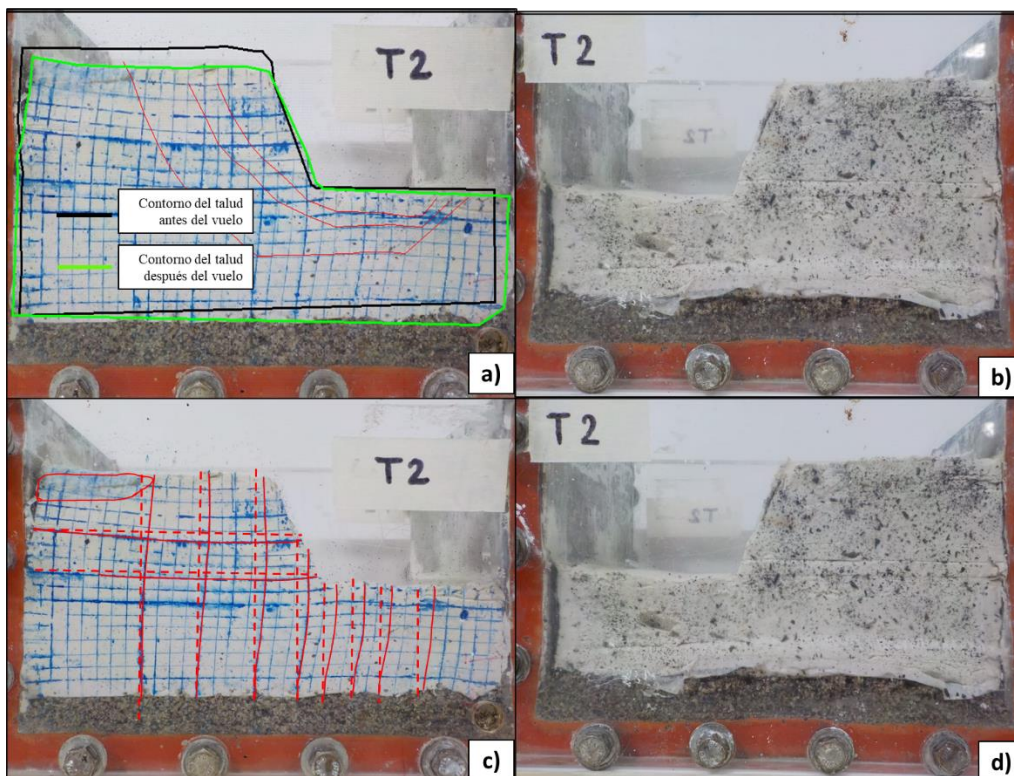


Figura 5.25. Fotografías del modelo T2 con una humedad promedio igual a 71.37%; a-c-d) Después del vuelo; b) Antes del vuelo.

En el modelo T3 con una humedad promedio igual a 70%, se observa que también se presentan grandes deformaciones alrededor del talud siendo más visibles en la Figura 5.26-c con las líneas punteadas y continuas del mallado. De la misma manera, en la Figura 5.26-d se observa una deformación vertical uniforme en la corona del talud. Estos resultados, indicarían la presencia o desarrollo de una superficie de falla profunda a lo largo de todo el talud, iniciando desde la corona hasta la base del talud.

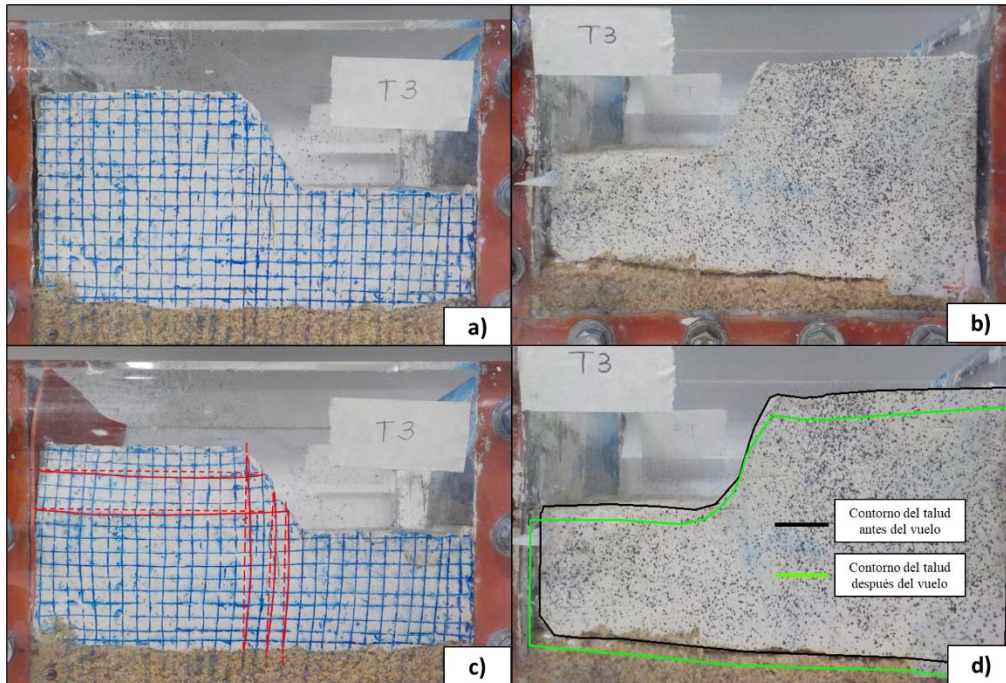


Figura 5.26 Fotografías del modelo T3 con una humedad promedio igual a 70.89%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

En el modelo T6, las fotografías antes del vuelo de la Figura 5.27 (a y b) se observan espacios vacíos en la capa de arena depositada como base del talud, las cuales después del vuelo en la centrifuga fueron llenados por el limo de alta plasticidad. Por otra parte, en la Figura 5.27-a se aprecia con los contornos que se presentaron desplazamientos horizontales en el pie y verticales en la corona del talud, así mismo en la Figura 5.27- c se aprecia con las líneas del mallado (punteada antes y continua después del vuelo) que se presenta una mayor deformación horizontal que vertical.

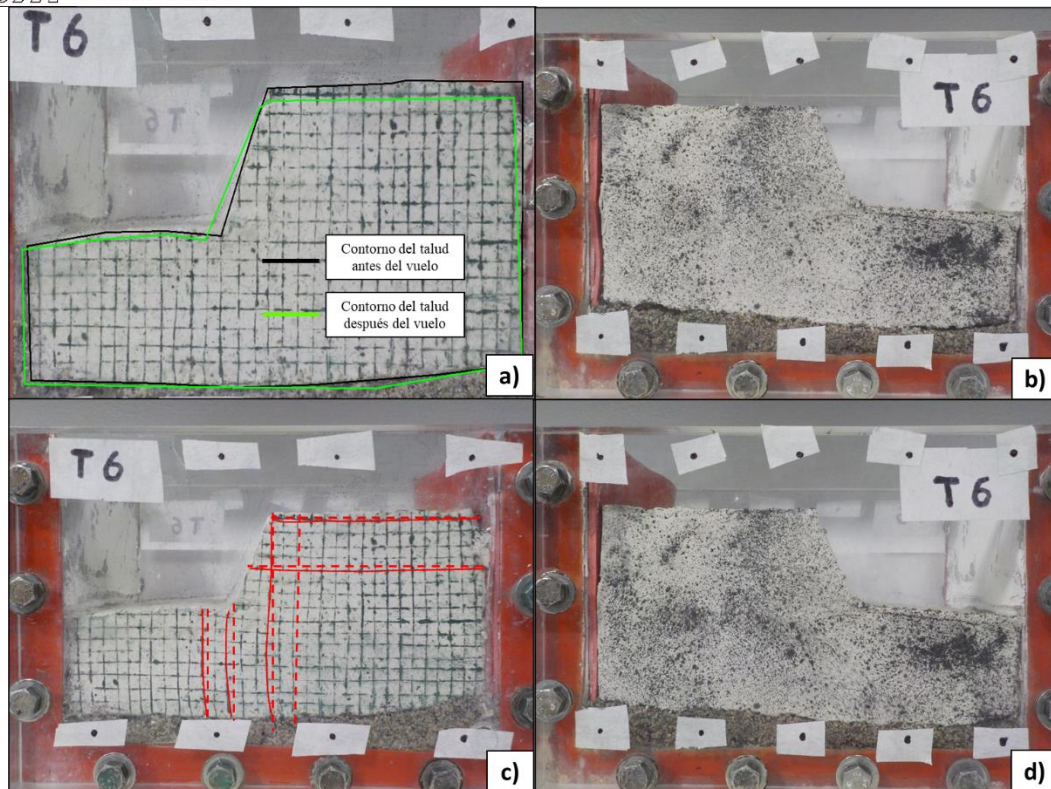


Figura 5.27. Fotografías del modelo T6 con una humedad promedio igual a 65.7%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

Finalmente, en los modelos T1 y T4, cuyas humedades son las menores, después del vuelo en la centrífuga se observaron unas grietas en el pie del talud que evidencian una falla a tracción (Figura 5.28-d y Figura 5.29-c). En estos modelos no se observan grandes deformaciones a lo largo del talud ni tampoco fallas circulares o traslacionales. Por lo cual, es necesario realizar un análisis detallado de las imágenes para comprobar la magnitud de las deformaciones.

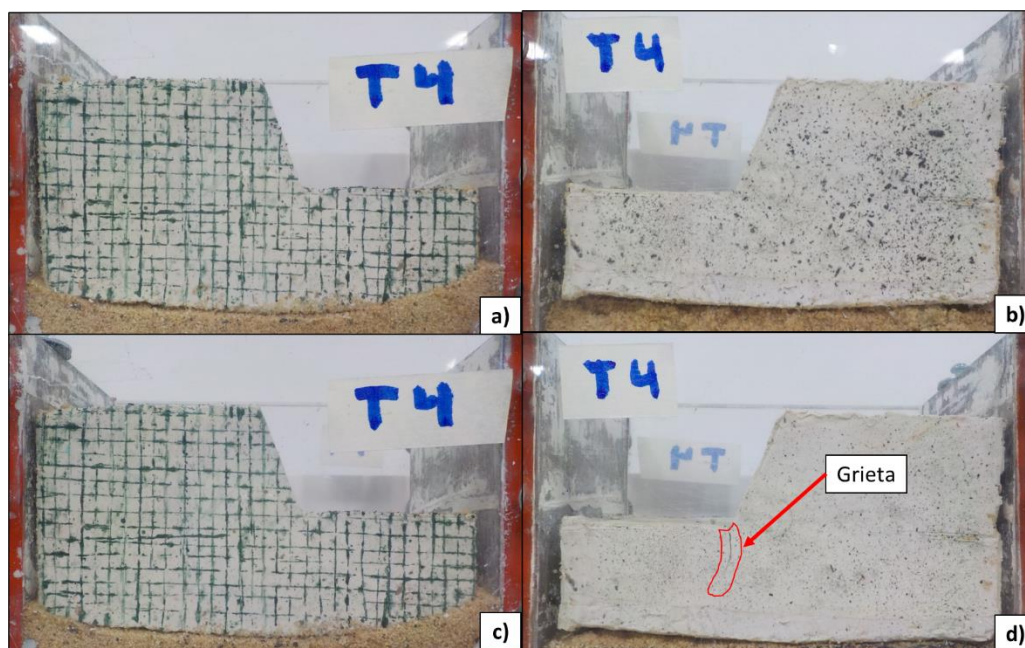


Figura 5.28. Fotografías del modelo T4 con una humedad promedio igual a 62.5%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

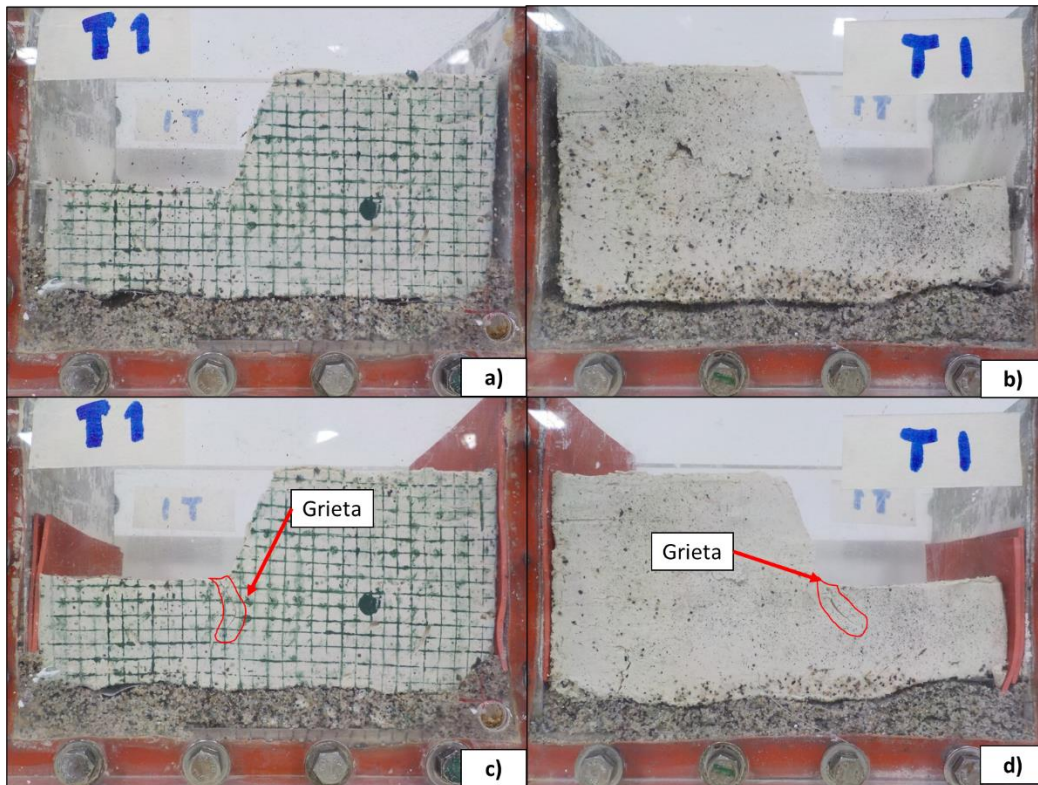


Figura 5.29. Fotografías del modelo T1 con una humedad promedio igual a 59.8%; a-b) Antes del vuelo; c-d) Después del vuelo.

Se puede concluir que en los modelos con humedades mayores al 60%, se aprecian mayores desplazamientos que en los modelos T4 y T1, sin embargo, se realizara un análisis de las magnitudes de los desplazamientos en el programa GEOPIV_RG.

Una vez realizado el ensayo en la centrífuga geotécnica se procedió a tomar muestras de suelo en 3 tramos sobre el modelo (Ver Figura 5.30), estos se denominaron Zona A, Zona B y Zona C. En cada una de estas zonas se tomaron tres puntos de humedad con excepción de la parte baja del talud (Zona C2-C3) que solo se tomaron dos puntos de contenido de agua.

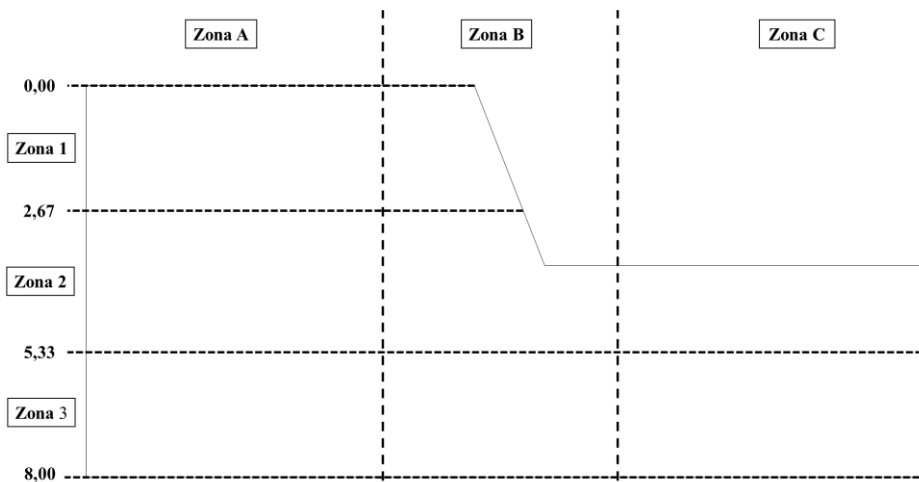


Figura 5.30. Esquema de toma de muestras en los modelos físicos.

Para calcular la variación de succión que se genera en el modelo, se determinó la succión en cada punto de muestreo y posteriormente se calcula la diferencia con respecto a la succión promedio que se genera en el modelo (Ecuación 47).

$$\text{Variación de succión matricial} = |\psi_m[w_{prom}] - \psi_{mi}[w_i]| \quad [47]$$

Donde:

$\psi_m[w_{prom}]$: Succión matricial con el contenido de humedad promedio de cada modelo (w_{prom})

$\psi_{mi}[w_i]$: Succión matricial en el punto de muestreo (w_i)

En la Tabla 24 se muestra la diferencia máxima presentada del contenido de humedad de cada modelo físico con respecto al valor promedio y la variación de succión matricial que se generaría.

Tabla 24. Diferencia del contenido de agua y aporte de succión matricial obtenida de los modelos físicos.

Modelo	Humedad promedio (%)	Diferencia en el contenido de humedad (%)	Variación de succión Matricial (kPa)
T1	58,4%	1.2%	7.01
T2	71,4%	1.75%	7.50
T3	70,9%	1.69%	7.26
T4	62,5%	1.38%	6.97
T5	73,4%	1.87%	8.00
T6	65,7%	1.57%	7.3
T7	71,9%	7.62%	33.8

En la Figura 5.31 se observa que los perfiles de humedad obtenidos en cada modelo físico no tienen una variación mayor al 2 %, lo que indicaría que en dichos modelos se presentó una homogeneidad durante el secado, con excepción del modelo T7 (Figura 5.31-g), en el cual se tiene una diferencia cercana al 7%.

Según Ling et al.(2009) en su investigación de estabilidad de taludes, los suelos finos tienden a retener un contenido de agua más uniforme a lo largo de la altura del talud, lo cual concuerda con la mayoría de los modelos presentados en este estudio.

Sin embargo, el modelo T7 pudo presentar esa diferencia de humedad debido al fenómeno de tubos capilares en el que el ascenso capilar no ocurre uniformemente, sino por trayectorias con diferentes alturas (Mirshekari et al., 2018) que se presentan debido a la heterogeneidad del suelo. Por lo tanto, se sospechó que los menores desplazamientos obtenidos en la corona del modelo T7, se deben a la diferencia de contenido de agua que se presenta en la parte alta del talud (Zona A2) y que genero un mayor aporte de succión matricial localizado.

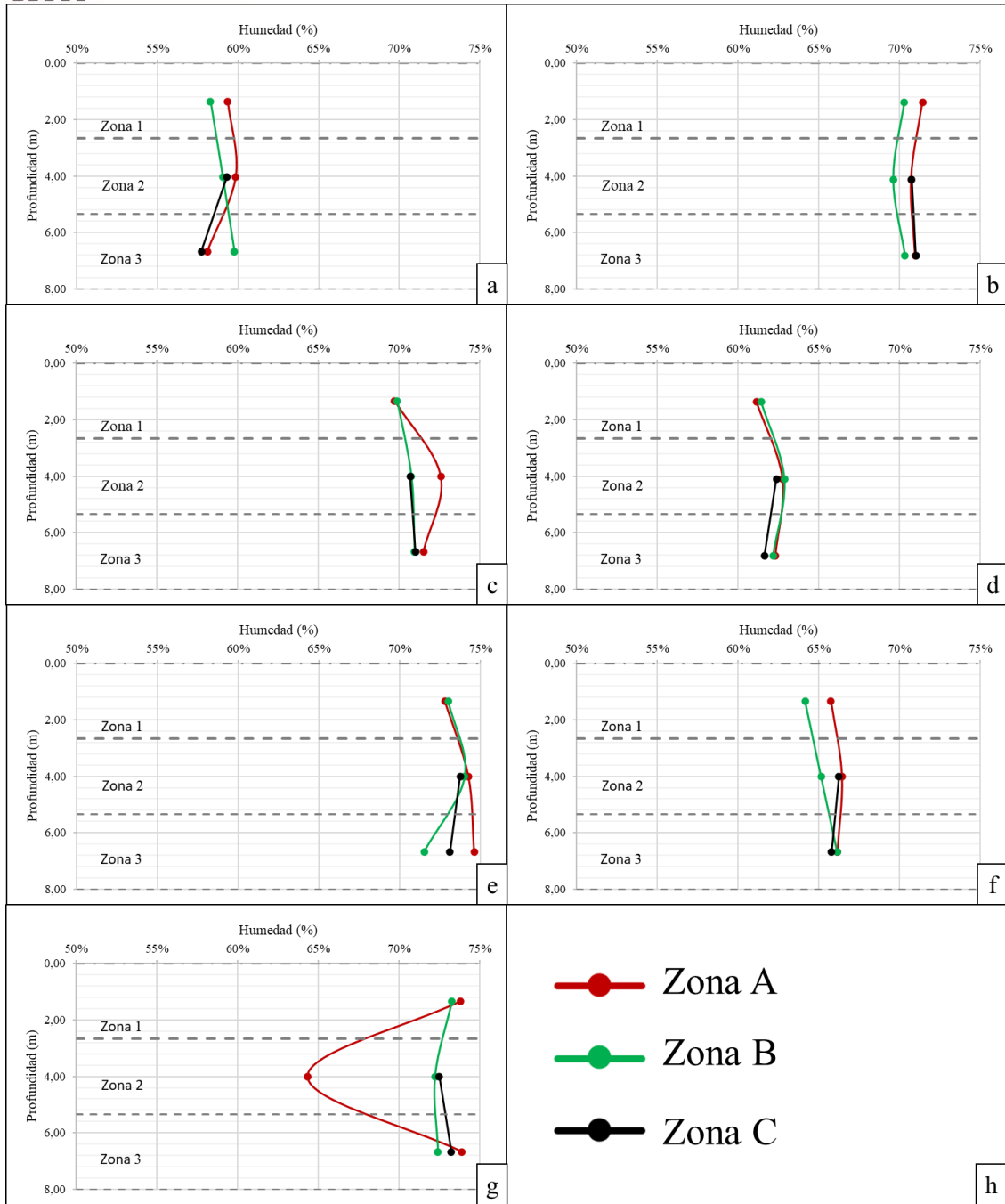


Figura 5.31. Perfiles de Humedad en los modelos en escala prototipo; a) Perfil de Humedad Modelo T1; b) Perfil de Humedad Modelo T2; c) Perfil de Humedad Modelo T3; d) Perfil de Humedad Modelo T4; e) Perfil de Humedad Modelo T5; f) Perfil de Humedad Modelo T6; g) a) Perfil de Humedad Modelo T7; h) Leyenda de graficas.

Según Terzaghi & Peck (1967) la siguiente expresión permite estimar la altura capilar por medio de la curva granulométrica de un suelo, en esta se hace uso del tamaño de partícula D10, la relación de vacíos (e) y un parámetro C el cual tiene valores entre 10 mm² y 50 mm².

$$h_c = \frac{C}{e d_{10}} \quad [48]$$

Dado a que la estimación de la altura capilar es una simple aproximación del valor real que se obtendrá en los modelos a escala reducida, se decidió tomar un valor de C igual a 10 mm² y una relación de vacíos igual a 2.02 valor tomado según el ensayo de consolidación para un esfuerzo final de 30 kPa.

$$h_c [m] = \frac{10}{2.02 * 6 * 10^{-4}} * \frac{1}{1000}$$

$$h_c = 8.25 \text{ m}$$

Esta altura capilar se logra a una condición en escala real prototipo, sin embargo, como se realizará un modelo escalado a 100 gravedades el valor de la altura capilar en el modelo se estima que sea igual a:

$$h_c = \frac{8.25}{100} = 0.08 \text{ m} = 8.25 \text{ cm}$$

Esta altura capilar sería igual a la altura del modelo y por lo tanto se tendría que haber obtenido un perfil de humedad saturado, dado a que no se obtuvo eso, indicaría que no se logró obtener un equilibrio capilar completo. No obstante, se pudo presentar un leve incremento de humedad sobre las zonas 1 y 2 (Ver Figura 5.30), debido a que en esas zonas se esperaba un contenido de humedad inferior al promedio por su cercanía a la superficie del talud.

5.5 Análisis de Imagen

Con las fotografías tomadas antes y después del vuelo en la centrífuga, se realiza un procesamiento de las imágenes con el fin de identificar los desplazamientos que se generen sobre el talud. Este procesamiento se realiza con el programa GEO-PIV_RG, el cual identifica el recorrido de los píxeles en una serie de fotografías.

Identificado el recorrido de cada píxel, se genera una matriz de vectores que representa los desplazamientos generados durante el vuelo. Una vez determinado los vectores, el cálculo de los desplazamientos en unidades métricas se genera por el promedio de las relaciones entre el ancho del talud - número de píxeles en el ancho del talud y la altura del talud – número de píxeles en la altura del talud.

Cabe destacar, que según la norma sismo resistente (NSR-10) las deformaciones máximas tolerables para cimentaciones son de 15 cm, de igual manera en la práctica cuando se instrumenta un talud con inclinómetros, el valor de alarma contra deslizamiento o movimiento del talud es de 2 cm. Por lo tanto, para este estudio se consideró que los desplazamientos mayores a 15 cm en escala prototipo indican que los taludes fallaron, a si no presente un mecanismo de ruptura de corte claro.

A continuación, se muestran las imágenes obtenidas con el programa GeoPIV_RG y se explican las magnitudes de los desplazamientos obtenidas en el análisis de imagen de cada modelo. Para poder analizar el efecto de la succión entre los modelos sin y con secado se realizó el análisis de imagen con los modelos MV5 y MV6 que no se les permitió un secado de los taludes.

Los análisis de imagen realizados en ambos modelos evidencian que se generó una superficie de falla de base con desplazamientos totales del orden de 160 y 200 cm en escala prototipo. Así mismo como se evidencia en la Figura 5.32-a y Figura 5.33-a los vectores de desplazamientos indican un movimiento del suelo desde la corona hasta delante del pie de los taludes, esto mismo se evidencia en la Figura 5.32-d y la Figura 5.33-d.

Adicionalmente, en la Figura 5.32-b y Figura 5.33-b se puede observar que en estos dos modelos se generan grandes desplazamientos horizontales alrededor de la pendiente, del orden de 100 y 120 cm en escala prototipo, evidenciando nuevamente con los contornos de desplazamientos que se genera una superficie de falla rotacional de base.

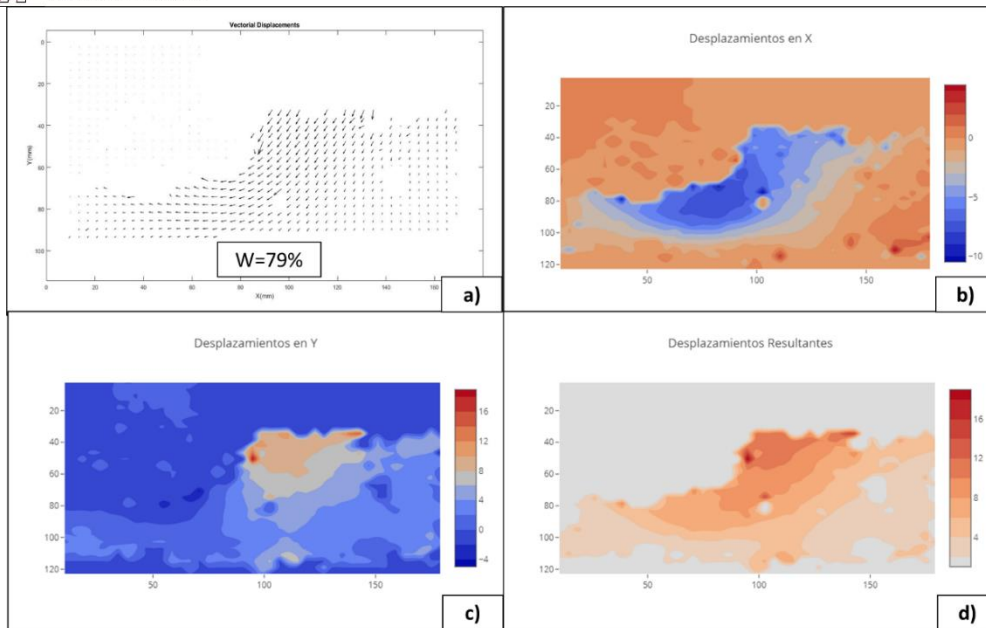


Figura 5.32. Procesamiento de las fotografías del modelo MV5(Humedad 79%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamientos en Y; d) Desplazamientos Totales.

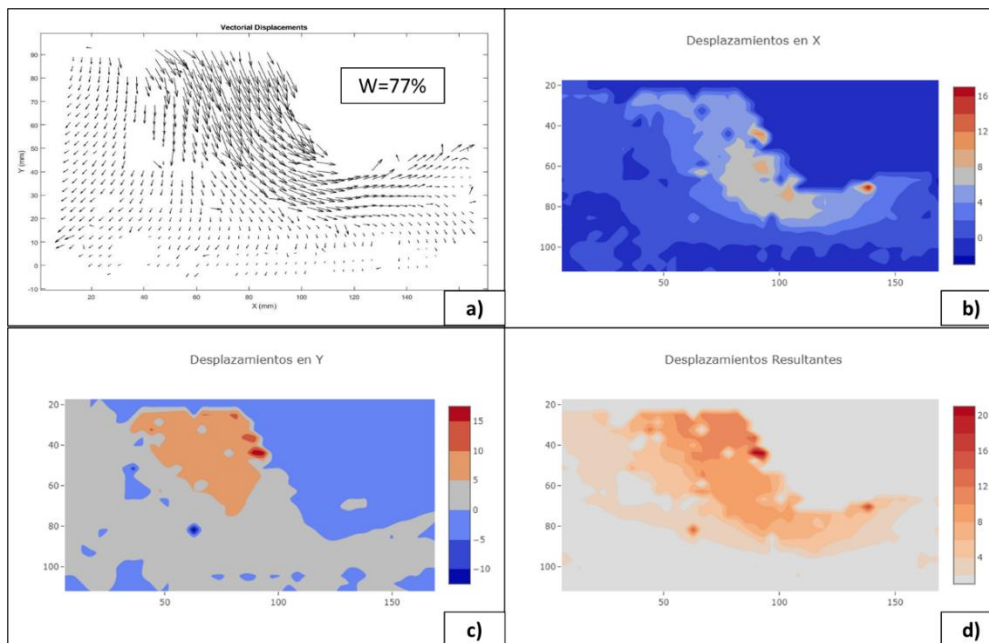


Figura 5.33. Procesamiento de las fotografías del modelo MV6 (Humedad 77%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

El análisis de imagen realizado para los modelos T5 y T7, se muestran en la Figura 5.34 y la Figura 5.35 respectivamente. Estos modelos presentaron deformaciones horizontales grandes del orden de 30 cm y 40 cm en escala prototipo, sin embargo, estos desplazamientos son considerablemente menores a los presentados en los modelos anteriores. Adicionalmente, en ambos modelos no se observa que se generarán mecanismos de falla abrupta de corte como en los modelos saturados.

Es de resaltar, que en ambos modelos el contorno de desplazamientos totales se genera alrededor de la pendiente de cada talud, evidenciando el desarrollo de una superficie de falla que no se completa totalmente. Los contornos de ambos modelos muestran que el desarrollo de la superficie

de falla inicia en la corona del talud, con grandes desplazamientos verticales, y terminan debajo del pie del talud con menores desplazamientos, es decir que no se tiene un movimiento de masa de suelo completo uniforme. Lo anterior se observa en la Figura 5.34-d y la Figura 5.35-d.

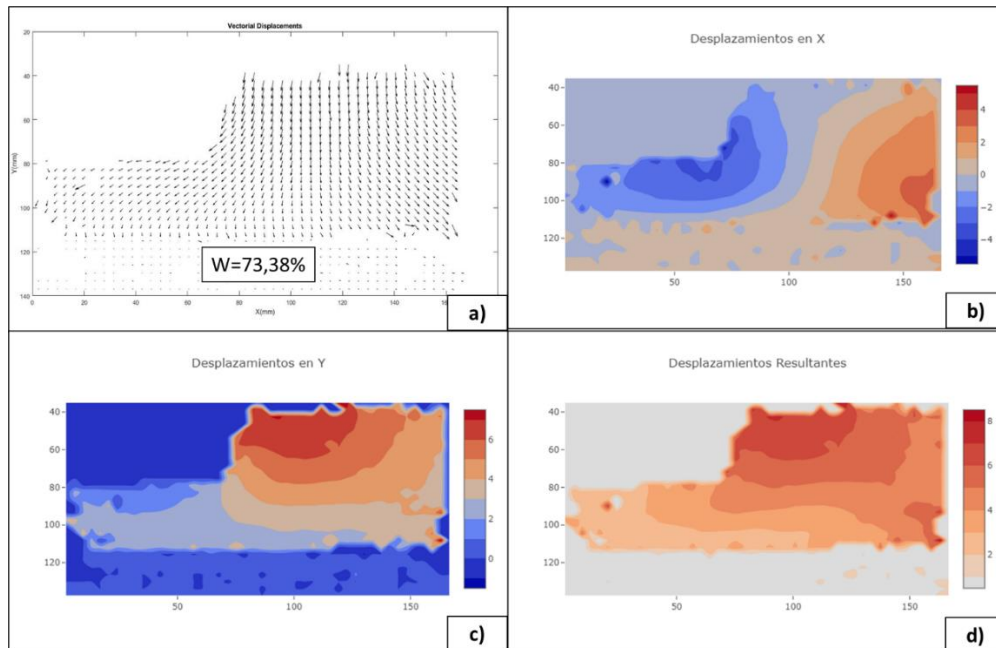


Figura 5.34. Procesamiento de las fotografías del modelo T5 (Humedad 73.38%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

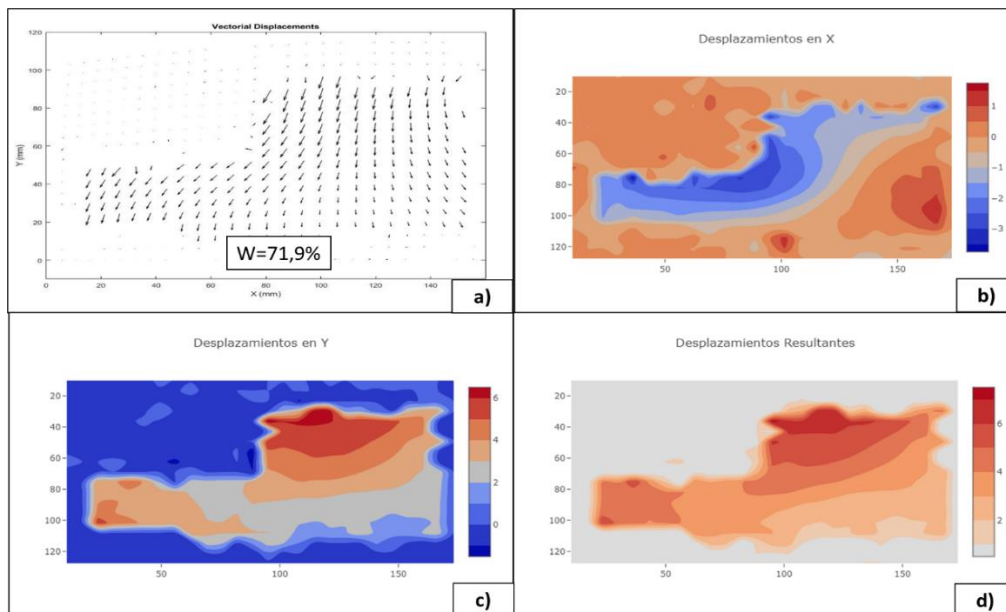


Figura 5.35. Procesamiento de las fotografías del modelo T7 (Humedad 71.9%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

Al igual que los modelos anteriores, en el modelo T2 el contorno de desplazamientos totales muestra el desarrollo de una superficie de falla, en el cual los máximos desplazamientos inician en la corona del talud y van disminuyendo a medida que llegan al pie del talud (Ver Figura 5.36-d). Esto indicaría que a medida que va disminuyendo la humedad, es decir, a mayores niveles de succión, la superficie de falla tarda más en desarrollarse o no se completa.

Cabe resaltar que a pesar de que las superficies de falla no se generan por completo, se alcanzan a generar grandes deformaciones que en la práctica se considerarían inaceptables y marcarían un signo de alerta de falla del talud. En el modelo T2 se obtuvieron deformaciones horizontales máximas de 40-60 cm, deformaciones verticales máximas de 60 cm y deformaciones totales máximas de 80 y 60 cm, en escala prototipo.

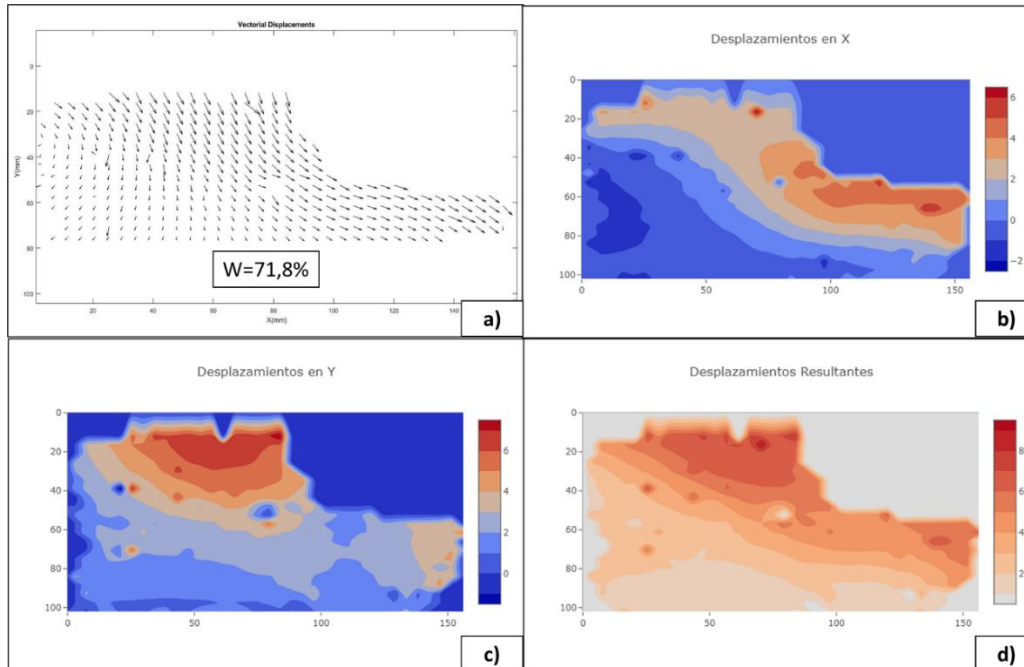


Figura 5.36. Procesamiento de las fotografías del modelo T2 (Humedad 71.8%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

En el modelo T3 se presentan deformaciones totales de magnitudes de 80 a 60 cm en escala prototipo alrededor del talud, por lo cual se considera que el modelo T3 también falla sin presentar algún mecanismo de ruptura de corte como el evidenciado en los modelos saturados MV5 y MV6.

En la Figura 5.37-c se confirma que en la corona del talud se generó un desplazamiento vertical uniforme de magnitud de 60 cm en escala prototipo, que sumado a los desplazamientos horizontales genera una superficie de falla en desarrollo que se ve claramente en la Figura 5.37-d. El contorno de desplazamientos totales de la Figura 5.37-d. muestra el desarrollo de la superficie de falla que se genera alrededor del talud iniciando desde la corona hasta llegar debajo del pie del talud.

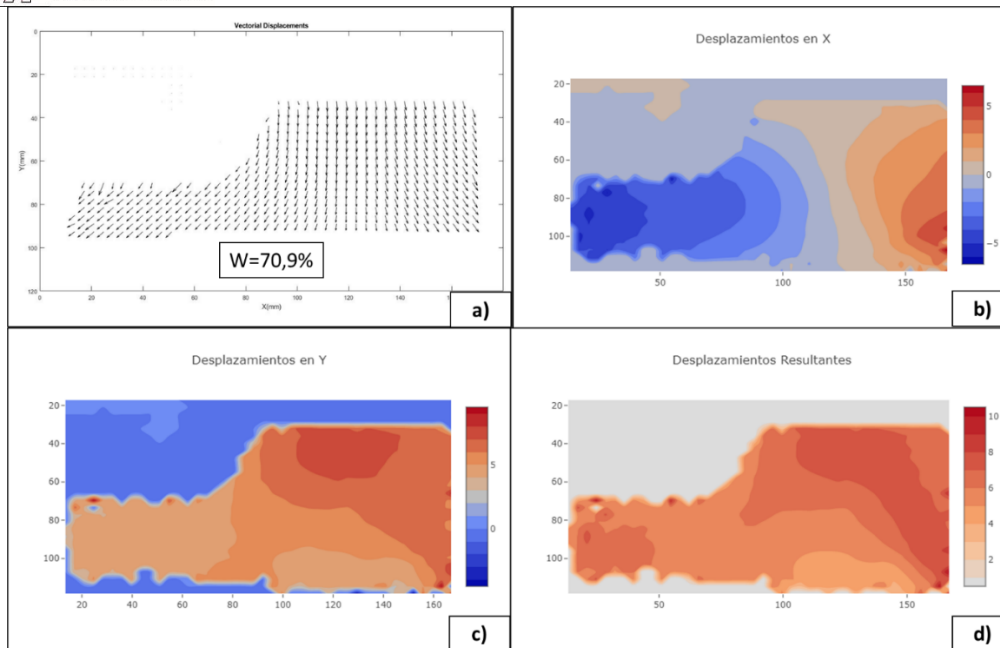


Figura 5.37. Procesamiento de las fotografías del modelo T3 (Humedad 70.9%); a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

Como se muestra en la Figura 5.38-a, los vectores de desplazamientos en el modelo T6 indican que alrededor del talud se presentaron desplazamientos muy grandes, con magnitudes del orden 60 a 40 cm en escala prototipo.

Al igual que en los otros modelos, como se observa en la Figura 5.38-b en el modelo T6 se presentan desplazamientos hacia los costados de la caja de acrílico. Lo anterior se debe a los espacios vacíos que se generaron por la contracción del material que conforma el talud y que no se rellenan con algún otro material.

En Figura 5.38-c se observa que desde la corona del talud se presentan desplazamientos verticales de 5 mm, que en escala prototipo sería alrededor de 50 cm, esto indica una disminución de los desplazamientos ocurridos alrededor del talud con respecto a los modelos que no tuvieron un periodo de secado.

Adicionalmente, en la Figura 5.38-d se observa como el contorno de desplazamientos totales muestra el desarrollo de la superficie de falla a lo largo del talud, sin embargo, esta superficie de falla no se desarrolla completamente.

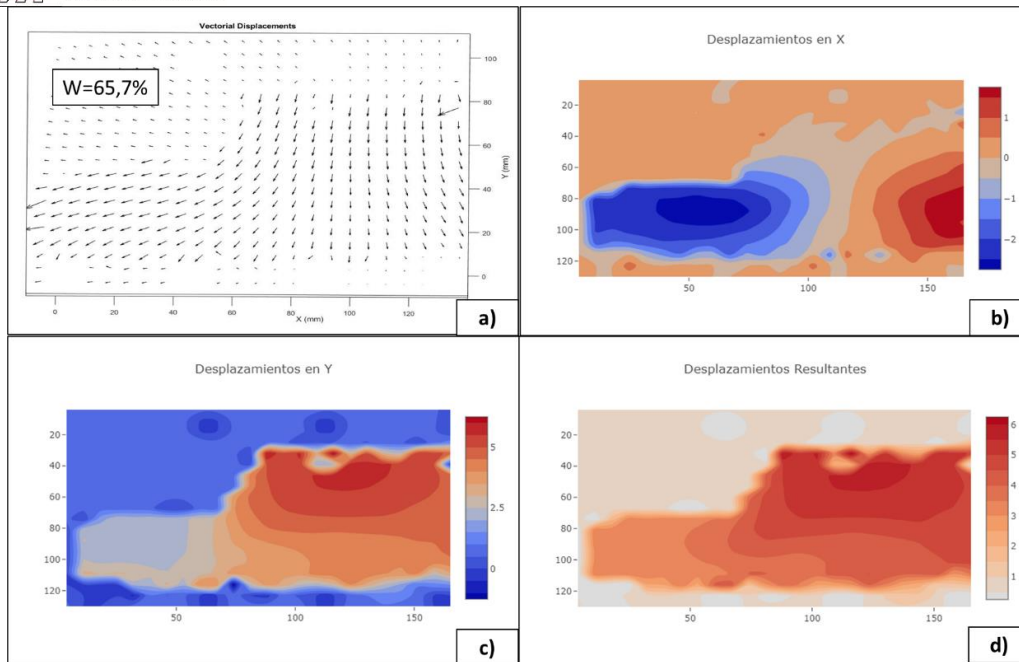


Figura 5.38. Procesamiento de las fotografías del modelo T6; a) Vectores de desplazamiento; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

Como se muestra en la Figura 5.39-a y b en modelo T4 también se presentan desplazamientos horizontales de signos contrarios, pero de menor magnitud, entre 40 y 20 cm a escala prototipo. Así mismo, los desplazamientos verticales en el pie del talud fueron muy pequeños, generando un contorno alrededor de la zona donde se presentó la grieta a tracción.

A pesar de que los desplazamientos en el modelo T4 son pequeños, en comparación de los otros modelos, se presentó una diferencia de desplazamientos totales entre el costado izquierdo y derecho del modelo, que combinado con la rigidez del suelo posiblemente provoco que se generen una concentración de esfuerzos en el pie del talud y provocara la grieta que se observa en el modelo (Ver Figura 5.28).

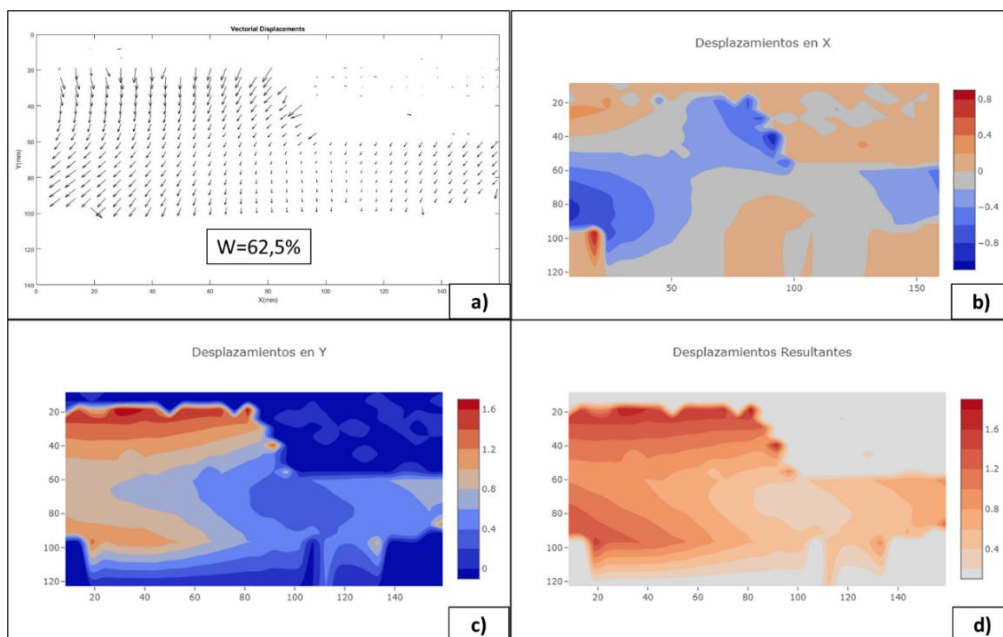


Figura 5.39. Procesamiento de las fotografías del modelo T4; a) Vectores de desplazamientos; b) Desplazamientos en X; c) Desplazamiento en Y; d) Desplazamiento Totales.

Como se observa en la Figura 5.40-b, en el modelo T1 los desplazamientos horizontales que se formaron en el talud tienen signos opuestos, lo anterior también se observa en la Figura 5.40-a. Al igual que en el modelo T4 los desplazamientos en el costado derecho e izquierdo del modelo tienen diferente dirección y magnitud, esto indicaría que a una humedad promedio del 60% los taludes al tener una rigidez tan alta son susceptibles a las deformaciones diferenciales.

En cuanto al contorno de desplazamientos verticales (Figura 5.40-c) se observa que se presentaron grandes deformaciones en los costados extremos, pero ninguno en el pie del talud, siendo este último el sitio donde se generó la grieta. Es importante señalar que en los modelos T4 y T1 alrededor del talud no se generaron desplazamientos que indiquen la formación de una superficie de falla.

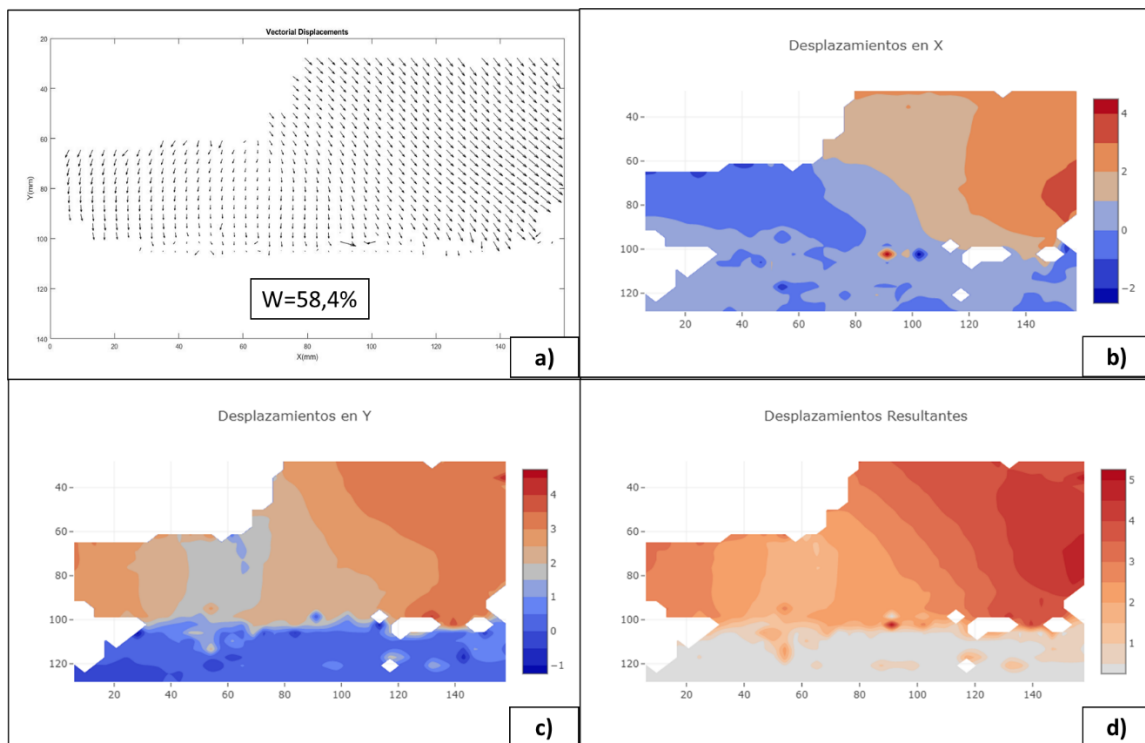


Figura 5.40. Procesamiento de las fotografías del Modelo T1; a) Vectores de desplazamientos; b) Desplazamientos en X (mm); c) Desplazamiento en Y (mm); d) Desplazamiento Totales (mm).

Con base a lo anterior, es posible que la alta plasticidad del material de estudio permitió que se generaran grandes deformaciones al tener contenidos de humedad altos (>60%), sin embargo, el aporte de la succión matricial no permite que los modelos fallen abruptamente. Al tener contenidos de humedad menores al 60%, el suelo obtiene una mayor rigidez que provoca que sea susceptible a las deformaciones diferenciales.

De este procesamiento se obtuvieron los máximos desplazamientos que se presentaron alrededor de los taludes, los cuales se muestran en la Tabla 25, en estos se pueden observar que para mayor nivel de succión se presentan menores desplazamientos en los taludes, con excepción del modelo T1

Tabla 25. Desplazamientos máximos generados alrededor del talud después del vuelo en la centrifuga geotécnica (En escala Prototipo).

Modelo	Humedad (%)	Succión matricial (kPa)	Desp,Max. Hor (cm)	Desp. Max. Vert (cm)	Desp. Max. Total (cm)
MV5	79%	9,80	94,6	93,4	116,4
MV6	77%	20,76	86,4	88,7	103
T5	73,4%	37,03	40	65	75
T7	71,9%	43,15	30	60	70
T2	71,8%	43,85	40,5	69	61,8
T3	70,9%	47,69	23,6	70,5	70
T6	65,7%	70,40	27,7	60	59,5
T4	62,5%	85,69	8	14	15
T1	58,4%	104,12	17,6	31,4	36,6

En la Figura 5.41 se muestran las regresiones que mejor se ajustaron a los datos recopilados experimentalmente, de los cuales los desplazamientos verticales son los más cercanos a los desplazamientos totales, por lo tanto, se puede decir que los desplazamientos verticales dominan el movimiento final del suelo. Adicionalmente, se identificó que a niveles de succión inferiores de 30 kPa se presentó un mecanismo de falla abrupto de corte, sin embargo, a niveles más altos de succión se presentan desplazamientos menores.

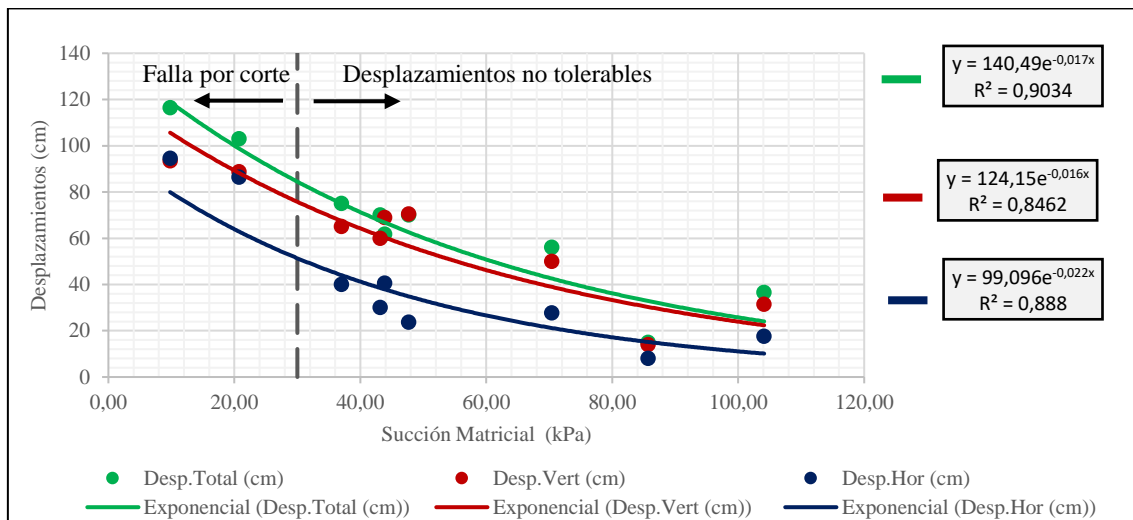


Figura 5.41. Desplazamientos máximos obtenidos de los modelos físicos en escala prototipo.

Mas adelante se comparará las magnitudes de los desplazamientos obtenidos en las modelaciones físicas con las modelaciones numéricas teniendo en cuenta la descripción del limo de alta plasticidad parcialmente saturado.

5.6 Modelación numérica.

Las modelaciones numéricas se realizaron en el programa SLIDE 6.0 y en PHASE² 8.0 de Rocscience y utilizando el criterio de falla de Mohr Coulomb (Ecuación [49]), para ello se utilizaron los parámetros de resistencia del suelo parcialmente saturado hallados en la sección 5.2.

Se realizaron dos tipos de modelaciones:

1. En términos de esfuerzos totales: Tomando la resistencia al corte no drenado de los taludes utilizando la regresión lineal de la Figura 5.13 y $f_i=0$.
2. En términos de esfuerzos efectivos: Tomando un ángulo de fricción (ϕ') igual a 24° y una cohesión total tomando en cuenta el aporte de la succión de la siguiente manera:

$$\tau = c'_t + \sigma_n \tan(\phi') \quad [49]$$

$$c'_t = c' + (Ua - Uw) \tan(\phi_b) \quad [50]$$

Donde:

c' = cohesión efectiva $c'=5.5$ kPa

c'_t : Cohesión efectiva total debida a la cohesión efectiva y al aporte de la succión.

$(Ua-Uw)$ = Nivel de succión generado a cada talud y determinado con la curva de retención de humedad ajustada en la sección 5.2.1.

ϕ_b : Angulo de fricción con respecto al cambio en la succión matricial =21.6.

5.6.1 Modelación en Slide 6.0

En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos en las modelaciones en el software Slide. En esta tabla se muestra que en la modelación en términos de esfuerzos totales algunos modelos fallan, específicamente los modelos T2, T3, T5 y T7 que tienen un factor de seguridad cercano, igual o menor a 1.0. Lo anterior podría concordar con las modelaciones físicas donde se presentaron grandes desplazamientos, pero sin alguna ruptura de corte aparente, por lo cual es necesario realizar las modelaciones en Phase² donde se modelen los desplazamientos para compararlas con las modelaciones físicas.

En cuanto al segundo tipo de modelación, los factores de seguridad obtenidos son más altos y no son cercanos a uno, por lo cual en estas modelaciones ningún modelo fallaría y solo se generarían deformaciones de menor tamaño, lo cual no concuerda con lo observado en las modelaciones físicas.

Tabla 26. Factores de seguridad mínimos obtenidos en SLIDE de taludes con diferentes niveles de succión

TALUDES			Cu y $\phi' = 0$		Estimada [kPa]	c_t y $\phi' = 24$	
Modelo	Humedad	(Ua-Uw) kPa	Cu (kPa)	F. S	(Ua-Uw) $\tan(\phi_b)$	$c_t = c' + (Ua-Uw) \tan(\phi_b)$	F.S
T1	58,4%	107,2	48,22	<u>3,48</u>	42,41	46,70	<u>3,80</u>
T2	71,8%	43,9	13,83	<u>0,99</u>	17,35	22,85	<u>2,15</u>
T3	70,9%	47,7	16,24	<u>1,16</u>	18,87	24,37	<u>2,20</u>
T4	63%	85,7	38,72	<u>3,00</u>	33,91	39,41	<u>3,58</u>
T5	73,4%	37,0	9,54	<u>0,81</u>	14,65	20,15	<u>2,15</u>
T6	65,7%	70,4	30,09	<u>2,20</u>	27,86	33,36	<u>2,98</u>
T7	71,9%	43,2	13,39	<u>1,05</u>	17,08	22,58	<u>2,22</u>
MV-6	77%	20,8	7,64	<u>0,63</u>	8,21	13,71	<u>1,72</u>
MV-5	79%	9,8	7,64	<u>0,63</u>	3,88	9,38	<u>1,32</u>

Al graficar los factores de seguridad en función de la succión matricial, se observa que al aumentar la succión matricial aumenta linealmente el factor de seguridad para el suelo estudiado, lo anterior se muestra en la Figura 5.42 con los respectivos coeficientes de correlación R^2 que son mayores a 0.9.

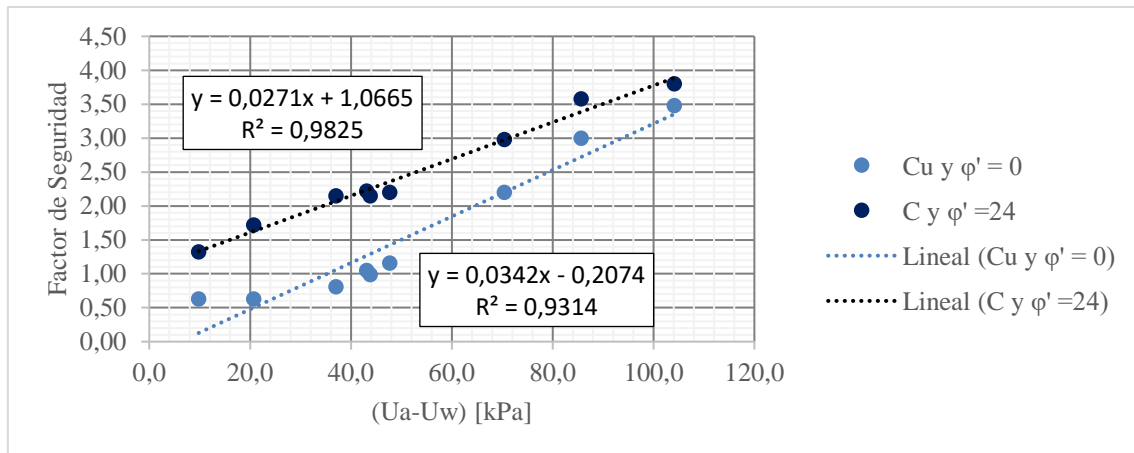


Figura 5.42. Factores de seguridad en función de la succión matricial. Software Slide.

Estos resultados concuerdan con modelaciones realizadas por Griffiths & Lu (2005) en suelos arcillosos con succión, donde al aumentar la profundidad del nivel freático el factor de seguridad aumenta linealmente.

5.6.2 Modelación en Phase²

La modelación numérica en Phase² se realizó con los dos tipos de modelación, es decir, en términos de esfuerzos totales y en términos efectivos con los parámetros que se indicaron al inicio de la sección 5.6. Para ambos tipos de modelaciones se introdujo adicionalmente el módulo de elasticidad (E), el cual varía dependiendo el nivel de succión.

El módulo de elasticidad saturado (E_{sat}) se calculó a partir del ensayo triaxial CU y el ensayo de compresión inconfiada para una muestra de humedad igual a 74%, en la cual se obtuvo valores iguales a $E_{sat}=833$ kPa y 309 kPa respectivamente. De estos dos ensayos se obtiene que el módulo de elasticidad obtenido en el ensayo triaxial es 2.69 veces el valor obtenido en el ensayo de compresión simple.

$$E_{Triax} = 2.69 * E_{Inc}$$

El valor del módulo de elasticidad parcialmente saturado E_{unsat} utilizado en los modelos numéricos, se obtuvo a partir de esta relación, asumiendo que el valor del módulo de elasticidad parcialmente saturado en un ensayo triaxial es igual a 2.69 veces el obtenido en un ensayo de compresión simple. De estos valores se obtuvo un ajuste lineal que se muestra en la Figura 5.43, el cual se utilizó para determinar los módulos de elasticidad parcialmente saturado E_{unsat} en los modelos numéricos.

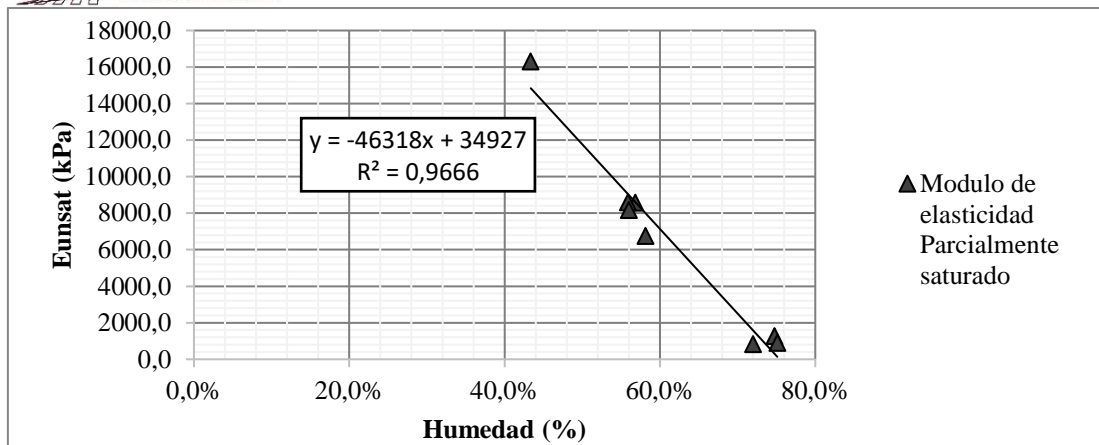


Figura 5.43 Módulo de elasticidad en función del contenido de Humedad.

Tabla 27. Parámetros introducidos en el programa Phase².

Modelo	Humedad	(U _a -U _w)	C _u (kPa) y $\phi' = 0$	$c = c' + (U_a - U_w) \tan(\phi_b)$ y $\phi' = 24$	E _{unsat} [kPa]
T1	58,4%	104,1	48,22	47,91	7612,02
T2	71,8%	43,9	13,83	22,85	1677,40
T3	70,9%	47,7	16,24	24,37	2093,49
T4	63%	85,7	38,72	39,41	5973,02
T5	73,4%	37,0	9,54	20,15	938,30
T6	65,7%	70,4	30,09	33,36	4484,09
T7	71,9%	43,2	13,39	22,58	1601,46
MV-6	77%	20,8	7,64	13,71	833*
MV-5	79%	9,8	7,64	9,38	833*

Según la regresión lineal obtenida en la Figura 5.13 la resistencia al corte no drenado es igual a cero en los modelos MV5 y MV6, por lo tanto, para estos ensayos se toma la resistencia al corte no drenado igual a 7.64 kPa, el cual fue el valor obtenido en el ensayo de compresión simple para la muestra saturada. Los desplazamientos obtenidos alrededor de los taludes se muestran en la Tabla 28 y Tabla 29.

Tabla 28. Resultados obtenidos en las modelaciones numéricas en Phase² en termino de esfuerzos totales.

MODELO	%W	(U _a -U _w)	Def. Max Cort	Desp. Max Hor (cm)	Desp. Max Vert (cm)	Desp. Max Total (cm)
T1	58,4%	104,12	0,051	5,1	3	5,1
T2	71,8%	43,85	0,21	34	20	34
T3	70,9%	47,69	0,25	10,5	6	10,5
T4	62,5%	85,69	0,07	6	3,6	6
T5	73,4%	37,03	0,4	32	19,5	32
T6	65,7%	70,40	0,108	9	5,7	9
T7	71,9%	43,15	0,25	18	11,4	18
MV6	77%	20,76	0,3	30	15,2	30

Tabla 29. Resultados obtenidos en las modelaciones numéricas tipo 2 en Phase² en termino de esfuerzos efectivos.

MODELO	%W	(Ua-Uw)	Def. Max Cort	Desp. Max Hor (cm)	Desp. Max Vert (cm)	Desp. Max Total (cm)
T1	58,4%	104,12	0,03	3,2	2,25	3,2
T2	71,8%	43,85	0,119	10,5	6,65	0,11
T3	70,9%	47,69	0,14	7,6	4,5	8
T4	62,5%	85,69	0,0425	3,2	1,9	3,2
T5	73,4%	37,03	0,165	11,4	6,66	11,4
T6	65,7%	70,40	0,04	5	3	4
T7	71,9%	43,15	0,1235	8,5	5,1	9
MV6	77%	20,76	0,15	12	6,8	12
MV5	79%	9,80	0,15	10,5	7,2	11

Al graficar estos resultados en función de la succión matricial experimentada en cada talud y compararlos con los obtenidos de las modelaciones físicas, se observa que la modelación en términos de esfuerzos totales es la que más se asemeja al comportamiento.

Adicionalmente, los puntos obtenidos en las modelaciones numéricas y física se ajustaron con la línea de tendencia que mejor las representaran, dando como resultado las ecuaciones que se muestran en la Figura 5.44, Figura 5.45 y en la Figura 5.46.

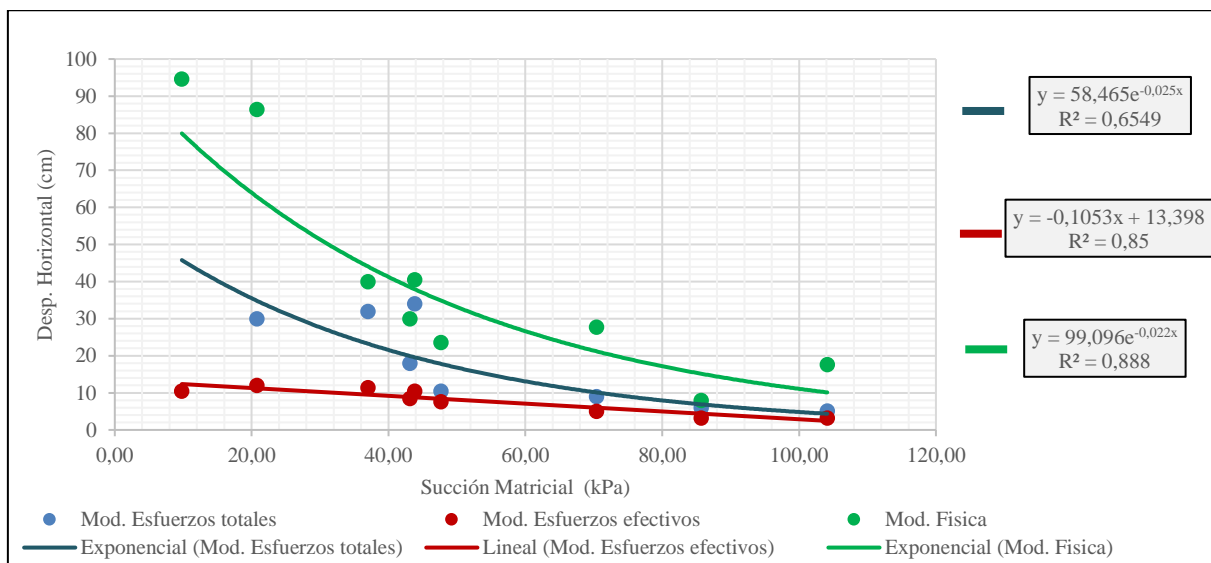


Figura 5.44. Desplazamientos máximos horizontales obtenidos en la modelación en Phase² y en las modelaciones físicas en escala prototipo

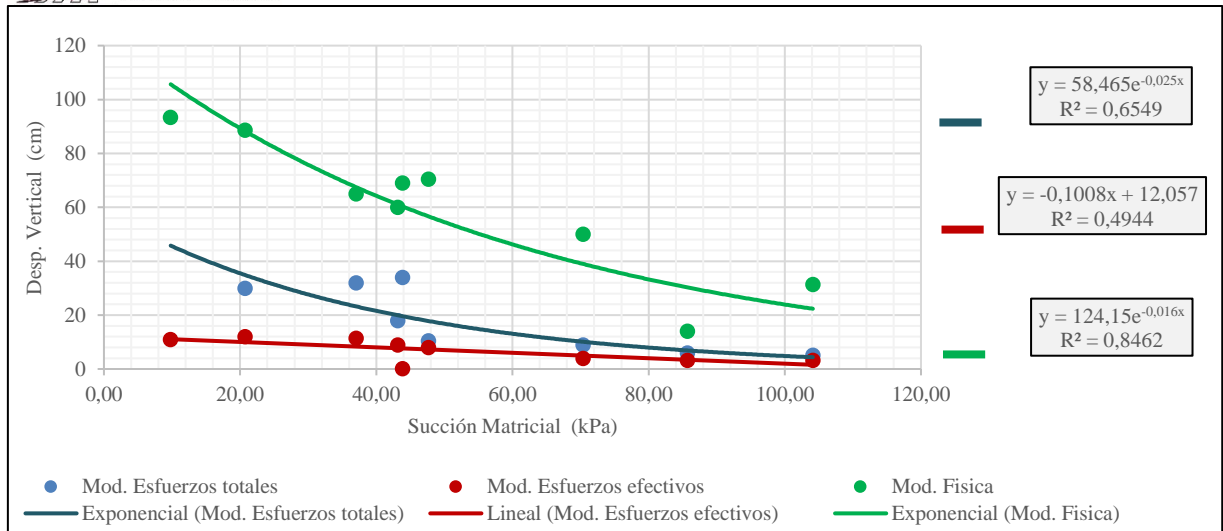


Figura 5.45. Desplazamientos máximos verticales obtenidos en la modelación en Phase² y en las modelaciones físicas en escala prototipo.

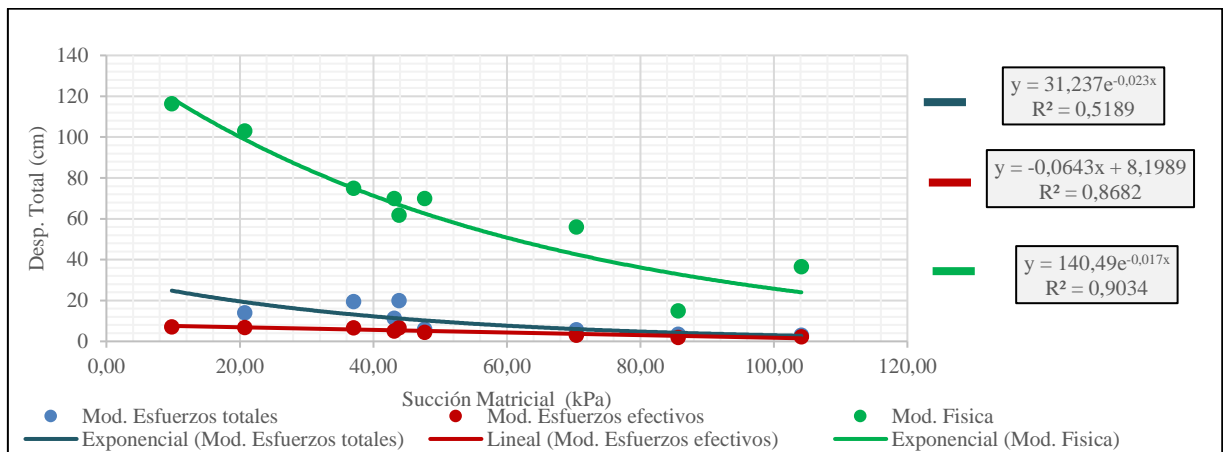


Figura 5.46. Desplazamientos máximos totales obtenidos en la modelación en Phase² y en las modelaciones físicas en escala prototipo.

En síntesis, la modelación en términos de esfuerzos totales se asemeja más a la resistencia obtenida en el ensayo en la centrifuga geotécnica y la ecuación a utilizar para predecir el factor de seguridad a diferentes niveles de succión se muestra en la Figura 5.42:

$$F.S = 0,0342 (U_a - U_w) - 0,2074$$

Adicionalmente, la modelación en términos de esfuerzos totales es la que más se aproxima a los desplazamientos en un talud con diferentes niveles de succión matricial, sin embargo, se siguen obteniendo una diferencia con los desplazamientos modelados físicamente, por lo tanto, para predecir los desplazamientos totales generados en un talud con el suelo de estudio y con una variación en el nivel de succión se utilizaría la ecuación de las modelaciones físicas que se muestra en la Figura 5.41:

$$Despl. Totales [cm] = 140,5 e^{-0,017 (U_a - U_w)}$$

Donde:

$(U_a - U_w)$: Nivel de succión matricial en kPa.

5.7 Análisis de las modelaciones numéricas y físicas.

Los desplazamientos obtenidos en las modelaciones numéricas en términos de esfuerzos totales son los que más se aproximan a los obtenidos en las modelaciones físicas, así mismo el comportamiento que refleja las modelaciones es muy similar. A continuación, se muestran las imágenes obtenidas de la modelación en términos de esfuerzos totales, comparándolas con lo obtenido con los ensayos en la centrifuga geotécnica.

Como se muestra en la Figura 5.47-a, el contorno del modelo MV6 después del ensayo en la centrifuga muestra que se presenta un deslizamiento que provoca que el pie del talud se desplace horizontalmente, lo que igualmente simula el modelo numérico en Phase² (Figura 5.47-b).

En la Figura 5.47-b se puede observar que el contorno de deformaciones cortantes tiene su valor máximo en el pie del talud que es la zona que primero falla, sin embargo, se genera un contorno de deformaciones cortantes que llegan cerca de la corona del talud que es donde se presenta un desplazamiento vertical.

Adicionalmente se evidencia que el contorno de desplazamientos totales en ambas modelaciones inicia desde el extremo izquierdo con valores pequeños y va aumentando a medida que se acerca al talud.

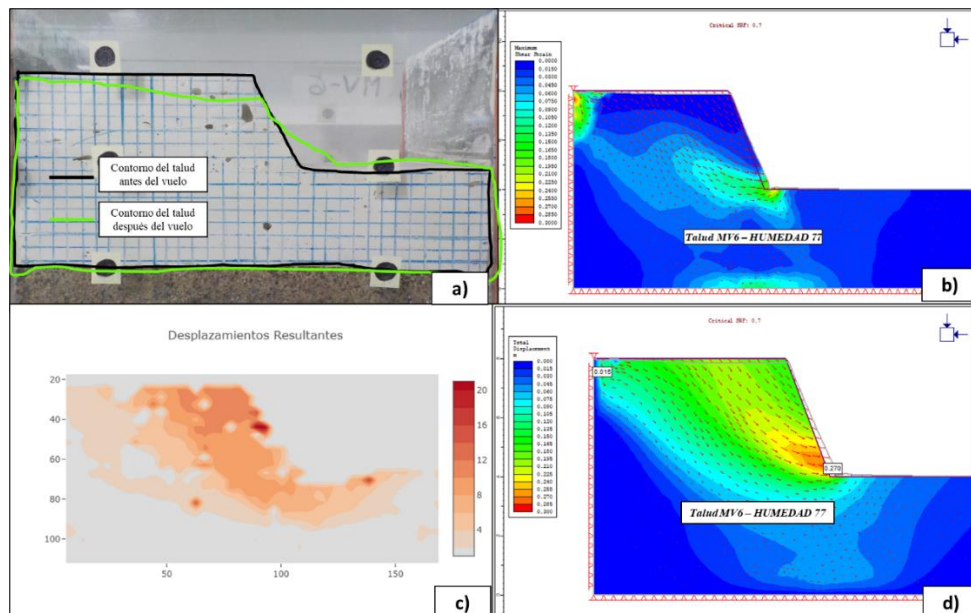


Figura 5.47. Análisis cualitativo de modelo MV6; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

Al igual que en la modelación anterior, en el modelo T5 falla por el pie del talud, sin embargo, el contorno de deformaciones cortantes que se presentan en la Figura 5.48-b disminuye su tamaño a pesar de que se presentan desplazamientos verticales en la corona del talud.

En la modelación física de este talud, los mayores desplazamientos se presentan en la corona y disminuyen hasta llegar al pie, sin embargo, en la modelación numérica los desplazamientos alrededor del talud parecen tener casi la misma magnitud.

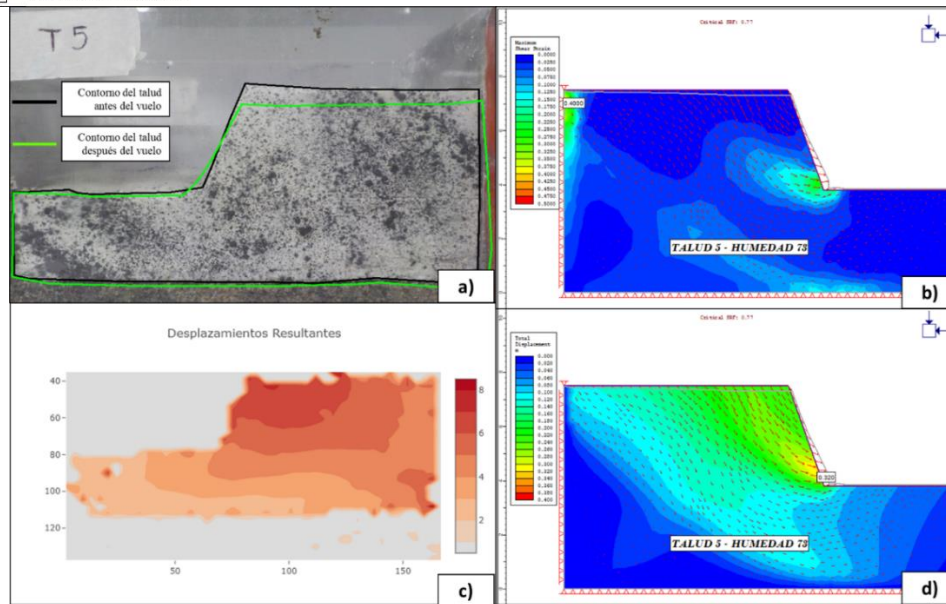


Figura 5.48. Análisis cualitativo de modelo T5; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

En la modelación numérica del modelo T7, también se presenta una falla alrededor del talud que genera que el pie se desplace horizontalmente. No obstante, esta modelación se diferencia de las anteriores en que el contorno de desplazamientos totales alrededor del talud tiende a parecerse más a lo obtenido en la modelación física (Ver Figura 5.49-c-d).

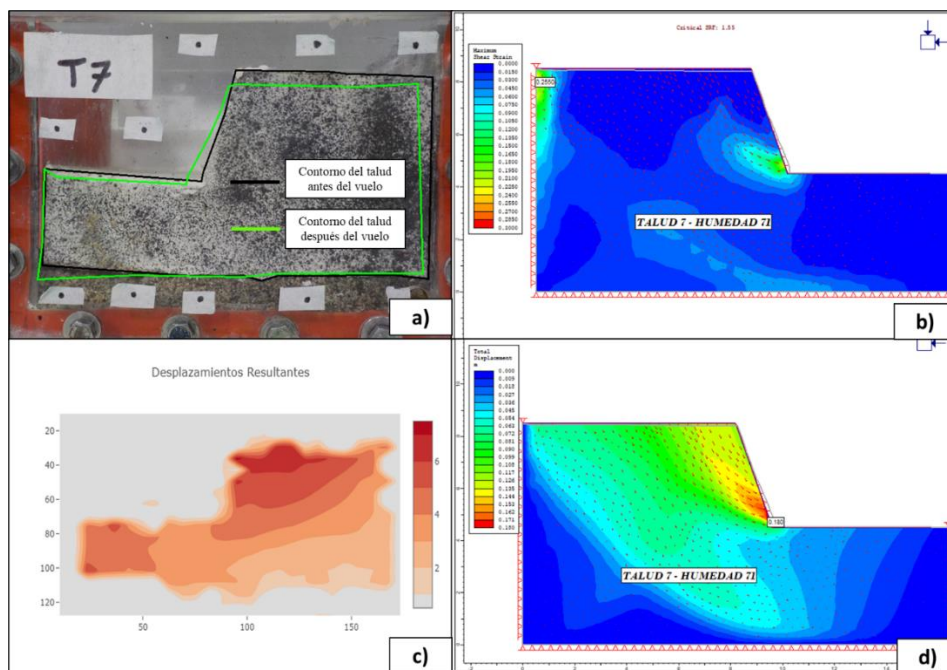


Figura 5.49. Análisis cualitativo de modelo T7; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

Al igual que en los dos últimos taludes, en los modelos T2, T3 y T6 se observó que el contorno de deformaciones cortantes se ubicaba en el pie del talud y se va reduciendo en la medida que se disminuía la humedad. De igual manera en estos modelos numéricos se observó que se

presentaban desplazamientos en la corona del talud al igual que en los modelos físicos (Ver Figura 5.50, Figura 5.51 y Figura 5.52).

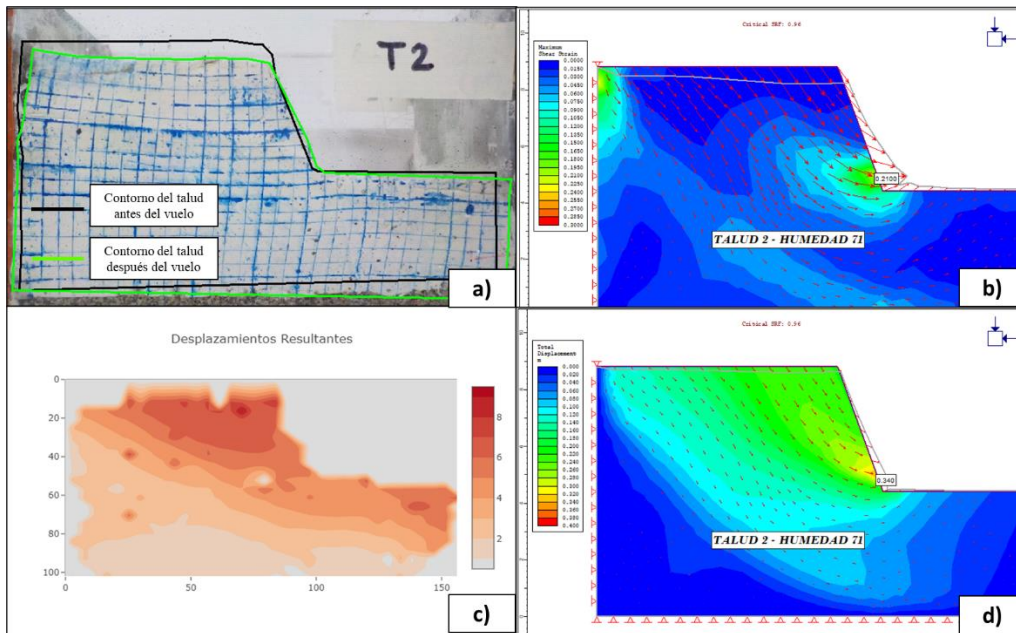


Figura 5.50. Análisis cualitativo de modelo T2; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

También se observa que los contornos de desplazamientos totales del modelo T3 (Figura 5.51-d) y T6 (Figura 5.52-d) se forma una especie de protuberancia debajo del pie del talud, que de igual manera se observa en los contornos de desplazamientos obtenidos en la modelación física (Figura 5.51-c) y T6 (Figura 5.52-c).

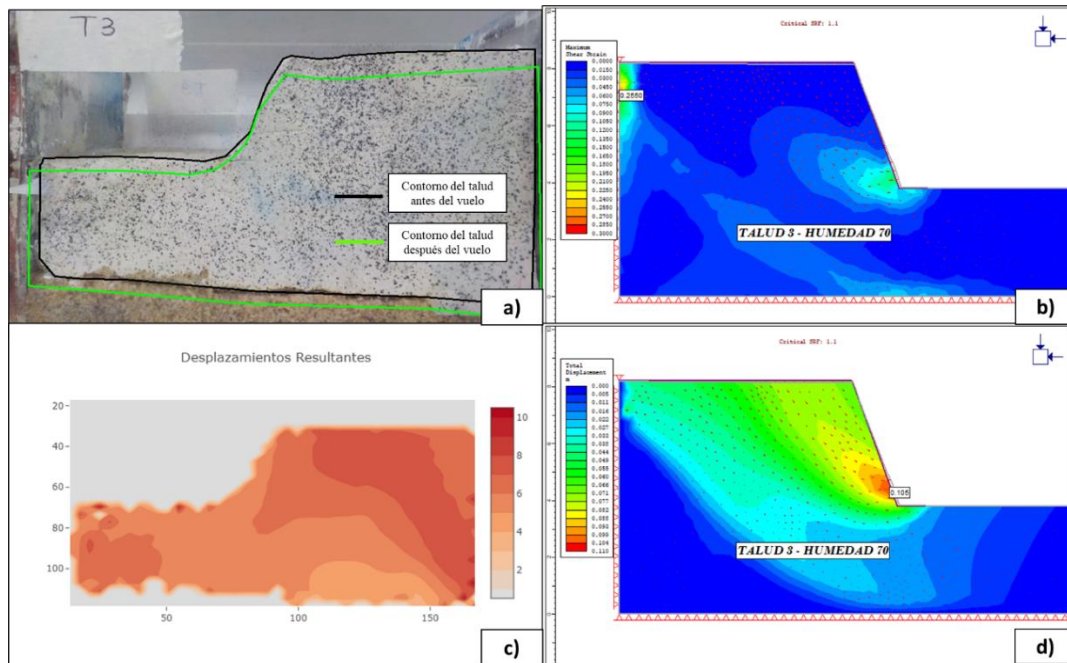


Figura 5.51. Análisis cualitativo de modelo T3; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

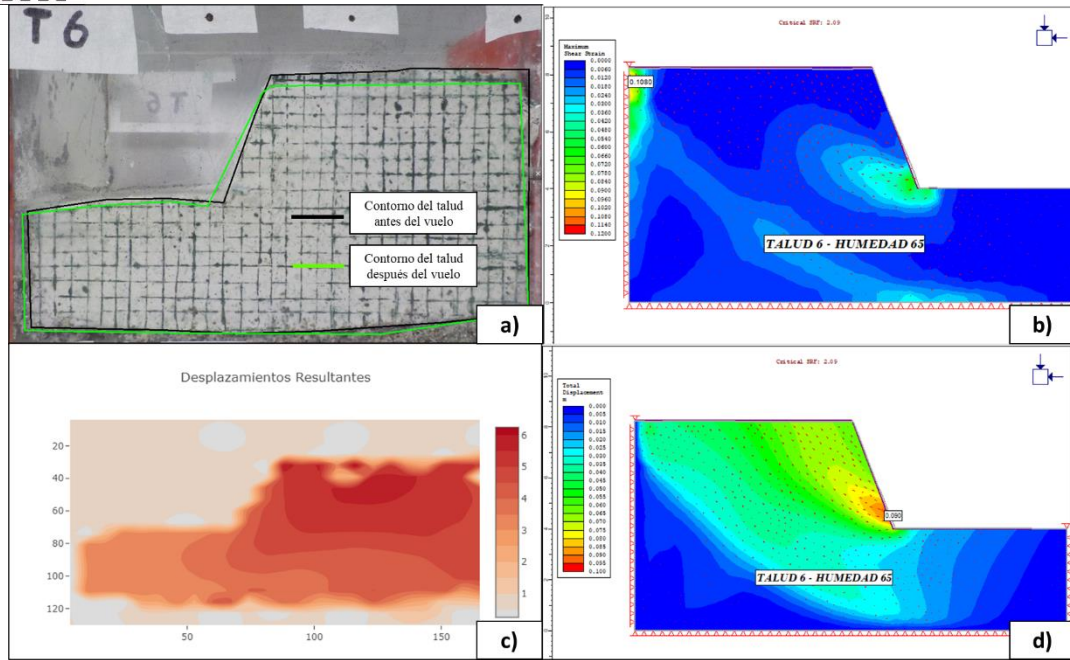


Figura 5.52. Análisis cualitativo de modelo T6; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

En cuanto a los modelos T4 y T1, se observó que el comportamiento de las modelaciones numéricas y los modelos físicos no concuerda, dado a que el comportamiento que se observa en la Figura 5.53-c y Figura 5.54-c se enfocan en los desplazamientos obtenidos alrededor de las grietas a tracción. Sin embargo, se continúa observando que en las modelaciones numéricas el contorno de deformaciones cortantes disminuye al aumentar el nivel de succión en los taludes (Ver Figura 5.53-b y Figura 5.54-b).

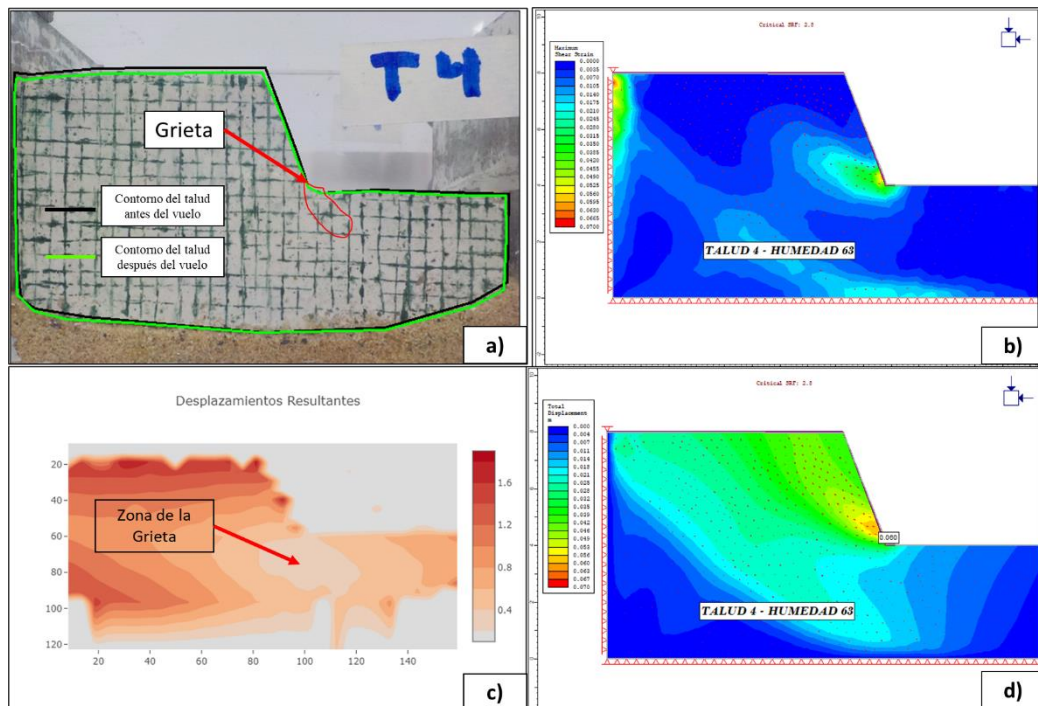


Figura 5.53. Análisis cualitativo de modelo T4; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

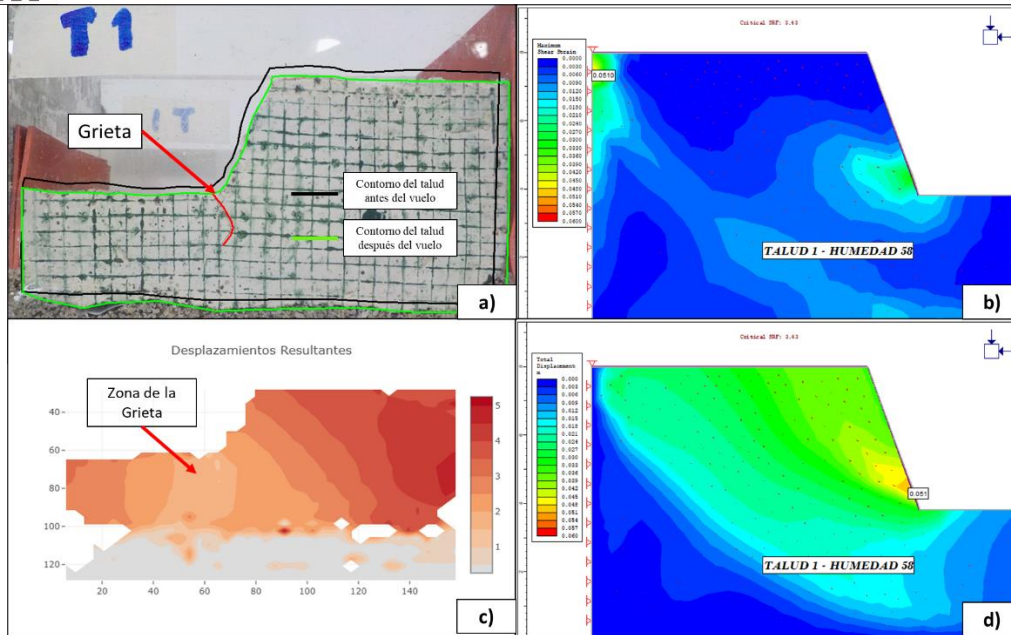


Figura 5.54. Análisis cualitativo de modelo T1; a) Esquema de contornos obtenidos en la centrifuga geotécnica; b) Deformaciones cortantes simulado en Phase²; c) Desplazamientos totales obtenidos en la centrifuga geotécnica; d) Desplazamientos totales simulados en Phase².

6 Conclusiones

El efecto que genera la succión en los suelos generalmente suele ignorarse debido a la complejidad del tema y a la dificultad de estimar con precisión el aporte que genera, de ahí la importancia de estudiar su efecto en diferentes problemas geotécnicos. Específicamente este trabajo se centró en estudiar la estabilidad de taludes de suelos finos con diferentes niveles de succión, que con la aplicación de la centrifuga geotécnica permitió desarrollar y cumplir con los objetivos planteados inicialmente. A continuación, se presenta las conclusiones obtenidas del desarrollo de esta tesis:

- Se establece una nueva metodología para el estudio del efecto de la succión en la estabilidad de taludes, la cual permite comprobar el aporte que genera la succión a la estabilidad de los taludes en el material de estudio.
- Para el limo de alta plasticidad estudiado, se obtuvo una relación lineal entre el nivel de succión matricial ($U_a - U_w$) y la resistencia al corte no drenado (C_u).
- Se estableció que el mecanismo de falla en los taludes suelo saturado es una falla de base, la cual inicia en la corona y finaliza en la base delante del pie del talud.
- Con el análisis de imagen realizado se evidencio que en los modelos parcialmente saturados la superficie de falla no se desarrolla completamente, a diferencia de los modelos saturados, en los cuales se presenta una superficie falla de base con un mecanismo abrupto de corte.
- Con el análisis de imagen realizado, se evidenció que los desplazamientos obtenidos en los modelos parcialmente saturados eran menores a los alcanzados en los modelos saturados, por lo tanto, se estableció que uno de los efectos de la succión en la estabilidad de taludes es reducir los desplazamientos producidos al momento de la falla.
- A partir de una succión igual al 30 kPa, los modelos físicos dejan de presentar una falla abrupta de corte con grandes desplazamientos, consecuentemente al ir aumentando el nivel de succión los desplazamientos que se presentan se van reduciendo.
- Con los resultados de las modelaciones numéricas en Phase² y Slide, se estableció que la modelación en términos de esfuerzos totales es la que más se asemeja al comportamiento

evidenciado en las modelaciones físicas, ya que los desplazamientos y factores de seguridad obtenidos reflejan lo observado en los ensayos en la centrifuga geotécnica.

- Con la modelación numérica realizada en el software Slide, se comprobó un aumento lineal del factor de seguridad a medida que el nivel de succión matricial en el suelo incrementaba.
- Se evidencio una susceptibilidad a presentar grietas a tracción en el pie del talud en los modelos físicos con contenidos de humedad cercanos o inferiores al 60%, no obstante, esta susceptibilidad se le atribuye a la alta plasticidad del material de estudio.

7 Recomendaciones

Luego de realizar esta investigación, se recomienda:

- Establecer la incidencia de la plasticidad en la estabilidad de taludes parcialmente saturados, dado a que este tema no se abordó y puede ser una variable importante en la estabilidad.
- En el caso de hacer una investigación relacionada con la incidencia de la succión en la estabilidad de taludes de suelo fino, se recomienda ahondar más en la obtención del módulo de elasticidad en suelos parcialmente saturados, dado a que este parámetro es crucial para la predicción de las deformaciones en las modelaciones numéricas.
- Existe la necesidad de mejorar la instrumentación de la centrifuga en relación con la adquisición de video durante el vuelo, ya que la toma de fotografías antes y después del vuelo dificulto el procesamiento de las imágenes en el programa GEOPIV_RG.
- Para realizar el procesamiento de imágenes en el programa GEOPIV_RG es necesario generar unos puntos de control sobre las canastas de la centrifuga, las cuales durante el vuelo no presenten ningún movimiento con respecto a la cámara de video.
- Adicional al sistema de adquisición de imágenes durante el vuelo, se recomienda incorporar un sistema de nivel de agua que permita durante el vuelo mantener el nivel de agua constante, ya que es posible que durante el vuelo cambie el contenido de humedad sobre el modelo y altere los resultados.

8 Bibliografía

- Alsherif, N., Wayllace, A., & Lu, N. (2015). Measuring the soil water-retention curve under positive and negative matric suction regimes. *Geotechnical Testing Journal*, 38(4), 442–451. <https://doi.org/10.1520/GTJ20140258>
- Anbese, E. M., & Juneja, A. (2018). ANALYSIS OF EARTH SLOPES SUBJECTED TO CHANGE IN WATER CONTENT USING CENTRIFUGE MODELLING. 4(1), 230–245.
- Azizi, F. (2000). *Applied-Analysis-in-Geotechnics-F-Azizi-pdf.pdf*.
- Chen, P., Lu, N., & Wei, C. (2019). General Scanning Hysteresis Model for Soil-Water Retention Curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(12), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002184](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002184)
- Chen, T. lin, Cheng, Z., Wang, G. li, Liu, E. long, & Dai, F. (2018). Centrifuge Model Test on Unsaturated Expansive Soil Slopes with Cyclic Wetting–Drying and Inundation at the Slope Toe. *International Journal of Civil Engineering*, 16(10), 1341–1360. <https://doi.org/10.1007/s40999-017-0228-1>
- Crancon, P., Guy, C., Pili, E., Dutheil, S., & Gaudet, J. P. (2000). Modeling of capillary rise and water retention in centrifuge tests using time domain reflectometry. *Int. Symp. on Physical Modelling and Testing in Environmental Geotechnics*, January.
- 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>
- Esposito, G. (2000). Centrifuge simulation of light hydrocarbon spill in partially saturated Dutch dune sand. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58(2), 89–93. <https://doi.org/10.1007/s100640050001>
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). Shear Strength of Unsaturated Soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(3), 313–321. <https://doi.org/10.1139/t78-029>
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1987). Soil Mechanics Principles for Highway Engineering in Arid Regions. *Transportation Research Record*, 0(1137), 1–11.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., & Wilson, G. W. (1997). Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution and Volume-Mass Properties Percent Passing. *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils Unsaturated Soils*.
- Fredlund, & Rahardjo. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soils. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Garnier, J., & Gaudin, C. (2007). Catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modelling. *Widener.Parameterid.Com*, 2(August 2006), 1–26. http://widener.parameterid.com/docs/courses/senior/F08_SP09/401files/Andrew_Kristin/1A_TC2SCALINGLAWCATALOGUE2007.pdf
- Griffiths, D. V., & Lu, N. (2005). Unsaturated slope stability analysis with steady infiltration or evaporation using elasto-plastic finite elements. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(3), 249–267. <https://doi.org/10.1002/nag.413>
- Higo, Y., Lee, C. W., Doi, T., Kinugawa, T., Kimura, M., Kimoto, S., & Oka, F. (2015). Study of dynamic stability of unsaturated embankments with different water contents by centrifugal model tests. *Soils and Foundations*, 55(1), 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.009>
- Khanzode, R. M., Vanapalli, S. K., & Fredlund, D. G. (2002). Measurement of soil-water

- characteristic curves for fine-grained soils using a small-scale centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1209–1217. <https://doi.org/10.1139/t02-060>
- Knight, M. A., Cooke, A. B., & Mitchell, R. J. (2000). *Scaling of the movement and fate of contaminant releases in the vadose zone by centrifuge modelling* *Reproduction de la migration et de l' évolution de polluants rejetés dans la zone insaturée par centrifugation*. May.
- Likos, W. J., & Lu, N. (2004). Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil. *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 646–655. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2004\)130:6\(646\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(646))
- Ling, H. I., Wu, M. H., Leshchinsky, D., & Leshchinsky, B. (2009). Centrifuge modeling of slope instability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(6), 758–767. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000024](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000024)
- Lo Presti, D. C. F., Pedroni, S., & Crippa, V. (1992). Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D 4253-83. A comparative study. *Geotechnical Testing Journal*, 15(2), 180–189. <https://doi.org/10.1520/gtj10239j>
- Lu, N., Godt, J. W., & Wu, D. T. (2010). A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil. *Water Resources Research*, 46(5), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2009wr008646>
- Lu, N., & Likos, W. J. (2006). Suction stress characteristic curve for unsaturated soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(2), 131–142. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:2\(131\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:2(131))
- Matziaris, V., Masoudian, M. S., Marshall, A. M., & Heron, C. M. (2017). Centrifuge modelling of rainfall-induced slope instability in sand and silty sand. *ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017-Septe(September)*, 2179–2182.
- Meza, V. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, De La Investigación a La Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 31, 23–38. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/31251/43362>
- Mirshekari, M., Ghayoomi, M., & Borghei, A. (2018). A review on soil-water retention scaling in centrifuge modeling of unsaturated sands. *Geotechnical Testing Journal*, 41(6), 979–997. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170120>
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conduc. *Water Resources Research*, 12(3), 513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- 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>
- Ning Lu, & Likos, W. J. (2007). Unsaturated Soil Mechanics. In *Environmental and Engineering Geoscience* (Vol. 13, Issue 1). <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.13.1.87>
- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Mohamed, H., Yee Ip, S. C., & Shah, R. S. (2019). Comparison of Soil–Water Characteristic Curves from Conventional Testing and Combination of Small-Scale Centrifuge and Dew Point Methods. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(2), 659–672. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0636-2>
- Rattan Lal, M. K. S. (2004). Principles of soil physics. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Rezzoug, A., König, D., & Triantafyllidis, T. (2004). Scaling laws for centrifuge modeling of capillary rise in sandy soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,

- Ridley, A., & Burland, J. (1995). Measurement of suction in materials which swell. *Applied Mechanics Reviews*, 48(10), 727. <https://doi.org/10.1115/1.3005055>
- Sonnenberg, R., Bransby, M. F., Bengough, A. G., Hallett, P. D., & Davies, M. C. R. (2012). Centrifuge modelling of soil slopes containing model plant roots. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(1), 1–17. <https://doi.org/10.1139/T11-081>
- Taylor, R. N. (2013). Geotechnical-Centrifuge-Technology. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Terzaghi, K. Von. (1945). *Theoretical Soil Mechanics by Karl Terzaghi* (John Wiley and Sons (ed.)).
- Vahedifard, F., Mortezaei, K., Leshchinsky, B. A., Leshchinsky, D., & Lu, N. (2016). Role of suction stress on service state behavior of geosynthetic-reinforced soil structures. *Transportation Geotechnics*, 8, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.02.002>
- Van Genuchten. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., & Clifton, A. W. (1996). *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*.
- Yu, Y., Deng, L., Sun, X., & Lu, H. (2008). Centrifuge modeling of a dry sandy slope response to earthquake loading. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(3), 447–461. <https://doi.org/10.1007/s10518-008-9070-9>

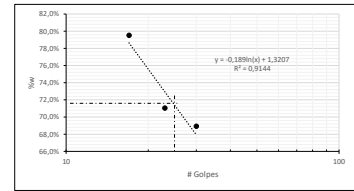
ANEXOS

1

Límite líquido										
Rango golpes	Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LL	#Golpes	
15-25	17	7,01	19,02	12,74	5,47	11	3,73	1,74	46,6%	17
20-30	47	7,24	16,75	9,51	12,8	12,8	5,56	3,95	71,04%	23
25-35	12	7,12	17,56	10,44	13,3	13,3	6,18	4,26	68,9%	30

%W 71,2%

LL 71,04%



Límite plástico

Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LP
19	7,27	12,74	5,47	11	3,73	1,74	46,6%
26	7,69	13,15	5,46	11,4	3,71	1,75	47,2%

LP 46,9%

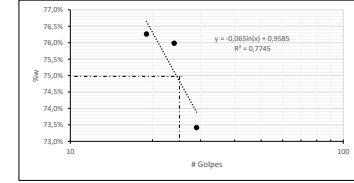
IP 24,1%

2

Límite líquido										
Rango golpes	Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LL	#Golpes	
15-25	66	11,16	18,14	6,98	15,12	15,12	3,96	3,02	76,3%	19
20-30	71	7,65	15,71	8,06	12,23	12,23	4,58	3,48	75,98%	24
25-35	18	6,68	15,16	8,48	11,57	11,57	4,89	3,59	73,4%	29

%W 75,1%

LL 74,93%



Límite plástico

Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LP
95	4,31	10,17	5,86	8,3	3,99	1,87	46,9%
14	6,5	12,48	5,98	10,7	4,2	1,78	42,4%

LP 44,6%

IP 30,3%

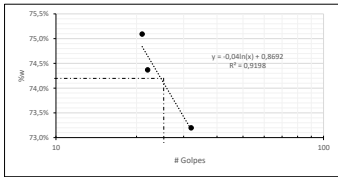
3

Límite líquido										
Rango golpes	Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LL	#Golpes	
15-25	72	11,04	20,6	9,56	16,5	16,5	5,46	4,1	75,1%	21
20-30	56	11,07	20,73	9,66	16,61	16,61	5,54	4,12	74,37%	22
25-35	85	6,65	17,7	11,05	13,03	13,03	6,38	4,67	73,2%	32

Índice de Fuides -7,19%

%W 74,9%

LL 74,04%



Límite plástico

Recipiente	P. Recipiente	P.Rec=suelo húmedo	P.suelo húmedo	P.Rec=suelo seco	P.suelo seco	Ww	LP
57	11,05	16,95	5,9	15,2	4,15	1,75	42,2%
60	11,18	17,36	6,18	15,5	4,32	1,86	43,1%

LP 42,6%

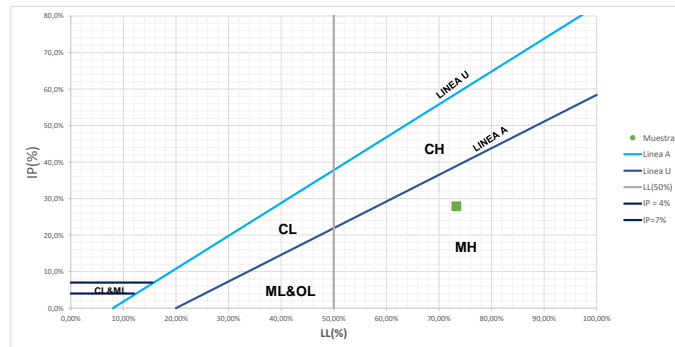
IP 31,4%

Límite Contracción

Den.Parafina(g/cm³)	0,89
Den.Agua(g/cm³)	1

Rec. Contract	V (cm³)	Peso.Recip(g)	Peso.Rec=suelo húmedo(g)	Peso. Pastilla seca(g)	P. Pastilla seca=parf(g)	Peso.Pastilla.sumerg(g)	V(cm³)	W(%)	Lc (%)	R	Cv	CL
5	16,201	231,68	254,84	12,08	13,9	3,3	8,56	91,7%	28,43%	1,41203047	0,89373391	19%
4	15,292	257,77	280,86	12,03	14,6	3,1	8,61	91,9%	36,41%	1,39682975	0,77558774	17%
2	15,662	371,81	393,84	11,16	14,9	2	8,70	97,4%	35,00%	1,28709004	0,8046995	18%

	1	2	3	Promedio
LL	71,04%	74,93%	74,04%	73,34%
LP	46,9%	46,9%	42,6%	45,48%
LC	28,43%	36,41%	35,00%	33,28%
IP	24,1%	28,0%	31,4%	27,9%



GRAVEDAD ESPECIFICA

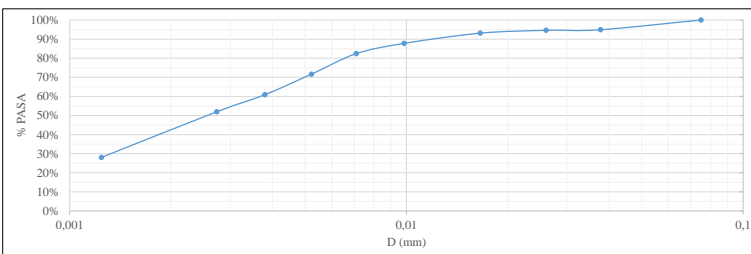
Masa _{recp}	107,3 gr
Masa _{Picnometro seco}	145,2 gr
Masa _{Picnometro + agua}	643,5 gr
T _{ensayo}	23,80 °C
M _{agua}	498,3 gr
densidad del agua	0,99745 gr/cm ³
V _{agua}	499,54 cm ³

Masa _{Picnometro + Agua + suelo}	680,3 gr
Masa _{Recipiente+suelo seco}	167,0 gr
Masa _{picnometro con agua}	643,5 gr
Masa _{suelo seco}	59,7 gr
G _s _{Temperatura de ensayo}	2,610
K	0,99914
G _s _{20 °C}	2,61

Hidrometro	151H
Tamiz empleado	No 200
Masa _{solida} (g)	55
Masa _{corregida} (g)	54,34
% PASA	100,0%
G _s	2,61
G _H	1

M _{plu-suelohumedo}	32,58
M _{plu}	17,58
M _{plu-sueloseco}	32,4
W (%)	1,2%
Fact. Correccion _{Hume}	0,988

TIEMPO (MINUTOS)	TEMPERATURA (°C)	R	L(cm)	K	%PASA	D(mm)	%RET	
0	-	-	-	-	100,00%	0,075	100%	
1	17	1036	1,0318	6,9	0,014354089	94,91%	0,03770511	5,09%
2	19	1035,5	1,0317	6,9	0,013995721	94,61%	0,0269959	5,39%
5	19	1035	1,0312	7	0,013995721	93,12%	0,01655996	6,88%
15	20	1033	1,0294	7,6	0,013825721	87,75%	0,00984122	12,25%
30	21	1031	1,0276	8,1	0,013655721	82,37%	0,00709572	17,63%
60	23	1027	1,024	9,2	0,013337353	71,63%	0,00522261	28,37%
120	25	1023	1,0204	10,2	0,013027353	60,89%	0,00379899	39,11%
250	25	1020	1,0174	11	0,013027353	51,93%	0,00273264	48,07%
1440	25	1012	1,0094	13,1	0,013027353	28,06%	0,00124254	71,94%



	$\sigma_c = 30\text{kpa}$		$\sigma_c = 20\text{kpa}$		$\sigma_c = 50\text{kpa}$		$\sigma_c = 40\text{kpa}$	
	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)
	78,35	50,64	76,72	36,42	71,67	50,07	76,57	34,27
	78,51	49,63	75,24	36,24	71,6	50,34	75,92	34,98
	79,45	50,22	76,11	36,16	71,79	50,37	76,96	34,75
Promedio	78,77	50,16	76,02	36,27	71,69	50,26	76,48	34,67
H/d	1,57		2,10		1,43		2,21	
Masa del espécimen	233,86		115,95		223,28		113,09	
Area (cm²)	19,76		10,33		19,84		9,44	
Volumen (cm³)	155,68		78,56		142,22		72,19	
Y (gr/cm³)	1,502		1,476		1,570		1,567	
g(m²/s)	9,81							

Muestra	$\sigma_c = 20\text{kpa}$		
No recipiente	2	3	12
Masa recipiente (g)	16,4	19,7	17,3
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	44,7	54,2	47,3
Masa del recipiente +suelo seco (g)	32,4	39,1	34,2
w(%)	76,88%	77,84%	77,51%
v de deformacion (mm/min)	0,5		

$\sigma_c = 20\text{kpa}$						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_2	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_2	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,15	0	0,197%	10,35	0,193	0,197%	1,830
0,36	0	0,474%	10,38	0,193	0,474%	1,825
0,5	0,5	0,658%	10,40	0,348	0,658%	3,280
0,75	0,5	0,987%	10,44	0,348	0,987%	3,269
0,93	0,5	1,223%	10,46	0,348	1,223%	3,261
1,2	0,5	1,578%	10,50	0,348	1,578%	3,249
1,3	0,9	1,710%	10,51	0,471	1,710%	4,399
1,5	1	1,973%	10,54	0,502	1,973%	4,675
1,69	1	2,223%	10,57	0,502	2,223%	4,663
1,89	1	2,486%	10,60	0,502	2,486%	4,650
2,09	1	2,749%	10,63	0,502	2,749%	4,638
2,29	1,1	3,012%	10,65	0,533	3,012%	4,910
2,47	1,2	3,249%	10,68	0,564	3,249%	5,182
2,6	1,2	3,420%	10,70	0,564	3,420%	5,173
2,87	1,4	3,775%	10,74	0,626	3,775%	5,718
3,04	1,5	3,999%	10,76	0,657	3,999%	5,987
3,27	1,5	4,301%	10,80	0,657	4,301%	5,968
3,34	1,5	4,393%	10,81	0,657	4,393%	5,962
3,65	1,7	4,801%	10,86	0,719	4,801%	6,496
3,84	1,9	5,051%	10,88	0,781	5,051%	7,036
4,04	1,9	5,314%	10,91	0,781	5,314%	7,016
4,2	2	5,525%	10,94	0,812	5,525%	7,278
4,37	2	5,748%	10,96	0,812	5,748%	7,261
4,56	2	5,998%	10,99	0,812	5,998%	7,242
4,76	2	6,261%	11,02	0,812	6,261%	7,221
4,98	2,1	6,551%	11,06	0,842	6,551%	7,473
5,29	2,4	6,958%	11,11	0,935	6,958%	8,260
5,51	2,4	7,248%	11,14	0,935	7,248%	8,234
5,71	2,5	7,511%	11,17	0,966	7,511%	8,482
5,89	2,8	7,748%	11,20	1,059	7,748%	9,273
6,09	2,9	8,011%	11,23	1,090	8,011%	9,516
6,32	2,9	8,313%	11,27	1,090	8,313%	9,485
6,47	2,9	8,511%	11,30	1,090	8,511%	9,465
6,63	3	8,721%	11,32	1,121	8,721%	9,711
6,82	3	8,971%	11,35	1,121	8,971%	9,684
7,03	3	9,247%	11,39	1,121	9,247%	9,655
7,2	3,1	9,471%	11,42	1,152	9,471%	9,897
7,37	3,1	9,694%	11,44	1,152	9,694%	9,872
7,64	3,1	10,050%	11,49	1,152	10,050%	9,833
7,69	3,1	10,115%	11,50	1,152	10,115%	9,826
7,98	3,5	10,497%	11,55	1,275	10,497%	10,835
8,17	3,5	10,747%	11,58	1,275	10,747%	10,805
8,35	3,5	10,983%	11,61	1,275	10,983%	10,776
8,55	3,8	11,247%	11,64	1,368	11,247%	11,526
8,7	3,9	11,444%	11,67	1,399	11,444%	11,760
8,91	3,9	11,720%	11,71	1,399	11,720%	11,723
9,08	3,9	11,944%	11,74	1,399	11,944%	11,694
9,29	4	12,220%	11,77	1,430	12,220%	11,914
9,44	4	12,417%	11,80	1,430	12,417%	11,888
9,64	4	12,680%	11,83	1,430	12,680%	11,852
9,82	4	12,917%	11,87	1,430	12,917%	11,820
10,02	4,1	13,180%	11,90	1,461	13,180%	12,039
10,22	4,1	13,443%	11,94	1,461	13,443%	12,002
10,42	4,1	13,706%	11,98	1,461	13,706%	11,966
10,6	4,1	13,943%	12,01	1,461	13,943%	11,933
10,79	4,2	14,193%	12,04	1,492	14,193%	12,150
10,99	4,2	14,456%	12,08	1,492	14,456%	12,113
11,18	4,2	14,706%	12,12	1,492	14,706%	12,078
11,38	4,2	14,969%	12,15	1,492	14,969%	12,040
11,58	4,2	15,232%	12,19	1,492	15,232%	12,003
11,77	4,3	15,482%	12,23	1,523	15,482%	12,216
11,98	4,3	15,758%	12,27	1,523	15,758%	12,176
12,15	4,5	15,982%	12,30	1,584	15,982%	12,637

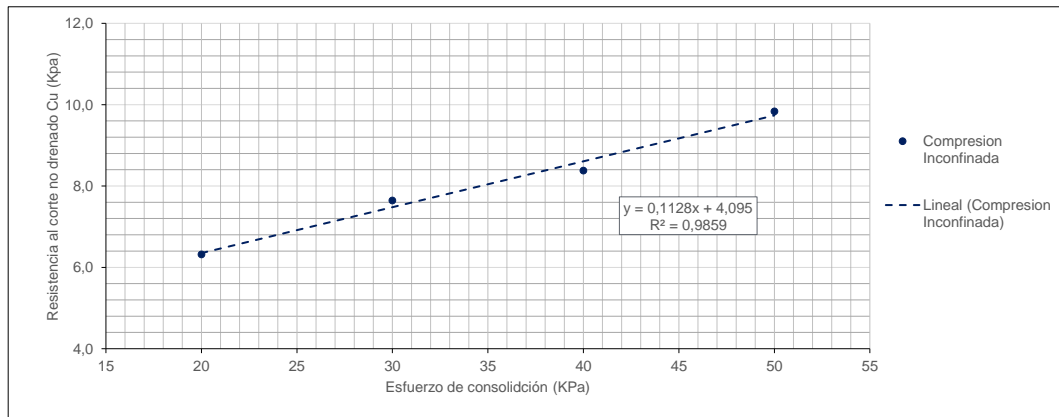
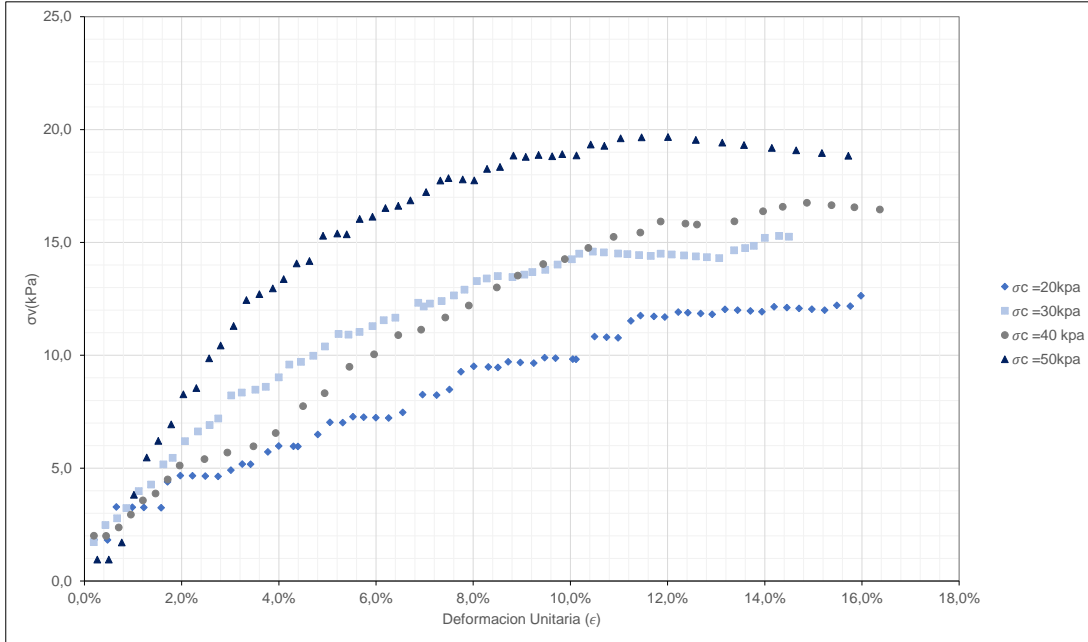
Muestra	$\sigma_c = 40$ kpa		
No recipiente	13	62	12.1
Masa recipiente (g)	7,2	10,9	7,2
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	57,2	51,4	53,1
Masa del recipiente +suelo seco (g)	35,8	34	33,7
w(%)	74,83%	75,32%	73,21%
v de deformacion (mm/min)	0,5		

$\sigma_c = 40$ kpa						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_4	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,15	0	0,196%	9,46	0,193	0,196%	2,003950638
0,34	0	0,445%	9,48	0,193	0,445%	1,998962639
0,54	0,12	0,706%	9,51	0,230	0,706%	2,376585922
0,73	0,3	0,954%	9,53	0,286	0,954%	2,943511456
0,92	0,5	1,203%	9,55	0,348	1,203%	3,571052622
1,12	0,6	1,464%	9,58	0,379	1,464%	3,878221162
1,31	0,8	1,713%	9,60	0,441	1,713%	4,50008525
1,5	1	1,961%	9,63	0,502	1,961%	5,118752832
1,89	1,1	2,471%	9,68	0,533	2,471%	5,405510353
2,25	1,2	2,942%	9,72	0,564	2,942%	5,691290088
2,66	1,3	3,478%	9,78	0,595	3,478%	5,970000657
3,01	1,5	3,935%	9,83	0,657	3,935%	6,559041709
3,44	1,9	4,498%	9,88	0,781	4,498%	7,748108975
3,78	2,1	4,942%	9,93	0,842	4,942%	8,322908262
4,17	2,5	5,452%	9,98	0,966	5,452%	9,493427884
4,56	2,7	5,962%	10,04	1,028	5,962%	10,04652897
4,94	3	6,459%	10,09	1,121	6,459%	10,89510508
5,3	3,1	6,930%	10,14	1,152	6,930%	11,13931978
5,68	3,3	7,426%	10,20	1,213	7,426%	11,67473508
6,05	3,5	7,910%	10,25	1,275	7,910%	12,20549451
6,49	3,8	8,486%	10,31	1,368	8,486%	13,01134771
6,82	4	8,917%	10,36	1,430	8,917%	13,53529356
7,22	4,2	9,440%	10,42	1,492	9,440%	14,03950216
7,56	4,3	9,885%	10,47	1,523	9,885%	14,26011897
7,93	4,5	10,368%	10,53	1,584	10,368%	14,75952346
8,33	4,7	10,891%	10,59	1,646	10,891%	15,24599648
8,75	4,8	11,440%	10,66	1,677	11,440%	15,43657284
9,07	5	11,859%	10,71	1,739	11,859%	15,93001517
9,46	5	12,369%	10,77	1,739	12,369%	15,83785676
9,64	5	12,604%	10,80	1,739	12,604%	15,7953221
10,23	5,1	13,375%	10,90	1,770	13,375%	15,93421444
10,68	5,3	13,964%	10,97	1,832	13,964%	16,37882744
10,99	5,4	14,369%	11,02	1,863	14,369%	16,57678325
11,37	5,5	14,866%	11,09	1,893	14,866%	16,75412237
11,76	5,5	15,376%	11,15	1,893	15,376%	16,65377261
12,12	5,5	15,847%	11,22	1,893	15,847%	16,56114205
12,52	5,5	16,370%	11,29	1,893	16,370%	16,45821922

Muestra	$\sigma_c = 50 \text{ kpa}$		
No recipiente	21	43842	21
Masa recipiente (g)	7,19	7,13	7,35
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	38,44	29,37	50,11
Masa del recipiente +suelo seco (g)	25,4	20,1	32,2
w(%)	71,61%	71,47%	72,07%
v de deformacion (mm/min)	0,5		

$\sigma_c = 50 \text{ kpa}$						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_3	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,19	0	0,265%	19,89	0,193	0,265%	0,95272203
0,36	0	0,502%	19,94	0,193	0,502%	0,950456711
0,55	0,5	0,767%	19,99	0,348	0,767%	1,706421343
0,73	1,9	1,018%	20,04	0,781	1,018%	3,820462692
0,92	3	1,283%	20,10	1,121	1,283%	5,470142161
1,09	3,5	1,521%	20,15	1,275	1,521%	6,209676193
1,28	4	1,786%	20,20	1,430	1,786%	6,943602214
1,46	4,9	2,037%	20,25	1,708	2,037%	8,273518457
1,65	5,1	2,302%	20,31	1,770	2,302%	8,549801136
1,84	6	2,567%	20,36	2,048	2,567%	9,866940713
2,01	6,4	2,804%	20,41	2,172	2,804%	10,43716872
2,2	7	3,069%	20,47	2,357	3,069%	11,29762935
2,39	7,8	3,334%	20,52	2,604	3,334%	12,44870229
2,58	8	3,599%	20,58	2,666	3,599%	12,70924677
2,78	8,2	3,878%	20,64	2,728	3,878%	12,9662875
2,94	8,5	4,101%	20,69	2,821	4,101%	13,37588695
3,13	9	4,366%	20,75	2,975	4,366%	14,06973025
3,32	9,1	4,631%	20,80	3,006	4,631%	14,1764929
3,52	9,9	4,910%	20,86	3,254	4,910%	15,29764232
3,73	10	5,203%	20,93	3,284	5,203%	15,39539323
3,87	10	5,398%	20,97	3,284	5,398%	15,36367662
4,06	10,5	5,664%	21,03	3,439	5,664%	16,04149943
4,25	10,6	5,929%	21,09	3,470	5,929%	16,14019723
4,44	10,9	6,194%	21,15	3,563	6,194%	16,52480651
4,63	11	6,459%	21,21	3,594	6,459%	16,62107235
4,81	11,2	6,710%	21,27	3,655	6,710%	16,86159845
5,04	11,5	7,031%	21,34	3,748	7,031%	17,22984761
5,25	11,9	7,324%	21,41	3,872	7,324%	17,74207961
5,37	12	7,491%	21,45	3,903	7,491%	17,85140706
5,58	12	7,784%	21,51	3,903	7,784%	17,79487836
5,75	12	8,021%	21,57	3,903	8,021%	17,74911702
5,94	12,4	8,286%	21,63	4,026	8,286%	18,25860256
6,13	12,5	8,551%	21,69	4,057	8,551%	18,345589
6,33	12,9	8,830%	21,76	4,181	8,830%	18,84691744
6,51	12,9	9,081%	21,82	4,181	9,081%	18,79501079
6,7	13	9,346%	21,89	4,212	9,346%	18,87875499
6,9	13	9,625%	21,95	4,212	9,625%	18,8206546
7,05	13,1	9,834%	22,00	4,243	9,834%	18,91486734
7,26	13,1	10,127%	22,08	4,243	10,127%	18,85341426
7,47	13,5	10,420%	22,15	4,366	10,420%	19,33952817
7,67	13,5	10,699%	22,22	4,366	10,699%	19,27929606
7,91	13,8	11,034%	22,30	4,459	11,034%	19,61487485
8,22	13,9	11,467%	22,41	4,490	11,467%	19,65482344
8,61	14	12,011%	22,55	4,521	12,011%	19,66850449
9,02	14	12,583%	22,70	4,521	12,583%	19,54065869
9,41	14	13,127%	22,84	4,521	13,127%	19,41904927
9,73	14	13,573%	22,96	4,521	13,573%	19,31926719
10,14	14	14,145%	23,11	4,521	14,145%	19,19142139
10,5	14	14,647%	23,24	4,521	14,647%	19,07916654
10,88	14	15,177%	23,39	4,521	15,177%	18,96067531
11,27	14	15,721%	23,54	4,521	15,721%	18,83906589

σ_c (kPa)	20	30	40	50
γ (gr/cm ³)	1,476	1,502	1,567	1,570
q_u (kPa)	12,64	15,29	16,75	19,67
S_u (kPa)	6,32	7,64	8,38	9,83
s_u (kg/cm ²)	0,064	0,078	0,085	0,100
E (kPa)	236,9	309,5	261,22	405,99

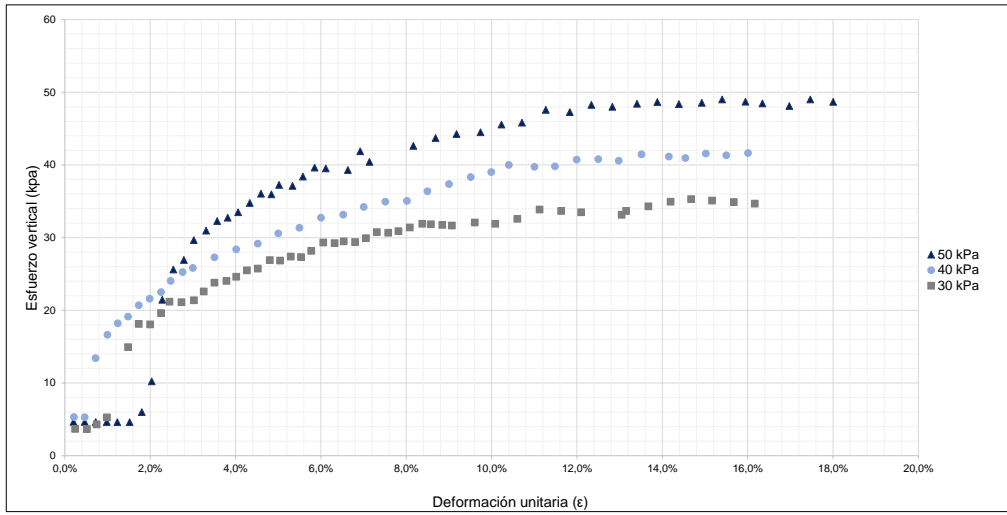


No recipiente	56	21	13
Masa recipiente (g)	11,06	7,35	7,2
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	66,99	50,11	57,2
Masa del recipiente +suelo seco (g)	43,13	32,2	35,8
w(%)	74,40%	72,07%	74,83%
Muestra	30 kPa	50 kPa	40 kPa

Dimensiones de la muestra	30 kPa		50 kPa		40 kPa	
	D(mm)	h(mm)	D(mm)	h(mm)	D(mm)	h(mm)
1	34,79	76,03	36,59	73,65	34,6	72,23
2	34,32	74,25	37,07	72,82	34,75	71,29
3	33,86	74,6	36,21	72,82	34,99	72,02
Promedio	34,32	74,96	36,62	73,10	34,78	71,85
W (g)	99,55		115,63		105,36	
D(cm)	3,43		3,66		3,48	
h(cm)	7,50		7,31		7,18	
Área (cm ²)	9,25		10,53		9,50	
Volumen (cm ³)	69,36		77,00		68,26	
Peso unitario (g/cm ³)	1,44		1,50		1,54	
σ'_v (Kpa)	30,00		50,00		40,00	
σ'_v (PSI)	4,35		7,25		5,80	
Presion de consolidacion	4,35 PSI		7,25 PSI		5,80 PSI	
Ho(mm)	74,96		73,10		71,85	
Ao (cm ²)	9,25		10,53		9,50	
Vo	693,58		770,02		682,58	
g(m/s ²)	9,81		9,81		9,81	
Defom por consol (mm)	0		0		0	
Hc(mm)	74,96		73,09666667		71,84666667	
ΔVc (cm ³)	0		0		0	
ΔHs (mm)	0		0		0	
$\Delta Vsat$ (cm ³)	0		0		0	
Ac (cm ²)	9,2527		10,5343		9,5006	
Uo	4,25		7		19,2	
Uf	6,75		10,9		22,3	

Presion de consolidacion (PSI)= 4,35						
Def(mm)	Anillo	ϵ	A(cm ²)	carga [kg]	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ (Kpa)
0,18	0,5	0,24%	9,27	0,35	3,68	3,68
0,39	0,5	0,52%	9,30	0,35	3,67	3,67
0,56	0,7	0,75%	9,32	0,41	4,31	4,31
0,74	1	0,99%	9,34	0,50	5,27	5,27
1,11	4	1,48%	9,39	1,43	14,93	14,93
1,3	5	1,73%	9,42	1,74	18,12	18,12
1,5	5	2,00%	9,44	1,74	18,07	18,07
1,69	5,5	2,25%	9,47	1,89	19,62	19,62
1,84	6	2,45%	9,49	2,05	21,18	21,18
2,05	6	2,73%	9,51	2,05	21,12	21,12
2,27	6,1	3,03%	9,54	2,08	21,37	21,37
2,44	6,5	3,26%	9,56	2,20	22,59	22,59
2,63	6,9	3,51%	9,59	2,33	23,80	23,80
2,84	7	3,79%	9,62	2,36	24,04	24,04
3,01	7,2	4,02%	9,64	2,42	24,62	24,62
3,2	7,5	4,27%	9,67	2,51	25,49	25,49
3,39	7,6	4,52%	9,69	2,54	25,74	25,74
3,6	8	4,80%	9,72	2,67	26,91	26,91
3,78	8	5,04%	9,74	2,67	26,84	26,84
3,97	8,2	5,30%	9,77	2,73	27,39	27,39
4,15	8,2	5,54%	9,79	2,73	27,32	27,32
4,33	8,5	5,78%	9,82	2,82	28,18	28,18
4,54	8,9	6,06%	9,85	2,94	29,33	29,33
4,74	8,9	6,32%	9,88	2,94	29,24	29,24
4,9	9	6,54%	9,90	2,98	29,48	29,48
5,1	9	6,80%	9,93	2,98	29,40	29,40
5,29	9,2	7,06%	9,96	3,04	29,93	29,93
5,48	9,5	7,31%	9,98	3,13	30,76	30,76
5,68	9,5	7,58%	10,01	3,13	30,67	30,67
5,86	9,6	7,82%	10,04	3,16	30,89	30,89
6,06	9,8	8,08%	10,07	3,22	31,41	31,41
6,28	10	8,38%	10,10	3,28	31,91	31,91
6,43	10	8,58%	10,12	3,28	31,84	31,84
6,63	10	8,84%	10,15	3,28	31,74	31,74
6,8	10	9,07%	10,18	3,28	31,66	31,66
7,2	10,2	9,61%	10,24	3,35	32,07	32,07
7,56	10,2	10,09%	10,29	3,35	31,90	31,90
7,95	10,5	10,61%	10,35	3,44	32,59	32,59
8,34	11	11,13%	10,41	3,59	33,86	33,86
8,72	11	11,63%	10,47	3,59	33,67	33,67
9,07	11	12,10%	10,53	3,59	33,49	33,49
9,78	11	13,05%	10,64	3,59	33,13	33,13
9,86	11,2	13,15%	10,65	3,66	33,66	33,66
10,25	11,5	13,67%	10,72	3,75	34,30	34,30
10,64	11,8	14,19%	10,78	3,84	34,94	34,94
11	12	14,67%	10,84	3,90	35,30	35,30
11,37	12	15,17%	10,91	3,90	35,10	35,10
11,75	12	15,68%	10,97	3,90	34,89	34,89
12,12	12	16,17%	11,04	3,90	34,69	34,69

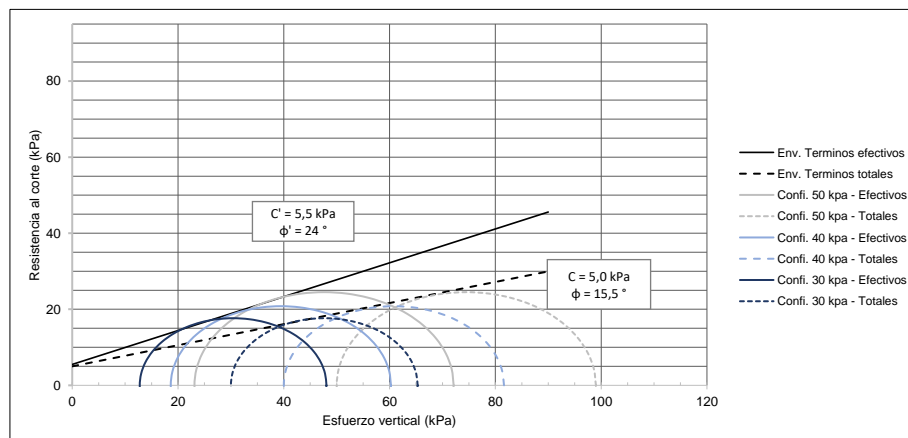
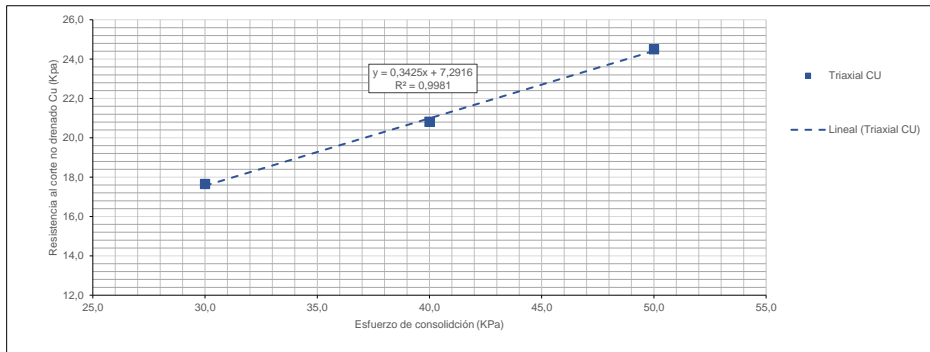
Presion de consolidacion (PSI)= 7,25						
Def(mm)	Anillo	ϵ	A(cm ²)	carga [kg]	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ (Kpa)
0,15	1	0,21%	10,56	0,50	4,67	4,67
0,34	1	0,47%	10,58	0,50	4,66	4,66
0,53	1	0,73%	10,61	0,50	4,64	4,64
0,72	1	0,98%	10,64	0,50	4,63	4,63
0,9	1	1,23%	10,67	0,50	4,62	4,62
1,11	1	1,52%	10,70	0,50	4,61	4,61
1,32	1,5	1,81%	10,73	0,66	6,01	6,01
1,49	3	2,04%	10,75	1,12	10,22	10,22
1,67	7	2,28%	10,78	2,36	21,45	21,45
1,86	8,5	2,54%	10,81	2,82	25,60	25,60
2,04	9	2,79%	10,84	2,98	26,93	26,93
2,21	10	3,02%	10,86	3,28	29,66	29,66
2,42	10,5	3,31%	10,89	3,44	30,97	30,97
2,61	11	3,57%	10,92	3,59	32,27	32,27
2,79	11,2	3,82%	10,95	3,66	32,74	32,74
2,97	11,5	4,06%	10,98	3,75	33,49	33,49
3,17	12	4,34%	11,01	3,90	34,77	34,77
3,36	12,5	4,60%	11,04	4,06	36,05	36,05
3,54	12,5	4,84%	11,07	4,06	35,95	35,95
3,67	13	5,02%	11,09	4,21	37,25	37,25
3,9	13	5,34%	11,13	4,21	37,13	37,13
4,08	13,5	5,58%	11,16	4,37	38,39	38,39
4,28	14	5,86%	11,19	4,52	39,63	39,63
4,47	14	6,12%	11,22	4,52	39,52	39,52
4,85	14	6,64%	11,28	4,52	39,31	39,31
5,22	14,5	7,14%	11,34	4,68	40,43	40,43
5,06	15	6,92%	11,32	4,83	41,86	41,86
5,97	15,5	8,17%	11,47	4,98	42,62	42,62
6,35	16	8,69%	11,54	5,14	43,70	43,70
6,71	16,3	9,18%	11,60	5,23	44,25	44,25
7,12	16,5	9,74%	11,67	5,29	44,49	44,49
7,48	17	10,23%	11,74	5,45	45,54	45,54
7,83	17,2	10,71%	11,80	5,51	45,81	45,81
8,24	18	11,27%	11,87	5,76	47,57	47,57
8,65	18	11,83%	11,95	5,76	47,27	47,27
9,02	18,5	12,34%	12,02	5,91	48,26	48,26
9,38	18,5	12,83%	12,09	5,91	47,98	47,98
9,8	18,8	13,41%	12,17	6,00	48,42	48,42
10,15	19	13,89%	12,23	6,07	48,64	48,64
10,52	19	14,39%	12,31	6,07	48,36	48,36
10,91	19,2	14,93%	12,38	6,13	48,55	48,55
11,26	19,5	15,40%	12,45	6,22	49,00	49,00
11,66	19,5	15,95%	12,53	6,22	48,69	48,69
11,95	19,5	16,35%	12,59	6,22	48,46	48,46
12,41	19,5	16,98%	12,69	6,22	48,09	48,09
12,77	20	17,47%	12,76	6,37	48,99	48,99
13,16	20	18,00%	12,85	6,37	48,68	48,68
Presion de consolidacion (PSI)= 5,80						
Def(mm)	Anillo	ϵ	A(cm ²)	carga [kg]	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$ (Kpa)
0,16	1	0,21%	9,27	0,50	5,31	5,31
0,35	1	0,47%	9,30	0,50	5,30	5,30
0,54	3,5	0,72%	9,32	1,28	13,42	13,42
0,75	4,5	1,00%	9,35	1,58	16,63	16,63
0,93	5	1,24%	9,37	1,74	18,21	18,21
1,11	5,3	1,48%	9,39	1,83	19,13	19,13
1,3	5,8	1,73%	9,42	1,99	20,69	20,69
1,49	6,1	1,99%	9,44	2,08	21,60	21,60
1,69	6,4	2,25%	9,47	2,17	22,51	22,51
1,86	6,9	2,48%	9,49	2,33	24,05	24,05
2,07	7,3	2,76%	9,52	2,45	25,26	25,26
2,25	7,5	3,00%	9,54	2,51	25,83	25,83
2,63	8	3,51%	9,59	2,67	27,28	27,28
3,01	8,4	4,02%	9,64	2,79	28,39	28,39
3,39	8,7	4,52%	9,69	2,88	29,18	29,18
3,75	9,2	5,00%	9,74	3,04	30,59	30,59
4,12	9,5	5,50%	9,79	3,13	31,36	31,36
4,5	10	6,00%	9,84	3,28	32,73	32,73
4,89	10,2	6,52%	9,90	3,35	33,16	33,16
5,25	10,6	7,00%	9,95	3,47	34,21	34,21
5,63	10,9	7,51%	10,00	3,56	34,94	34,94
6,01	11	8,02%	10,06	3,59	35,05	35,05
6,37	11,5	8,50%	10,11	3,75	36,36	36,36
6,75	11,9	9,00%	10,17	3,87	37,35	37,35
7,13	12,3	9,51%	10,23	4,00	38,33	38,33
7,49	12,6	9,99%	10,28	4,09	39,01	39,01
7,8	13	10,41%	10,33	4,21	40,01	40,01
8,25	13	11,01%	10,40	4,21	39,74	39,74
8,61	13,1	11,49%	10,45	4,24	39,81	39,81
8,99	13,5	11,99%	10,51	4,37	40,74	40,74
9,37	13,6	12,50%	10,57	4,40	40,79	40,79
9,73	13,6	12,98%	10,63	4,40	40,57	40,57
10,13	14	13,51%	10,70	4,52	41,45	41,45
10,61	14	14,15%	10,78	4,52	41,15	41,15
10,9	14	14,54%	10,83	4,52	40,96	40,96
11,26	14,3	15,02%	10,89	4,61	41,57	41,57
11,62	14,3	15,50%	10,95	4,61	41,33	41,33
12	14,5	16,01%	11,02	4,68	41,63	41,63

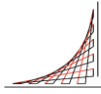


En terminos de esfuerzos totales					
Confi. 40 kpa - Totales		Confi. 30 kpa - Totales		Confi. 50 kpa - Totales	
sigma 1[kPa]	81,63	sigma 1[kPa]	65,30	sigma 1[kPa]	99,00
sigma 3[kPa]	40,00	sigma 3[kPa]	30,00	sigma 3[kPa]	50,00
X ₀ [kPa]	60,82	X ₀ [kPa]	47,65	X ₀ [kPa]	74,50
r ₀ [kPa]	20,82	r ₀ [kPa]	17,65	r ₀ [kPa]	24,50

En terminos de esfuerzos efectivos					
Confi. 40 kpa - Totales		Confi. 30 kpa - Totales		Confi. 50 kpa - Totales	
sigma' 1[kPa]	60,26	sigma' 1[kPa]	48,07	sigma' 1[kPa]	72,11
sigma' 3[kPa]	18,63	sigma' 3[kPa]	12,76	sigma' 3[kPa]	23,11
X ₀ [kPa]	39,44	X ₀ [kPa]	30,42	X ₀ [kPa]	47,61
r ₀ [kPa]	20,82	r ₀ [kPa]	17,65	r ₀ [kPa]	24,50

(σ) _c (kpa)	30,00	40,00	50,00
Cu (kpa)	17,65	20,82	24,50
E (kpa)	833	1085,43	940,79





Gs	2,61
w(%)	106,50%
so	2,77965
δw (g/cm ³)	1

W_molde con arena_sin la muestra (kg)	3,427
W_molde con arena_con caolin (kg)	5,992
W_molde con arena_con caolin_final (kg)	5,5921

H(mm)	102,666667
L1(mm)	170
L2(mm)	100

Area (mm ²)	17000,00
Area (cm ²)	170,00
Volumen inicial (cm ³)	1745,333
Volumen final (cm ³)	1721,94133
g	9,81

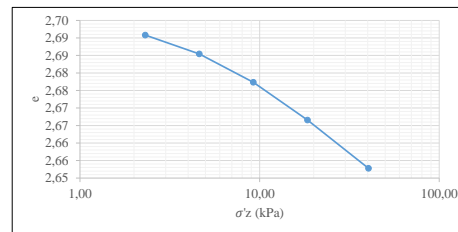
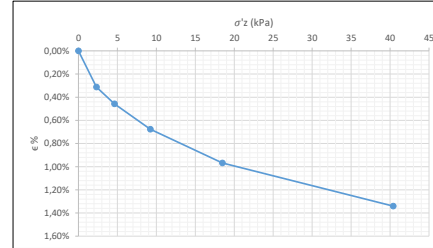
Kg	4	8	16	32	70,0
Kpa	2,31	4,62	9,23	18,47	40,39

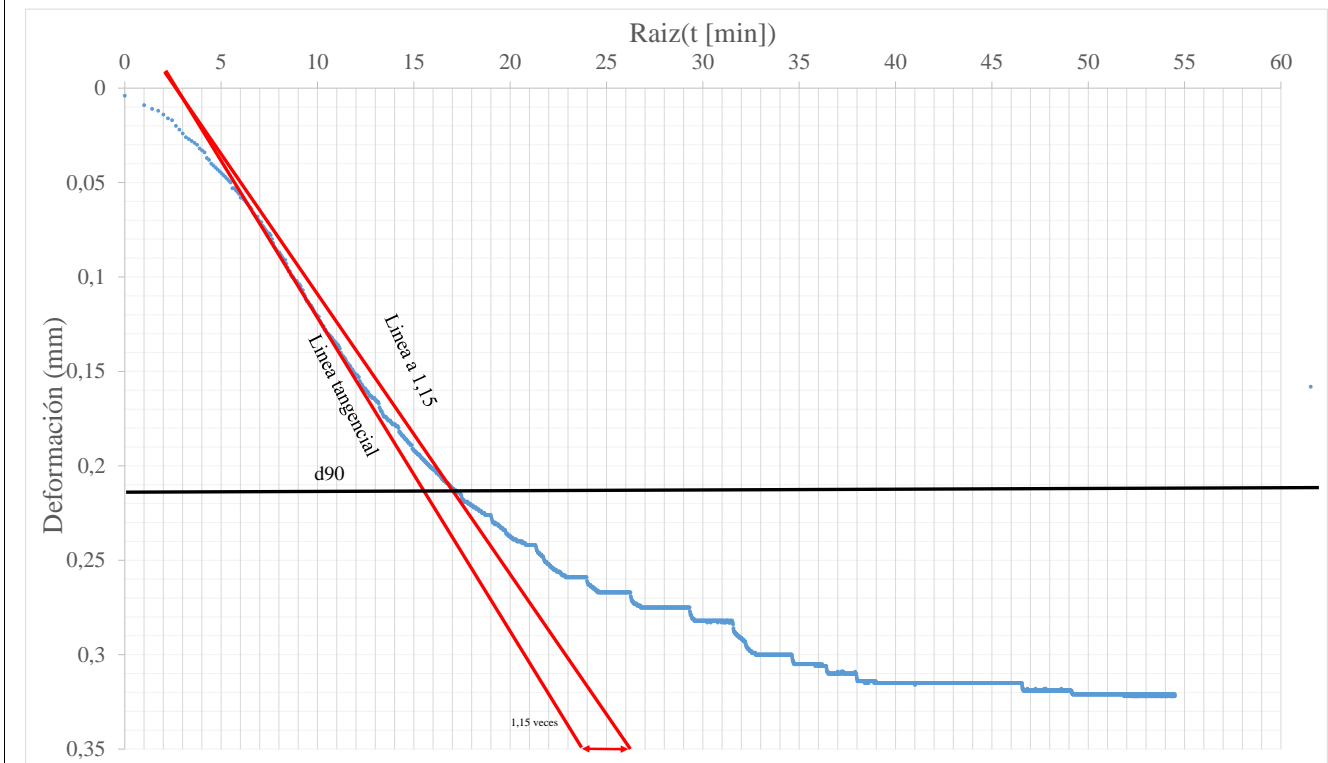
No del recipiente	41/2	A1	CINTA	14,00
Peso del recipiente (g)	6,692	10,52	7,26	8,05
Peso del recip+suelo (g)	47,401	48,171	78,961	106,201
Peso del recip+suelo seco (g)	29,9	31,80	48,10	63,20
wf(%)	75,41%	76,95%	75,56%	77,98%

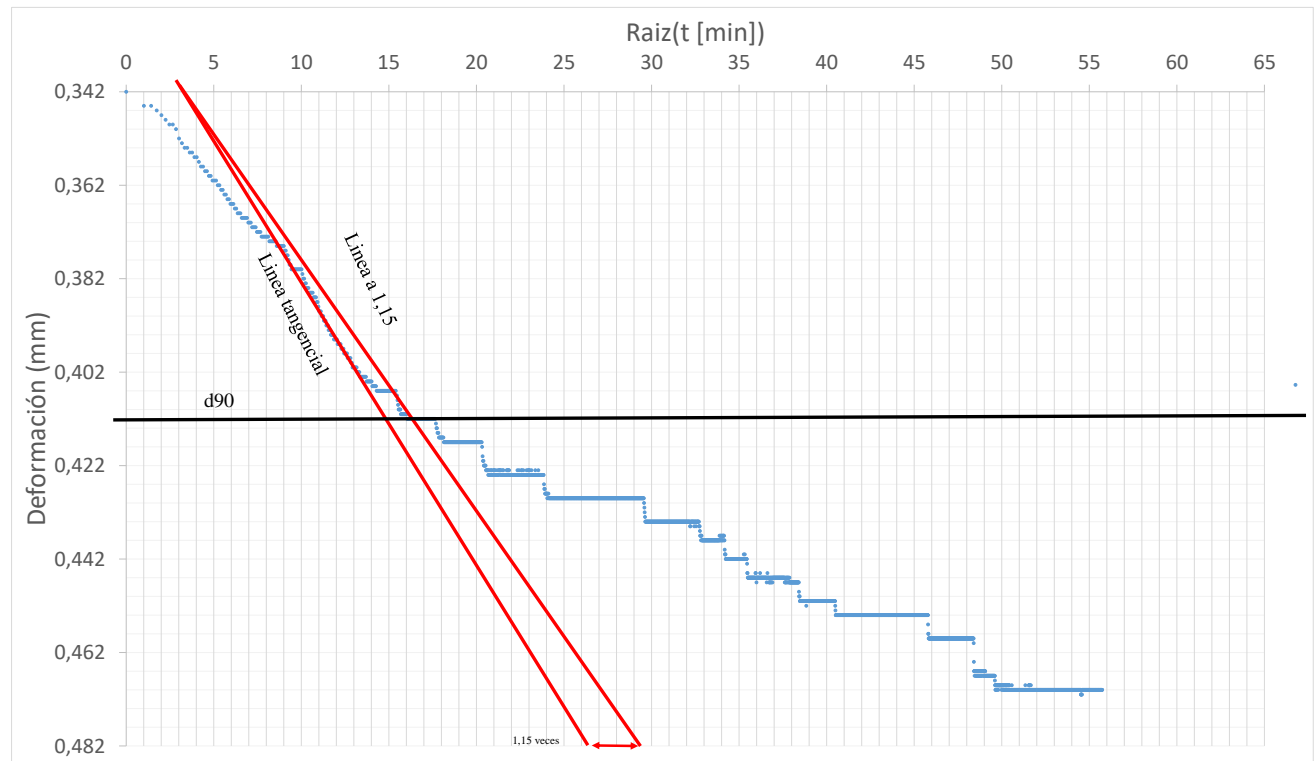
densidad final (g/cm ³)	1,48
Mtotal despues del ensayo	2165,10
wo	106,50%
wf	75,97%
ms	1230,3679

Volumen de solidos (cm ³)	471,405326
Hs (mm)	27,7297251

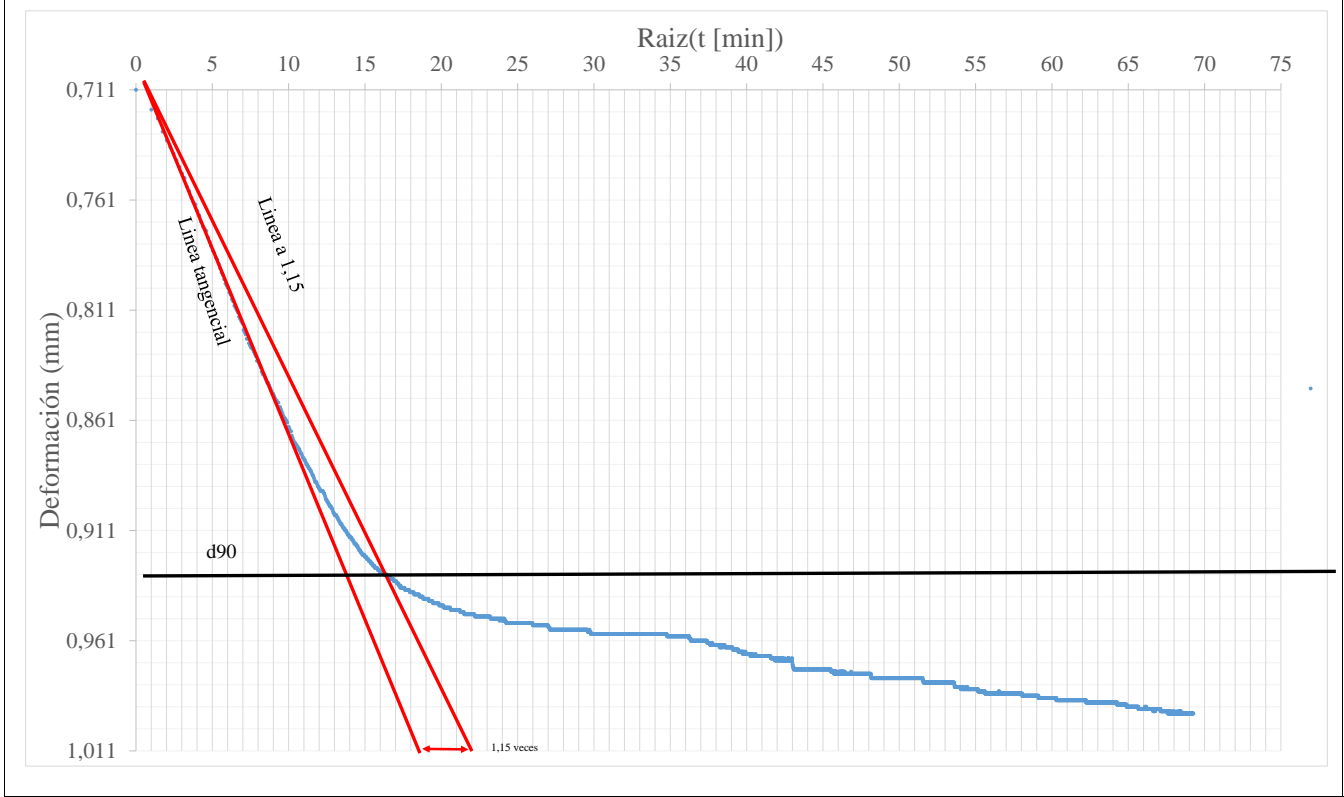
Incremento de carga (Kg)	σ'_z (kPa)	ΔH	H	e	ϵ %
0	0	0	102,67	2,702	0%
4	2,31	0,321	102,35	2,691	0,31%
8	4,62	0,47	102,20	2,685	0,46%
16	9,23	0,695	101,97	2,677	0,68%
32	18,47	0,994	101,67	2,667	0,97%
70,0	40,39	1,376	101,29	2,653	1,34%

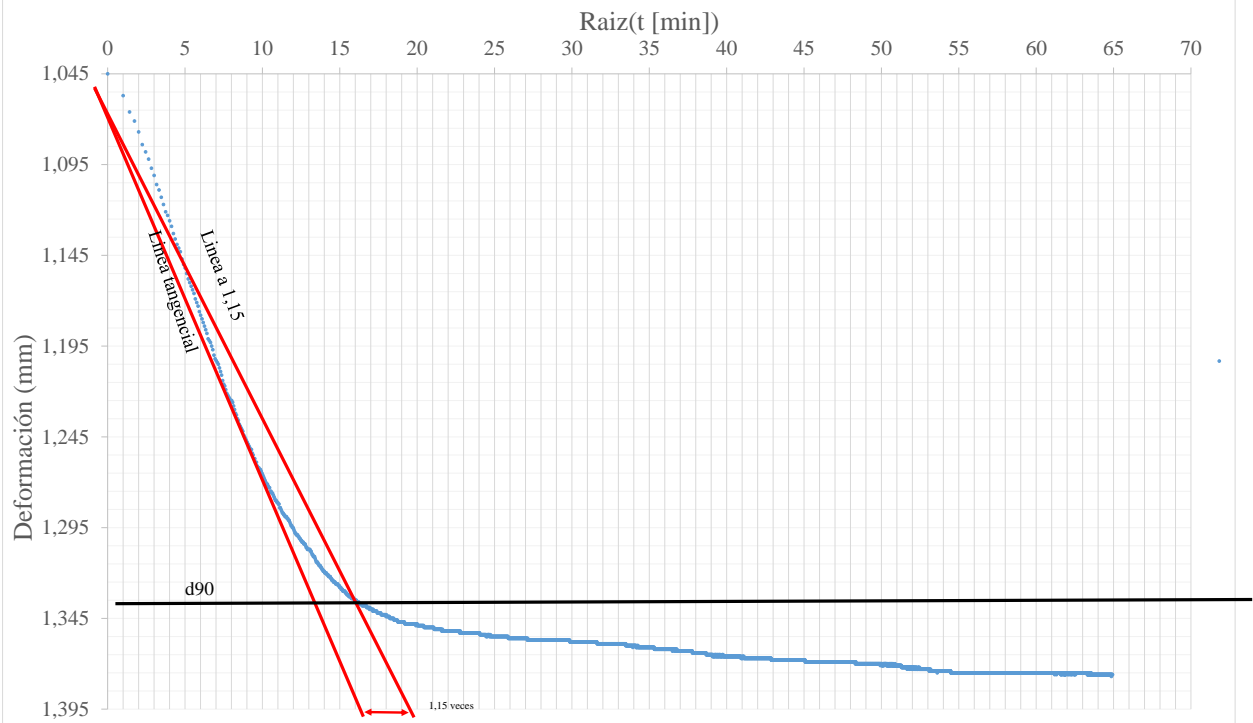












	W = 56 %		W = 55,88 %		W = 43,37 %		$\sigma_c = 40$ kpa	
	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)
	81,15	50,27	80,4	50,34	69,95	50,49		
	80,75	50,3	80,66	50,03	70,01	50,41		
	81,04	50,23	80,25	50,11	70,53	50,24		
Promedio	80,98	50,27	80,44	50,16	70,16	50,38	#iDIV/0!	#iDIV/0!
H/d	1,61		1,60		1,39		#iDIV/0!	
Masa del espécimen	257,66		256,29		236,74			
Area (cm²)	19,84		19,76		19,93		#iDIV/0!	
Volumen (cm³)	160,70		158,95		139,87		#iDIV/0!	
Y (gr/cm³)	1,603		1,612		1,693		#iDIV/0!	
g(m²/s)	9,81							

Muestra	W = 56 %
No recipiente	1
Masa recipiente (g)	19,7
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	47
Masa del recipiente +suelo seco (g)	37,2
w(%)	56,00%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 56 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_2	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_2	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,35	5	0,432%	19,93	1,739	0,432%	8,56
0,59	15	0,729%	19,99	4,830	0,729%	23,70
0,84	24	1,037%	20,05	7,611	1,037%	37,23
1,11	31	1,371%	20,12	9,773	1,371%	47,65
1,43	38	1,766%	20,20	11,935	1,766%	57,96
1,77	44	2,186%	20,29	13,788	2,186%	66,67
2,12	46,5	2,618%	20,38	14,560	2,618%	70,09
2,46	49	3,038%	20,47	15,332	3,038%	73,49
2,79	51	3,445%	20,55	15,949	3,445%	76,13
3,13	53	3,865%	20,64	16,567	3,865%	78,73
3,85	56	4,754%	20,84	17,493	4,754%	82,36
4,17	58	5,149%	20,92	18,110	5,149%	84,92
4,52	59	5,582%	21,02	18,419	5,582%	85,97
4,87	60	6,014%	21,11	18,728	6,014%	87,01
5,22	61	6,446%	21,21	19,036	6,446%	88,04
5,58	62	6,891%	21,31	19,345	6,891%	89,04
5,9	62,5	7,286%	21,40	19,499	7,286%	89,37
6,25	63	7,718%	21,50	19,654	7,718%	89,66
6,6	64	8,150%	21,61	19,962	8,150%	90,64
6,95	64,5	8,582%	21,71	20,116	8,582%	90,91
7,29	65	9,002%	21,81	20,271	9,002%	91,18
7,64	66	9,434%	21,91	20,579	9,434%	92,13
8,01	66,5	9,891%	22,02	20,734	9,891%	92,36
8,33	67	10,286%	22,12	20,888	10,286%	92,63
8,68	67,5	10,719%	22,23	21,042	10,719%	92,87
9,11	67,5	11,250%	22,36	21,042	11,250%	92,32
9,38	67,5	11,583%	22,44	21,042	11,583%	91,97
9,73	67	12,015%	22,56	20,888	12,015%	90,85
10,1	66	12,472%	22,67	20,579	12,472%	89,04
10,46	65	12,917%	22,79	20,271	12,917%	87,26
10,8	64,5	13,337%	22,90	20,116	13,337%	86,18
11,15	64	13,769%	23,01	19,962	13,769%	85,09

Muestra	W = 55,88 %
No recipiente	2
Masa recipiente (g)	16,4
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	64,1
Masa del recipiente +suelo seco (g)	47
w(%)	55,88%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 55,88 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_1	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,24	4	0,298%	19,82	1,430	0,298%	7,077
0,47	14	0,584%	19,88	4,521	0,584%	22,311
0,73	23	0,908%	19,94	7,302	0,908%	35,920
0,96	30	1,193%	20,00	9,464	1,193%	46,424
1,3	38	1,616%	20,09	11,935	1,616%	58,294
1,65	43	2,051%	20,17	13,479	2,051%	65,544
1,97	46	2,449%	20,26	14,406	2,449%	69,764
2,32	49	2,884%	20,35	15,332	2,884%	73,918
2,66	51	3,307%	20,44	15,949	3,307%	76,561
3,02	53	3,755%	20,53	16,567	3,755%	79,156
3,36	55	4,177%	20,62	17,184	4,177%	81,746
3,7	56	4,600%	20,71	17,493	4,600%	82,847
4,06	57	5,047%	20,81	17,802	5,047%	83,913
4,41	58	5,483%	20,91	18,110	5,483%	84,977
4,74	59,5	5,893%	21,00	18,573	5,893%	86,771
5,1	61	6,340%	21,10	19,036	6,340%	88,511
5,45	61,5	6,776%	21,20	19,191	6,776%	88,814
5,79	62,5	7,198%	21,29	19,499	7,198%	89,833
6,16	63,3	7,658%	21,40	19,746	7,658%	90,520
6,51	64	8,093%	21,50	19,962	8,093%	91,079
6,86	64,8	8,528%	21,60	20,209	8,528%	91,769
7,2	65,5	8,951%	21,70	20,425	8,951%	92,321
7,55	66	9,386%	21,81	20,579	9,386%	92,574
7,88	66,5	9,797%	21,91	20,734	9,797%	92,846
8,22	67	10,219%	22,01	20,888	10,219%	93,099
8,59	68	10,679%	22,12	21,197	10,679%	93,990
8,92	68,4	11,089%	22,23	21,320	11,089%	94,103
9,28	69	11,537%	22,34	21,505	11,537%	94,442
9,61	69,3	11,947%	22,44	21,598	11,947%	94,409
9,96	69,5	12,382%	22,55	21,659	12,382%	94,211
10,33	70	12,842%	22,67	21,814	12,842%	94,384
10,67	70,2	13,265%	22,78	21,875	13,265%	94,192
11	70,2	13,675%	22,89	21,875	13,675%	93,746
11,37	70,2	14,135%	23,01	21,875	14,135%	93,247
11,72	70,3	14,570%	23,13	21,906	14,570%	92,905
12,07	70,3	15,006%	23,25	21,906	15,006%	92,432
12,42	70,3	15,441%	23,37	21,906	15,441%	91,959
12,77	70,3	15,876%	23,49	21,906	15,876%	91,485
13,11	70	16,299%	23,61	21,814	16,299%	90,641
13,46	68,5	16,734%	23,73	21,351	16,734%	88,257
13,8	67	17,156%	23,85	20,888	17,156%	85,905
14,15	64	17,591%	23,98	19,962	17,591%	81,666
14,47	59	17,989%	24,10	18,419	17,989%	74,989

Muestra	W = 43,37 %
No recipiente	39
Masa recipiente (g)	8,17
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	59,97
Masa del recipiente +suelo seco (g)	44,3
w(%)	43,36%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 43,37 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_4	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,15	20	0,214%	19,98	6,375	0,214%	31,304
0,34	30	0,485%	20,03	9,464	0,485%	46,349
0,54	39	0,770%	20,09	12,244	0,770%	59,791
0,74	49	1,055%	20,15	15,332	1,055%	74,655
0,95	60	1,354%	20,21	18,728	1,354%	90,913
1,16	71	1,653%	20,27	22,122	1,653%	107,066
1,39	80	1,981%	20,34	24,899	1,981%	120,102
1,59	90	2,266%	20,40	27,983	2,266%	134,587
1,84	101	2,622%	20,47	31,375	2,622%	150,349
2,09	111	2,979%	20,55	34,457	2,979%	164,516
2,3	119	3,278%	20,61	36,922	3,278%	175,743
2,52	125	3,592%	20,68	38,771	3,592%	183,944
2,78	130	3,962%	20,76	40,311	3,962%	190,516
2,93	134	4,176%	20,80	41,543	4,176%	195,902
3,19	137	4,547%	20,88	42,467	4,547%	199,485
3,35	140	4,775%	20,93	43,391	4,775%	203,337
3,6	142	5,131%	21,01	44,007	5,131%	205,452
3,79	143	5,402%	21,07	44,315	5,402%	206,299
4,05	144	5,772%	21,16	44,623	5,772%	206,919
4,27	145	6,086%	21,23	44,931	6,086%	207,653

Resumen			
oc(kPa)	56,00%	55,88%	43,36%
Y (gr/cm ³)	1,603	1,612	1,693
qu(kPa)	92,87	94,44	207,65
Su (kPa)	46,43	47,22	103,83
su (kg/cm ²)	0,473	0,481	1,058
E (kPa)	3044,3	3197,073171	6065,66

	W = 75,11 %		W = 74,76 %		W = 58,16 %		W = 56,85 %	
	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)	Altura (mm)	Diametro (mm)
	81,31	50,05	84	50,01	69,79	50,39	67,84	50,26
	80,32	50,31	83,19	50,32	70,09	50,67	68,02	50,23
	79,69	50,71	83,55	49,67	70,67	50,19	68,09	50,27
Promedio	80,44	50,36	83,58	50,00	70,18	50,42	67,98	50,25
H/d	1,60		1,67		1,39		1,35	
Masa del espécimen	243,47		251,30		224,38		218,98	
Area (cm ²)	19,92		19,63		19,96		19,83	
Volumen (cm ³)	160,20		164,11		140,11		134,84	
Y (gr/cm ³)	1,520		1,531		1,601		1,624	
g(m ² /s)	9,81							

Muestra	W = 75,11 %
No recipiente	733
Masa recipiente (g)	7,24
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	65,13
Masa del recipiente +suelo seco (g)	40,3
w(%)	75,11%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 75,11 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ε2	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ε2	σ1-σ3 (kpa)
0,16	1	0,199%	19,96	0,502	0,199%	2,47
0,38	1	0,472%	20,01	0,502	0,472%	2,46
0,59	1,5	0,733%	20,06	0,657	0,733%	3,21
0,82	2	1,019%	20,12	0,812	1,019%	3,96
1,03	2,3	1,280%	20,17	0,904	1,280%	4,40
1,23	2,9	1,529%	20,23	1,090	1,529%	5,29
1,43	3,3	1,778%	20,28	1,213	1,778%	5,87
1,63	4	2,026%	20,33	1,430	2,026%	6,90
1,81	4,4	2,250%	20,37	1,553	2,250%	7,48
2	5	2,486%	20,42	1,739	2,486%	8,35
2,19	5,5	2,723%	20,47	1,893	2,723%	9,07
2,39	5,9	2,971%	20,53	2,017	2,971%	9,64
2,59	6,3	3,220%	20,58	2,141	3,220%	10,21
2,77	6,9	3,444%	20,63	2,326	3,444%	11,06
2,97	7,2	3,692%	20,68	2,419	3,692%	11,48
3,15	7,5	3,916%	20,73	2,512	3,916%	11,89
3,33	7,9	4,140%	20,78	2,635	4,140%	12,44
3,54	8,1	4,401%	20,83	2,697	4,401%	12,70
3,75	8,3	4,662%	20,89	2,759	4,662%	12,96
3,92	8,8	4,873%	20,94	2,914	4,873%	13,65
4,1	8,9	5,097%	20,99	2,944	5,097%	13,76
4,32	9	5,370%	21,05	2,975	5,370%	13,87
4,48	9,1	5,569%	21,09	3,006	5,569%	13,98
4,67	9,2	5,806%	21,14	3,037	5,806%	14,09
4,92	9,8	6,116%	21,21	3,223	6,116%	14,90
5,08	9,8	6,315%	21,26	3,223	6,315%	14,87
5,27	9,9	6,551%	21,31	3,254	6,551%	14,98
5,45	10	6,775%	21,36	3,284	6,775%	15,08
5,6	10,1	6,962%	21,41	3,315	6,962%	15,19
5,83	10,1	7,248%	21,47	3,315	7,248%	15,15
6,03	10,4	7,496%	21,53	3,408	7,496%	15,53
6,22	10,5	7,732%	21,59	3,439	7,732%	15,63
6,41	10,8	7,969%	21,64	3,532	7,969%	16,01
6,63	10,4	8,242%	21,71	3,408	8,242%	15,40
6,8	11	8,454%	21,76	3,594	8,454%	16,20
7,01	11,1	8,715%	21,82	3,624	8,715%	16,30
7,22	11	8,976%	21,88	3,594	8,976%	16,11
7,4	11,1	9,199%	21,93	3,624	9,199%	16,21
7,6	11,1	9,448%	21,99	3,624	9,448%	16,17
7,79	11,2	9,684%	22,05	3,655	9,684%	16,26
7,99	11,2	9,933%	22,11	3,655	9,933%	16,22
8,17	11,5	10,157%	22,17	3,748	10,157%	16,59
8,37	11,7	10,405%	22,23	3,810	10,405%	16,81
8,57	11,9	10,654%	22,29	3,872	10,654%	17,04
8,79	12	10,927%	22,36	3,903	10,927%	17,12

Muestra	W = 74,76 %
No recipiente	21
Masa recipiente (g)	7,35
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	49,03
Masa del recipiente +suelo seco (g)	31,2
w(%)	74,76%
v de deformacion (mm/min)	0,5

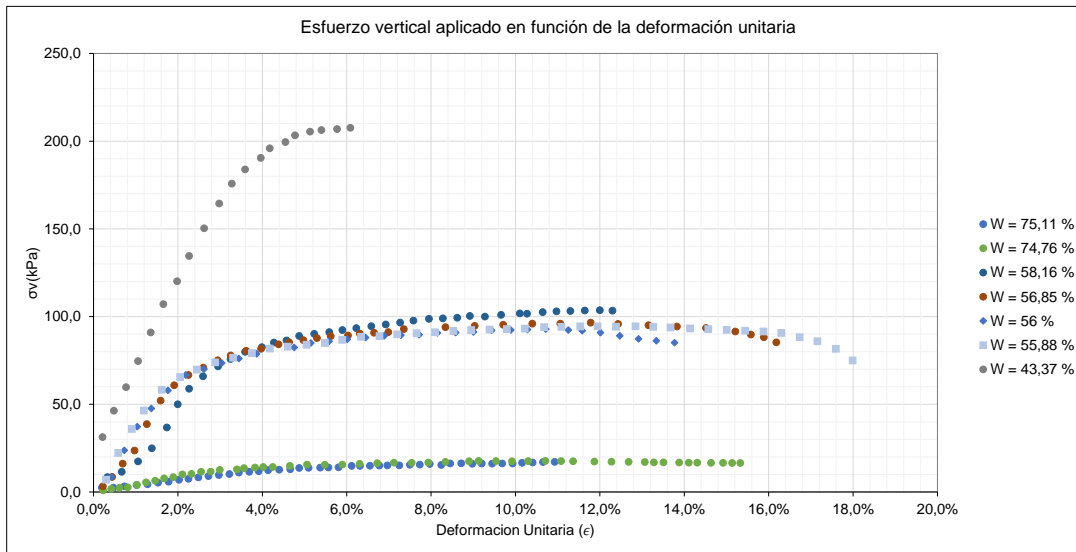
W = 74,76 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_1	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kpa)
0,19	0	0,227%	19,68	0,193	0,227%	0,963
0,35	0,5	0,419%	19,72	0,348	0,419%	1,730
0,51	0,9	0,610%	19,76	0,471	0,610%	2,341
0,68	1,1	0,814%	19,80	0,533	0,814%	2,643
0,86	2	1,029%	19,84	0,812	1,029%	4,013
1,04	3	1,244%	19,88	1,121	1,244%	5,529
1,22	3,6	1,460%	19,93	1,306	1,460%	6,430
1,4	4,5	1,675%	19,97	1,584	1,675%	7,783
1,58	5	1,890%	20,01	1,739	1,890%	8,524
1,76	6	2,106%	20,06	2,048	2,106%	10,017
1,94	6,2	2,321%	20,10	2,110	2,321%	10,297
2,13	7	2,548%	20,15	2,357	2,548%	11,477
2,32	7,1	2,776%	20,20	2,388	2,776%	11,600
2,5	7,8	2,991%	20,24	2,604	2,991%	12,623
2,84	8	3,398%	20,33	2,666	3,398%	12,869
2,98	8,5	3,565%	20,36	2,821	3,565%	13,591
3,2	8,8	3,829%	20,42	2,914	3,829%	13,999
3,36	9	4,020%	20,46	2,975	4,020%	14,268
3,55	9	4,247%	20,51	2,975	4,247%	14,234
3,89	9,5	4,654%	20,59	3,130	4,654%	14,910
4,23	10	5,061%	20,68	3,284	5,061%	15,579
4,58	10	5,480%	20,77	3,284	5,480%	15,511
4,93	10,1	5,899%	20,87	3,315	5,899%	15,587
5,27	10,5	6,305%	20,96	3,439	6,305%	16,098
5,62	10,8	6,724%	21,05	3,532	6,724%	16,459
5,95	11	7,119%	21,14	3,594	7,119%	16,676
6,3	11	7,538%	21,24	3,594	7,538%	16,601
6,63	11,2	7,933%	21,33	3,655	7,933%	16,814
6,97	11,5	8,339%	21,42	3,748	8,339%	17,164
7,44	11,8	8,902%	21,55	3,841	8,902%	17,481
7,63	12	9,129%	21,61	3,903	9,129%	17,718
7,97	12	9,536%	21,70	3,903	9,536%	17,639
8,29	12	9,919%	21,80	3,903	9,919%	17,564
8,61	12,1	10,302%	21,89	3,934	10,302%	17,628
8,95	12,2	10,708%	21,99	3,964	10,708%	17,686
9,26	12,2	11,079%	22,08	3,964	11,079%	17,613
9,5	12,2	11,366%	22,15	3,964	11,366%	17,556
9,92	12,1	11,869%	22,28	3,934	11,869%	17,320
10,26	12,1	12,276%	22,38	3,934	12,276%	17,240
10,6	12,1	12,682%	22,49	3,934	12,682%	17,160
10,92	12,1	13,065%	22,59	3,934	13,065%	17,085
11,1	12	13,281%	22,64	3,903	13,281%	16,909
11,29	12	13,508%	22,70	3,903	13,508%	16,864
11,6	12	13,879%	22,80	3,903	13,879%	16,792
11,79	12	14,106%	22,86	3,903	14,106%	16,748
11,96	12	14,310%	22,91	3,903	14,310%	16,708
12,23	12	14,633%	23,00	3,903	14,633%	16,645
12,47	12	14,920%	23,08	3,903	14,920%	16,589
12,65	12	15,135%	23,14	3,903	15,135%	16,547
12,81	12	15,327%	23,19	3,903	15,327%	16,510

Muestra	W = 58,16 %
No recipiente	62
Masa recipiente (g)	10,9492
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	60,218
Masa del recipiente +suelo seco (g)	42,1
w(%)	58,16%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 58,16 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	e4	A2 (cm²)	Carga (Kg)	ε1	σ1-σ3 (kpa)
0,23	5	0,328%	20,03	1,739	0,328%	8,517
0,47	7	0,670%	20,10	2,357	0,670%	11,505
0,74	11	1,054%	20,18	3,594	1,054%	17,472
0,97	16	1,382%	20,24	5,139	1,382%	24,903
1,22	24	1,738%	20,32	7,611	1,738%	36,749
1,4	33	1,995%	20,37	10,391	1,995%	50,042
1,59	39	2,265%	20,43	12,244	2,265%	58,804
1,82	44	2,593%	20,50	13,788	2,593%	65,998
2,07	48	2,949%	20,57	15,023	2,949%	71,646
2,28	51	3,249%	20,63	15,949	3,249%	75,829
2,52	54	3,591%	20,71	16,876	3,591%	79,948
2,8	56	3,990%	20,79	17,493	3,990%	82,530
3	58	4,275%	20,86	18,110	4,275%	85,189
3,21	59	4,574%	20,92	18,419	4,574%	86,370
3,42	61	4,873%	20,99	19,036	4,873%	88,985
3,67	62	5,229%	21,07	19,345	5,229%	90,089
3,92	63	5,585%	21,14	19,654	5,585%	91,182
4,14	64	5,899%	21,22	19,962	5,899%	92,307
4,37	65	6,227%	21,29	20,271	6,227%	93,407
4,62	66	6,583%	21,37	20,579	6,583%	94,469
4,86	67	6,925%	21,45	20,888	6,925%	95,535
5,1	68	7,267%	21,53	21,197	7,267%	96,590
5,32	69	7,580%	21,60	21,505	7,580%	97,665
5,58	70	7,951%	21,69	21,814	7,951%	98,669
5,81	70,5	8,278%	21,77	21,968	8,278%	99,013
6,05	71	8,620%	21,85	22,122	8,620%	99,336
6,26	72	8,919%	21,92	22,431	8,919%	100,392
6,51	72	9,276%	22,00	22,431	9,276%	100,000
6,78	73	9,660%	22,10	22,739	9,660%	100,945
7,09	74	10,102%	22,21	23,048	10,102%	101,815
7,21	74	10,273%	22,25	23,048	10,273%	101,621
7,47	75	10,644%	22,34	23,356	10,644%	102,556
7,7	75,6	10,971%	22,42	23,541	10,971%	102,990
7,93	76	11,299%	22,51	23,665	11,299%	103,148
8,17	76,5	11,641%	22,59	23,819	11,641%	103,421
8,42	77	11,997%	22,69	23,973	11,997%	103,671
8,63	77	12,296%	22,76	23,973	12,296%	103,318
8,88	77,5	12,653%	22,86	24,128	12,653%	103,561
9,11	78	12,980%	22,94	24,282	12,980%	103,832
9,34	78,5	13,308%	23,03	24,436	13,308%	104,098
9,54	79	13,593%	23,10	24,590	13,593%	104,410
9,83	79	14,006%	23,22	24,590	14,006%	103,911
10,09	79,8	14,377%	23,32	24,837	14,377%	104,502
10,3	80	14,676%	23,40	24,899	14,676%	104,395
10,54	80	15,018%	23,49	24,899	15,018%	103,977
10,79	80,5	15,374%	23,59	25,053	15,374%	104,182
11	80,6	15,673%	23,67	25,084	15,673%	103,942
11,27	81	16,058%	23,78	25,207	16,058%	103,977
11,52	81	16,414%	23,88	25,207	16,414%	103,535
11,76	81	16,756%	23,98	25,207	16,756%	103,112
12	81	17,098%	24,08	25,207	17,098%	102,688

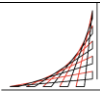
Muestra	W = 56,85 %
No recipiente	A-9
Masa recipiente (g)	8,56
Masa del recipiente +suelo humedo (g)	41,00
Masa del recipiente +suelo seco (g)	29,23
w(%)	56,85%
v de deformacion (mm/min)	0,5

W = 56,85 %						
Lectura deformimetro	Lectura de anillo	ϵ_3	A2 (cm ²)	Carga (Kg)	ϵ_1	$\sigma_1-\sigma_3$ (kpa)
0,15	1,5	0,221%	19,88	0,657	0,221%	3,241996797
0,3	5	0,441%	19,92	1,739	0,441%	8,562703382
0,47	10	0,691%	19,97	3,284	0,691%	16,13241632
0,66	15	0,971%	20,03	4,830	0,971%	23,65579958
0,86	25	1,265%	20,09	7,920	1,265%	38,67491591
1,08	34	1,589%	20,15	10,700	1,589%	52,08045494
1,3	40	1,912%	20,22	12,553	1,912%	60,89915214
1,53	44	2,251%	20,29	13,788	2,251%	66,66088739
1,77	47	2,604%	20,36	14,715	2,604%	70,88235795
2	50	2,942%	20,44	15,641	2,942%	75,08248134
2,21	52	3,251%	20,50	16,258	3,251%	77,79810655
2,46	54	3,619%	20,58	16,876	3,619%	80,44558844
2,7	55	3,972%	20,65	17,184	3,972%	81,617072
2,98	57	4,383%	20,74	17,802	4,383%	84,186598
3,15	58	4,633%	20,80	18,110	4,633%	85,42233997
3,38	59	4,972%	20,87	18,419	4,972%	86,5700042
3,6	60	5,295%	20,94	18,728	5,295%	87,72092266
3,82	61	5,619%	21,02	19,036	5,619%	88,86192006
4,1	61,5	6,031%	21,11	19,191	6,031%	89,19135132
4,29	62,5	6,310%	21,17	19,499	6,310%	90,35620928
4,52	63	6,649%	21,25	19,654	6,649%	90,7423951
4,75	63,5	6,987%	21,32	19,808	6,987%	91,12340669
5	65	7,355%	21,41	20,271	7,355%	92,8842845
5,67	66,5	8,340%	21,64	20,734	8,340%	93,99469693
6,14	67,5	9,032%	21,80	21,042	9,032%	94,67413208
6,6	68,5	9,708%	21,97	21,351	9,708%	95,34795818
7,07	69,5	10,400%	22,14	21,659	10,400%	95,98533423
7,52	70	11,062%	22,30	21,814	11,062%	95,95489102
8,01	71	11,782%	22,48	22,122	11,782%	96,52354159
8,45	71	12,430%	22,65	22,122	12,430%	95,81538755
8,94	71	13,150%	22,84	22,122	13,150%	95,02676146
9,4	71	13,827%	23,02	22,122	13,827%	94,2864186
9,87	71	14,518%	23,20	22,122	14,518%	93,52998133
10,34	70	15,210%	23,39	21,814	15,210%	91,47957056
10,59	69	15,577%	23,49	21,505	15,577%	89,79442421
10,8	68	15,886%	23,58	21,197	15,886%	88,18214956
11	66	16,180%	23,66	20,579	16,180%	85,31516067



σ_c (kPa)	75,11%	74,76%	58,16%	56,85%	56,00%	55,88%	43,36%
γ (gr/cm ³)	1,520	1,531	1,601	1,624	1,603	1,612	1,693
q_u (kPa)	17,12	17,72	104,50	96,52	92,869	94,442	207,653
S_u (kPa)	8,60	8,90	52,30	48,30	46,400	47,200	103,800
s_u (kg/cm ²)	0,088	0,091	0,533	0,492	0,473	0,481	1,058
E (kPa)	339,90	474,88	2514,57	3187,96	3044,29	3197,07	6065,66

<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>50</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>4</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>23,5</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>17,7</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>42%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B2</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>3,96</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>4,14</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>4,18</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>4,06</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,12</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,05</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>0,38</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>2,33</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>214,93</td></tr> </table>	Recp	50	Peso (g)	4	Peso+muestra (g)	23,5	Peso+muestra+seco (g)	17,7	Humedad del suelo	42%	B2		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	3,96	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,14	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,18	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,06	Masa papel seco	Mf (g)	0,12	Masa de agua	Mw (g)	0,05		Wf	0,38	Succión Matricial		h (LOG kPa)	2,33	h (kPa)	214,93	<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>133</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>7,2027</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>121,5246</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>71,6</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>78%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>4,01</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>4,32</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>4,22</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>4,02</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,12</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>0,58</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>1,63</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>42,28</td></tr> </table>	Recp	133	Peso (g)	7,2027	Peso+muestra (g)	121,5246	Peso+muestra+seco (g)	71,6	Humedad del suelo	78%	B1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	4,01	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,32	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,22	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,02	Masa papel seco	Mf (g)	0,20	Masa de agua	Mw (g)	0,12		Wf	0,58	Succión Matricial		h (LOG kPa)	1,63	h (kPa)	42,28		
Recp	50																																																																																				
Peso (g)	4																																																																																				
Peso+muestra (g)	23,5																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	17,7																																																																																				
Humedad del suelo	42%																																																																																				
B2																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	3,96																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,14																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,18																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,06																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,12																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,05																																																																																			
	Wf	0,38																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	2,33																																																																																				
h (kPa)	214,93																																																																																				
Recp	133																																																																																				
Peso (g)	7,2027																																																																																				
Peso+muestra (g)	121,5246																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	71,6																																																																																				
Humedad del suelo	78%																																																																																				
B1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	4,01																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,32																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,22																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,02																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,20																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,12																																																																																			
	Wf	0,58																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	1,63																																																																																				
h (kPa)	42,28																																																																																				
<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>m1</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>63</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>10,8226</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>45,2827</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>33</td></tr> <tr><td></td><td>55%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>1,409</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>1,584</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>1,534</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>1,409</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,1246</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,0504</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>40,4%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>2,18</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>149,96</td></tr> </table>	Recp	m1	Peso (g)	63	Peso+muestra (g)	10,8226	Peso+muestra+seco (g)	45,2827	Humedad del suelo	33		55%	B1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	1,409	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,584	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,534	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	1,409	Masa papel seco	Mf (g)	0,1246	Masa de agua	Mw (g)	0,0504		Wf	40,4%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	2,18	h (kPa)	149,96	<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>72</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>11,053</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>34,8082</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>27,2</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>47%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B6</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>0,928</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>1,091</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>1,095</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>0,931</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,1644</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>-0,0017</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>-1,0%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>5,41</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>255595,69</td></tr> </table>	Recp	72	Peso (g)	11,053	Peso+muestra (g)	34,8082	Peso+muestra+seco (g)	27,2	Humedad del suelo	47%	B6		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	0,928	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,091	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,095	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	0,931	Masa papel seco	Mf (g)	0,1644	Masa de agua	Mw (g)	-0,0017		Wf	-1,0%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	5,41	h (kPa)	255595,69
Recp	m1																																																																																				
Peso (g)	63																																																																																				
Peso+muestra (g)	10,8226																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	45,2827																																																																																				
Humedad del suelo	33																																																																																				
	55%																																																																																				
B1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	1,409																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,584																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,534																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	1,409																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,1246																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,0504																																																																																			
	Wf	40,4%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	2,18																																																																																				
h (kPa)	149,96																																																																																				
Recp	72																																																																																				
Peso (g)	11,053																																																																																				
Peso+muestra (g)	34,8082																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	27,2																																																																																				
Humedad del suelo	47%																																																																																				
B6																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	0,928																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,091																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,095																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	0,931																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,1644																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	-0,0017																																																																																			
	Wf	-1,0%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	5,41																																																																																				
h (kPa)	255595,69																																																																																				
<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>M3</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>26</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>7,7309</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>18,8116</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>14,5</td></tr> <tr><td></td><td>64%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B2</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>0,9403</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>1,2886</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>1,15705</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>0,9778</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,17925</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,16905</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>94,3%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>1,14</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>13,77</td></tr> </table>	Recp	M3	Peso (g)	26	Peso+muestra (g)	7,7309	Peso+muestra+seco (g)	18,8116	Humedad del suelo	14,5		64%	B2		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	0,9403	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,2886	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,15705	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	0,9778	Masa papel seco	Mf (g)	0,17925	Masa de agua	Mw (g)	0,16905		Wf	94,3%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	1,14	h (kPa)	13,77	<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>68</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>11,1038</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>63,1102</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>42,29</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>67%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">4</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>2,018</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>2,292</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>2,140</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>2,018</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,122</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,152</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>125%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>0,73</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>5,38</td></tr> </table>	Recp	68	Peso (g)	11,1038	Peso+muestra (g)	63,1102	Peso+muestra+seco (g)	42,29	Humedad del suelo	67%	4		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	2,018	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	2,292	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	2,140	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	2,018	Masa papel seco	Mf (g)	0,122	Masa de agua	Mw (g)	0,152		Wf	125%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	0,73	h (kPa)	5,38
Recp	M3																																																																																				
Peso (g)	26																																																																																				
Peso+muestra (g)	7,7309																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	18,8116																																																																																				
Humedad del suelo	14,5																																																																																				
	64%																																																																																				
B2																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	0,9403																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,2886																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,15705																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	0,9778																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,17925																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,16905																																																																																			
	Wf	94,3%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	1,14																																																																																				
h (kPa)	13,77																																																																																				
Recp	68																																																																																				
Peso (g)	11,1038																																																																																				
Peso+muestra (g)	63,1102																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	42,29																																																																																				
Humedad del suelo	67%																																																																																				
4																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	2,018																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	2,292																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	2,140																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	2,018																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,122																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,152																																																																																			
	Wf	125%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	0,73																																																																																				
h (kPa)	5,38																																																																																				
<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>402</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>6,6</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>54,1</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>33,5</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>76,6%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>1,402</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>1,671</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>1,529</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>1,403</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,126</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,143</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>113%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>0,88</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>7,63</td></tr> </table>	Recp	402	Peso (g)	6,6	Peso+muestra (g)	54,1	Peso+muestra+seco (g)	33,5	Humedad del suelo	76,6%	1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	1,402	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,671	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,529	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	1,403	Masa papel seco	Mf (g)	0,126	Masa de agua	Mw (g)	0,143		Wf	113%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	0,88	h (kPa)	7,63	<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>10</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>17,66</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>55,19</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>40,72</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>63%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>4,020</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>4,300</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>4,203</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>4,010</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,193</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,087</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>45%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>1,80</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>63,33</td></tr> </table>	Recp	10	Peso (g)	17,66	Peso+muestra (g)	55,19	Peso+muestra+seco (g)	40,72	Humedad del suelo	63%	B1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	4,020	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,300	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,203	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,010	Masa papel seco	Mf (g)	0,193	Masa de agua	Mw (g)	0,087		Wf	45%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	1,80	h (kPa)	63,33		
Recp	402																																																																																				
Peso (g)	6,6																																																																																				
Peso+muestra (g)	54,1																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	33,5																																																																																				
Humedad del suelo	76,6%																																																																																				
1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	1,402																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	1,671																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	1,529																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	1,403																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,126																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,143																																																																																			
	Wf	113%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	0,88																																																																																				
h (kPa)	7,63																																																																																				
Recp	10																																																																																				
Peso (g)	17,66																																																																																				
Peso+muestra (g)	55,19																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	40,72																																																																																				
Humedad del suelo	63%																																																																																				
B1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	4,020																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,300																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,203																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	4,010																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,193																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,087																																																																																			
	Wf	45%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	1,80																																																																																				
h (kPa)	63,33																																																																																				
<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>M2</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>17,4</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>35</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>28,2</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>63,0%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>3,965</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>4,097</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>4,058</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>3,966</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,092</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,039</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>43%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>1,99</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>98,37</td></tr> </table>	Recp	M2	Peso (g)	17,4	Peso+muestra (g)	35	Peso+muestra+seco (g)	28,2	Humedad del suelo	63,0%	1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	3,965	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,097	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,058	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	3,966	Masa papel seco	Mf (g)	0,092	Masa de agua	Mw (g)	0,039		Wf	43%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	1,99	h (kPa)	98,37	<table border="1"> <tr><td>Recp</td><td>M3</td></tr> <tr><td>Peso (g)</td><td>14,7</td></tr> <tr><td>Peso+muestra (g)</td><td>31,9</td></tr> <tr><td>Peso+muestra+seco (g)</td><td>25</td></tr> <tr><td>Humedad del suelo</td><td>67%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">B1</td></tr> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro (frio)</td><td>Tc (g)</td><td>2,020</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel humeda</td><td>M1 (g)</td><td>2,150</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel filtro + papel seco</td><td>M2 (g)</td><td>2,109</td></tr> <tr><td>Recipiente para papel (caliente)</td><td>Th (g)</td><td>2,021</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td>Masa papel seco</td><td>Mf (g)</td><td>0,088</td></tr> <tr><td>Masa de agua</td><td>Mw (g)</td><td>0,041</td></tr> <tr><td></td><td>Wf</td><td>47%</td></tr> </table> <table border="1"> <tr><td colspan="2">Succión Matricial</td></tr> <tr><td>h (LOG kPa)</td><td>1,78</td></tr> <tr><td>h (kPa)</td><td>60,29</td></tr> </table>	Recp	M3	Peso (g)	14,7	Peso+muestra (g)	31,9	Peso+muestra+seco (g)	25	Humedad del suelo	67%	B1		Succión Matricial		Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	2,020	Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	2,150	Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	2,109	Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	2,021	Masa papel seco	Mf (g)	0,088	Masa de agua	Mw (g)	0,041		Wf	47%	Succión Matricial		h (LOG kPa)	1,78	h (kPa)	60,29		
Recp	M2																																																																																				
Peso (g)	17,4																																																																																				
Peso+muestra (g)	35																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	28,2																																																																																				
Humedad del suelo	63,0%																																																																																				
1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	3,965																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	4,097																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	4,058																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	3,966																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,092																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,039																																																																																			
	Wf	43%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	1,99																																																																																				
h (kPa)	98,37																																																																																				
Recp	M3																																																																																				
Peso (g)	14,7																																																																																				
Peso+muestra (g)	31,9																																																																																				
Peso+muestra+seco (g)	25																																																																																				
Humedad del suelo	67%																																																																																				
B1																																																																																					
Succión Matricial																																																																																					
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	2,020																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	2,150																																																																																			
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	2,109																																																																																			
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	2,021																																																																																			
Masa papel seco	Mf (g)	0,088																																																																																			
Masa de agua	Mw (g)	0,041																																																																																			
	Wf	47%																																																																																			
Succión Matricial																																																																																					
h (LOG kPa)	1,78																																																																																				
h (kPa)	60,29																																																																																				



Recp	M1
Peso (g)	17,2
Peso+muestra (g)	32,7
Peso+muestra+seco (g)	27,4
Humedad del suelo	52,0%

		3
		Succion Matricial
Recipiente para papel filtro (frio)	Tc (g)	2,020
Recipiente para papel filtro + papel humeda	M1 (g)	2,178
Recipiente para papel filtro + papel seco	M2 (g)	2,141
Recipiente para papel (caliente)	Th (g)	2,020

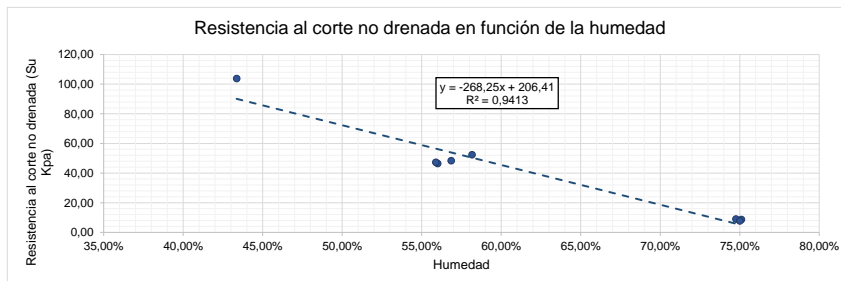
Masa papel seco	Mf (g)	0,121
Masa de agua	Mw (g)	0,038
	Wf	31%

		Succion Matricial
h (LOG kPa)		2,91
h (kPa)		812,15

Tabla resumen de resultados	
W_Suelo (%)	Succ.Matricial [kPa]
42%	214,93
55%	149,96
64%	13,77
63%	63,33
78%	42,28
77%	7,63
63,0%	98,37
67%	60,29
52,0%	812,15

Determinación de la resistencia al corte no drenada del suelo parcialmente saturado

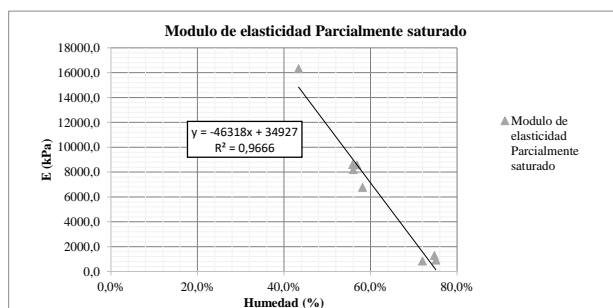
α (kPa)	75,11%	74,76%	58,16%	56,85%	56,00%	55,88%	43,36%
γ (gr/cm ³)	1,520	1,531	1,601	1,624	1,603	1,612	1,693
q_u (kPa)	17,122	17,718	104,502	96,524	92,869	94,442	207,653
S_u (kPa)	8,600	8,900	52,300	48,300	46,400	47,200	103,800
s_u (kg/cm ³)	0,088	0,091	0,533	0,492	0,473	0,481	1,058
E (kPa)	339,900	474,880	2514,573	3187,958	3044,292	3197,073	6065,657



Determinación del módulo de elasticidad parcialmente saturado

E Triaxial saturado	833
E Inconfinado Saturado	309,5
E Triax/E Inco	2,69

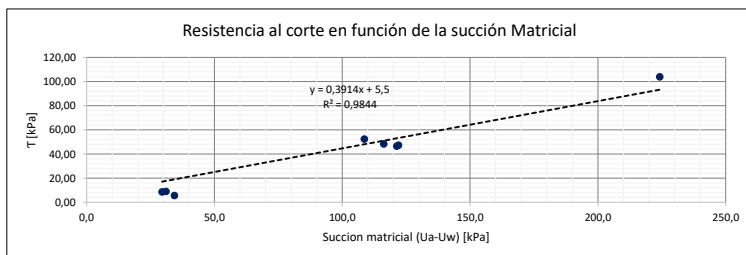
Humedad	Parcialmente Saturado	
	E_inconfinado [kPa]	E_Triax = E_Inco*2,69 [kPa]
%		
72,58%	309,5	833
74,76%	474,88	1277,4
75,11%	339,9	914,3
58,16%	2514,572864	6764,2
56,85%	3187,96	8575,6
56,00%	3044,292	8189,1
55,88%	3197,073	8600,1
43,36%	6065,657	16316,6



Determinación de parámetros del criterio de falla de Mohr Coulomb Extendido ϕ^b

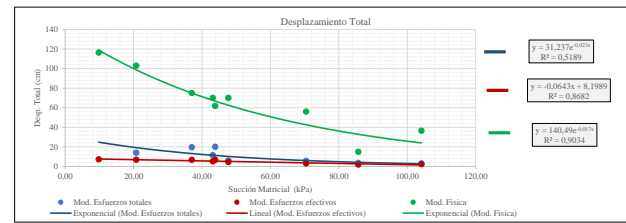
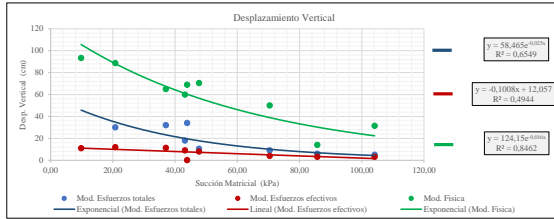
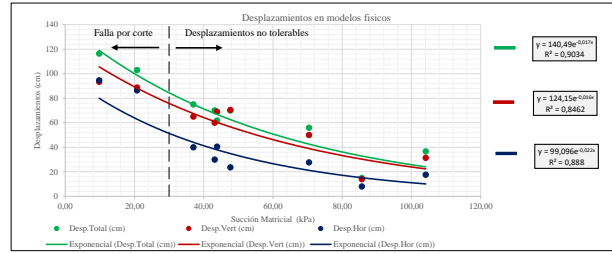
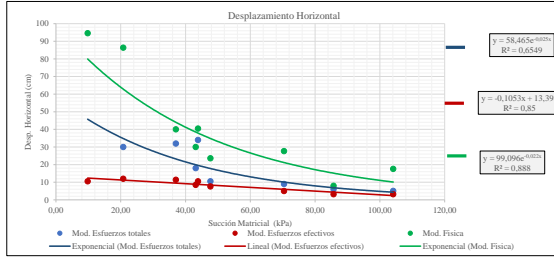
Parámetros de la curva de retención de Humedad			
Contenido Vol agua saturación	0,68	m	0,35
Contenido Vol agua residual	0,08	n	1,5321
		a	0,0057

Humedad (%)	Resistencia al corte No drenada Su [kPa]	Resistencia al corte T [kPa]	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	θ (m ³ /m ³)	Θ	Succión Matricial (ua-uw)
74,0%	7,64	5,50	15,27	8,78	0,66	0,97	34,4
75,1%	8,56	8,56	15,22	8,69	0,67	0,98	29,5
74,8%	8,86	8,86	15,24	8,72	0,66	0,98	31,0
58,2%	52,25	52,25	16,07	10,16	0,60	0,87	108,6
56,8%	48,26	48,26	16,14	10,29	0,60	0,86	116,2
56,0%	46,43	46,43	16,18	10,37	0,59	0,86	121,3
55,9%	47,22	47,22	16,19	10,38	0,59	0,85	122,0
43,4%	103,83	103,83	16,82	11,73	0,52	0,73	224,2



Tan (ϕ^b)	0,3914
(ϕ^b)	21,6
C'	5,5
ϕ'	24

MODELO	W %	Ua-Uw [kPa] [kPa]	MODELACION NUMERICA TIPO 1			MODELACION NUMERICA TIPO 2			MODELO FISICO ESCALA PROTOTIPO		
			Desp.Hor (cm)	Desp.Vert (cm)	Desp.Total (cm)	Desp.Hor (cm)	Desp.Vert (cm)	Desp.Total (cm)	Desp.Hor (cm)	Desp.Vert (cm)	Desp.Total (cm)
MV5	79%	9,80				10,5	7,2	11	94,6	93,4	116,4
MV6	77%	20,76	30	14	30	12	6,8	12	86,4	88,7	103
T5	73,4%	37,03	32	19,5	32	11,4	6,66	11,4	40	65	75
T7	71,9%	43,15	18	11,4	18	8,5	5,1	9	30	60	70
T2	71,8%	43,85	34	20	34	10,5	6,65	0,11	40,5	69	61,8
T3	70,9%	47,69	10,5	6	10,5	7,6	4,5	8	23,6	70,5	70
T6	65,7%	70,40	9	5,7	9	5	3	4	27,7	50	56
T4	62,5%	85,69	6	3,6	6	3,2	1,9	3,2	8	14	15
T1	58,4%	104,12	5,1	3	5,1	3,2	2,25	3,2	17,6	31,4	36,6



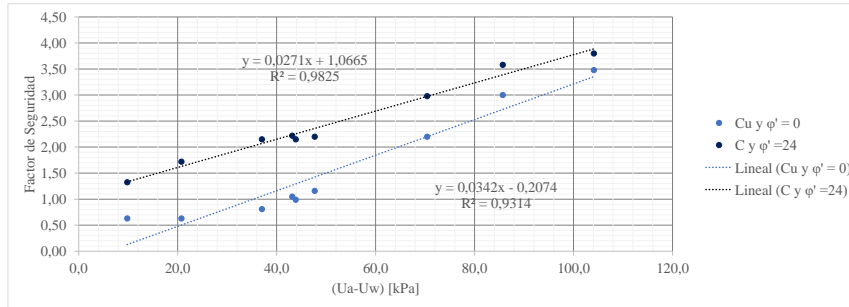
m	0,34730109
n	1,5321
a	0,0057

Contenido Vol agua saturacion	0,68
Contenido Vol agua residual	0,08

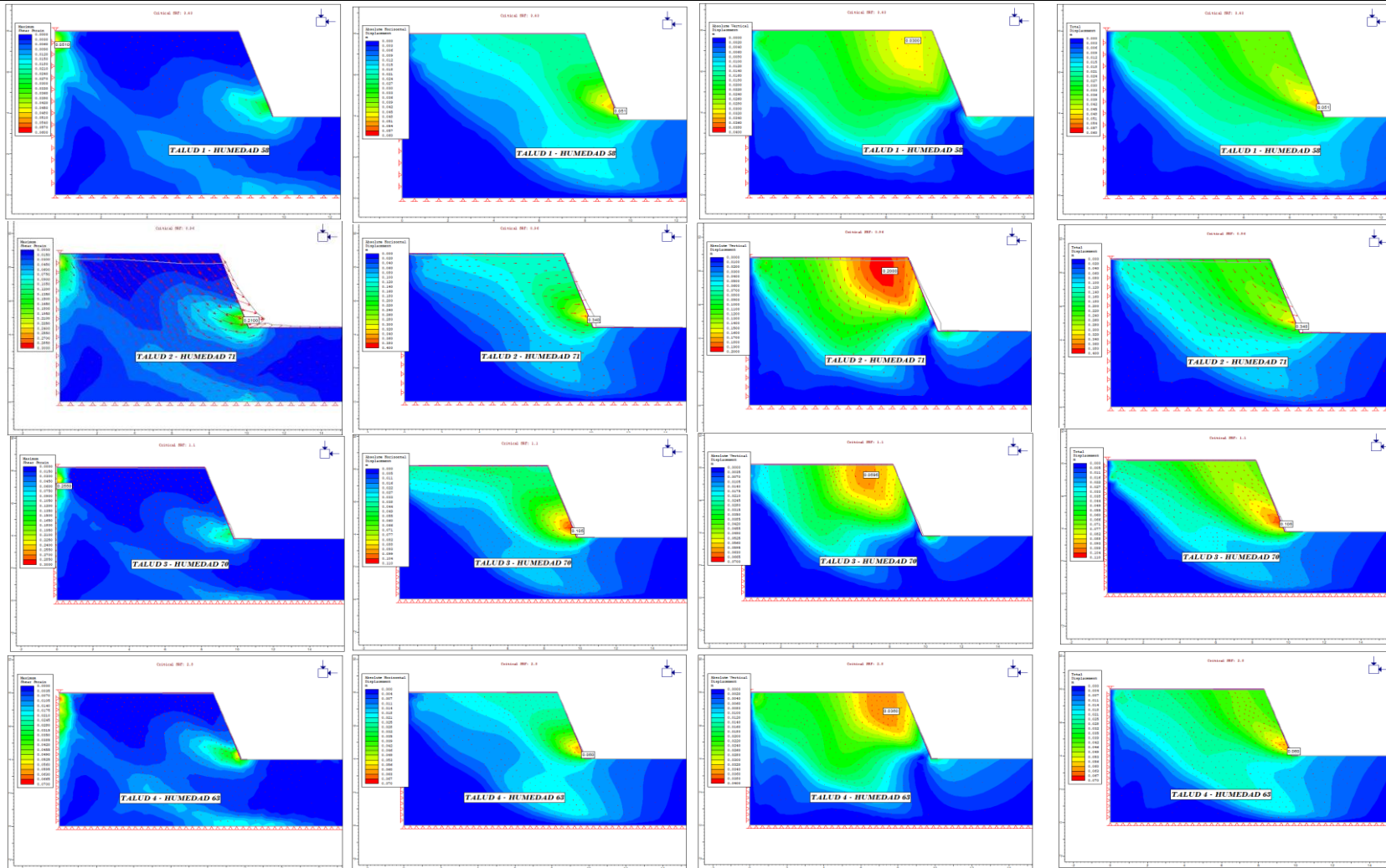
C'	5,5 kPa
φ'	24°

φb	21,60
Tan (φb)	0,3914
C	5,50

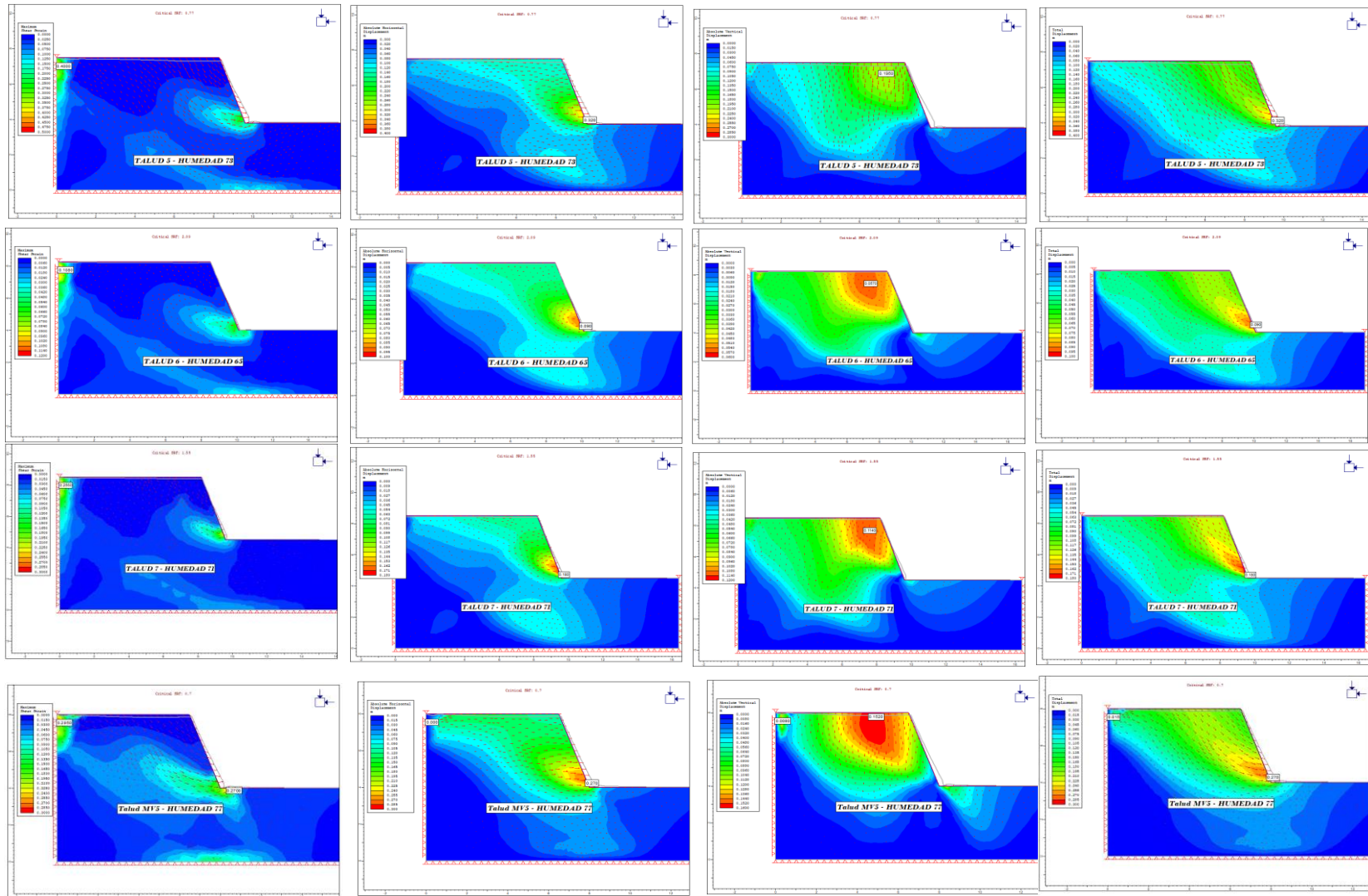
Modelo	Humedad	Y (kN/m³)	Yd (kN/m³)	θ (m³/m³)	θ	(Ua-Uw) [kPa]	Cu y φ' = 0		Estimada [kPa]		C y φ' = 24		Diferencia Dada [kPa]	E [kPa]
							Cu (kPa)	F.S	(Ua-Uw)	Tan(φb)	C= C'+ (Ua-Uw)	Tan(φb)		
T1	59,0%	16,031	10,08	0,61	0,88	104,1	48,22	3,48	40,75	46,25	3,80	1,97	7612,02	
T2	71,8%	15,385	8,96	0,66	0,96	43,9	13,83	0,99	17,16	22,66	2,15	8,84	1677,40	
T3	70,9%	15,431	9,03	0,65	0,96	47,7	16,24	1,16	18,67	24,17	2,20	7,93	2093,49	
T4	63%	15,853	9,75	0,62	0,90	85,7	38,72	3,00	33,54	39,04	3,58	0,32	5973,02	
T5	73,4%	15,305	8,83	0,66	0,97	37,0	9,54	0,81	14,49	19,99	2,15	10,45	938,30	
T6	65,7%	15,691	9,47	0,63	0,93	70,4	30,09	2,20	27,56	33,06	2,98	2,96	4484,09	
T7	71,9%	15,377	8,94	0,66	0,96	43,2	13,39	1,05	16,89	22,39	2,22	9,00	1601,46	
MV-6	77%	15,123	8,54	0,67	0,99	20,8	7,64	0,63	8,12	13,62	1,72	5,98	833*	
MV-5	79%	15,022	8,39	0,68	1,00	9,8	7,64	0,63	3,84	9,34	1,33	1,70	833*	
	75%	15,224	8,70	0,67	0,98	30,0								



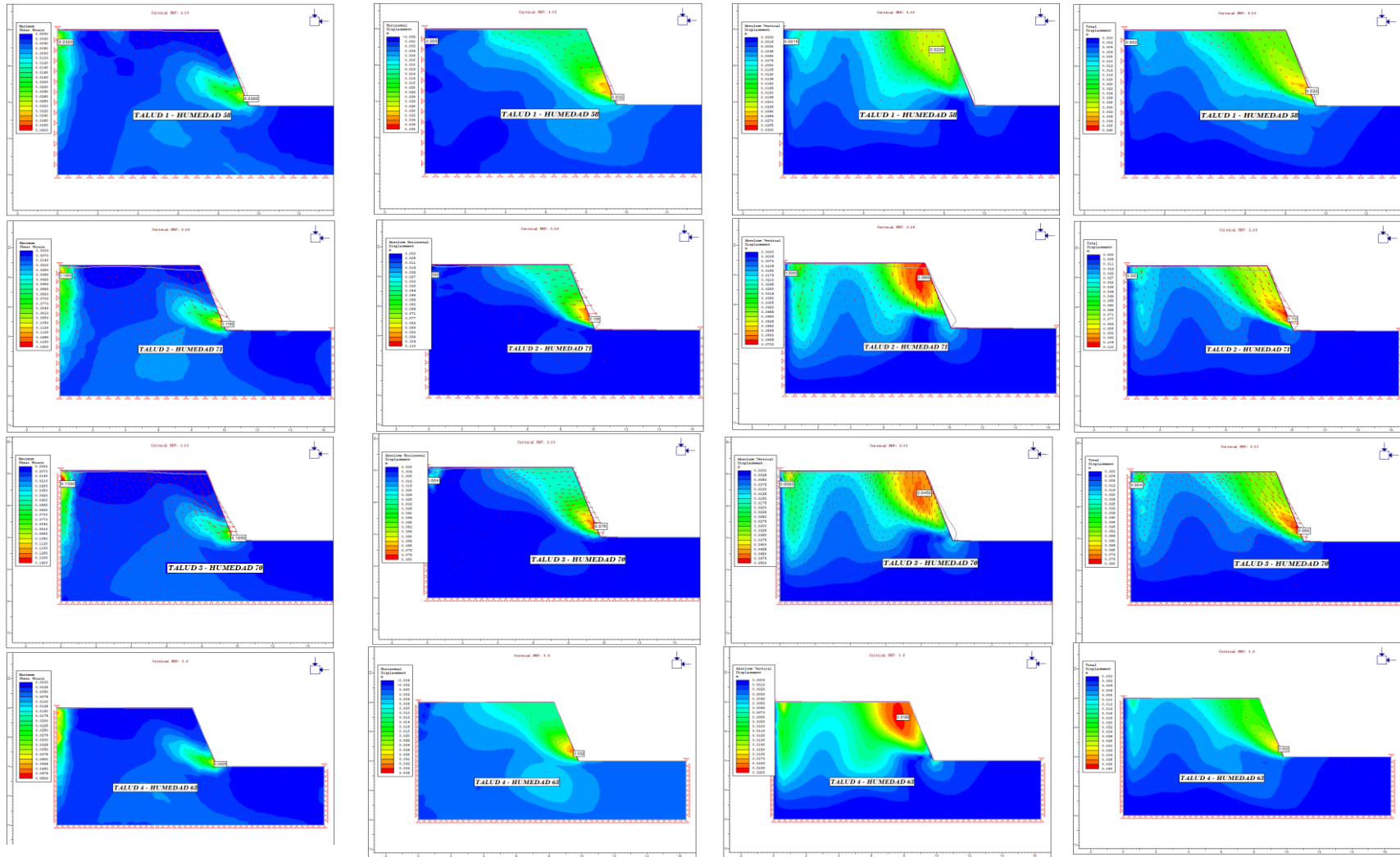
MODELACION TIPO 1

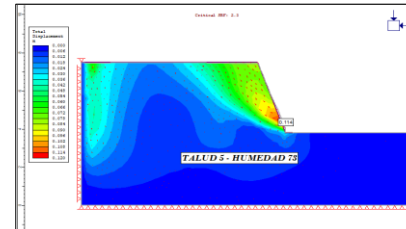
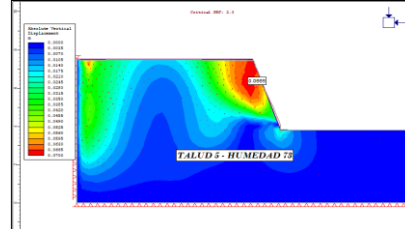
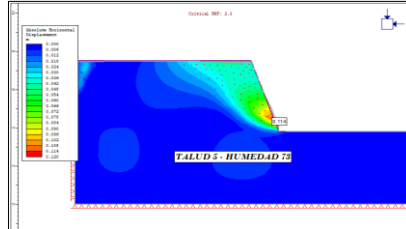
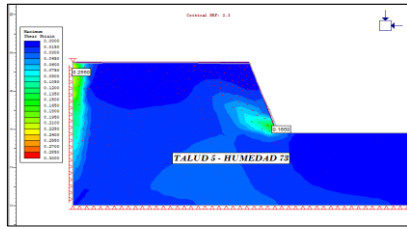


MODELACION TIPO 1

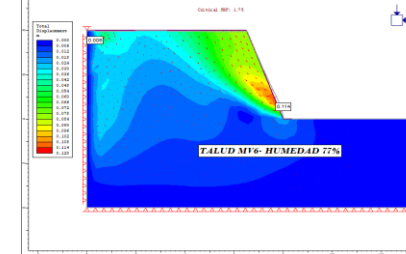
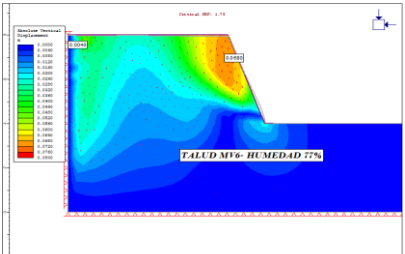
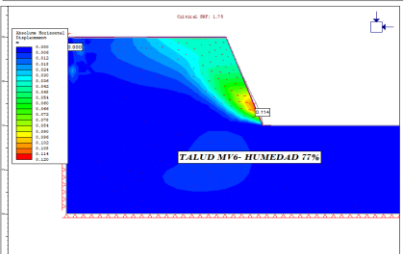
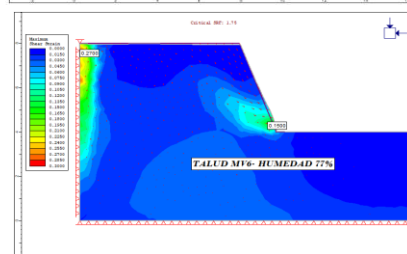
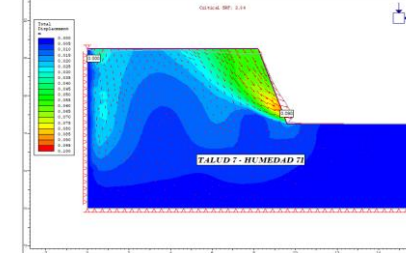
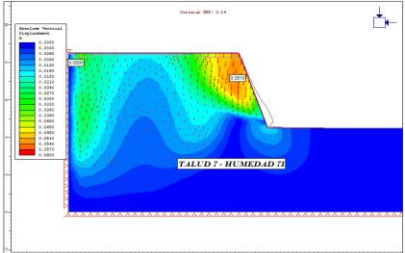
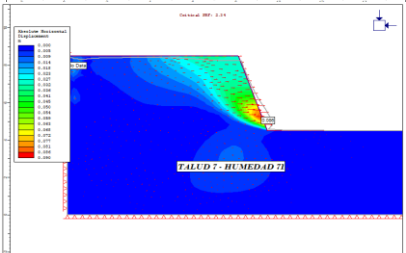
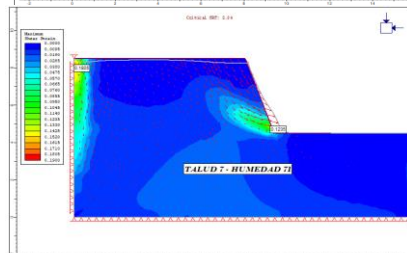
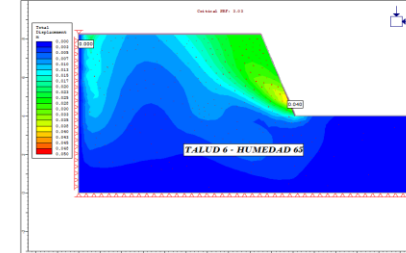
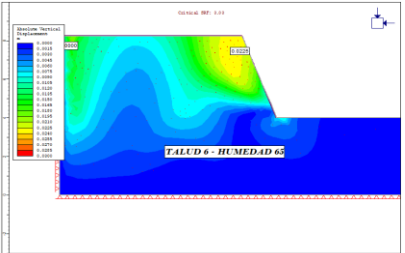
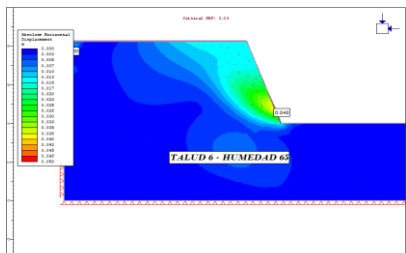
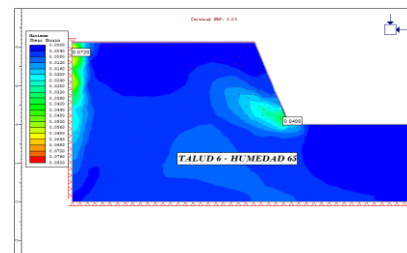


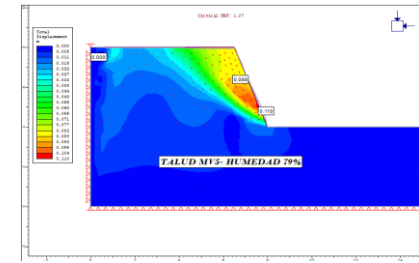
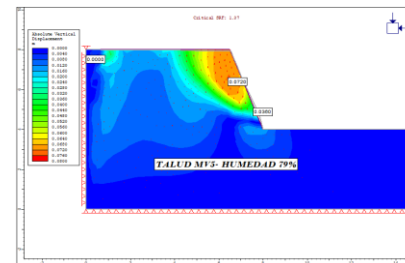
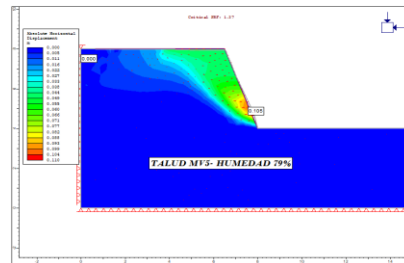
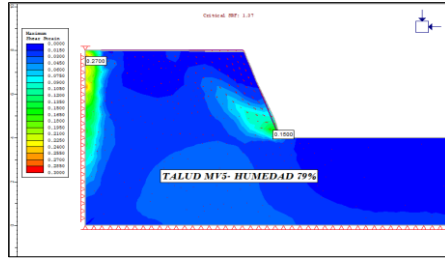
MODELACION TIPO 2



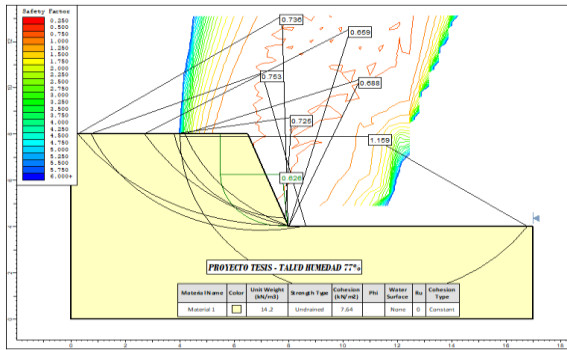
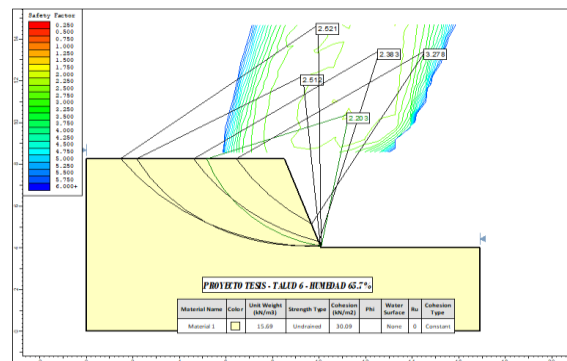
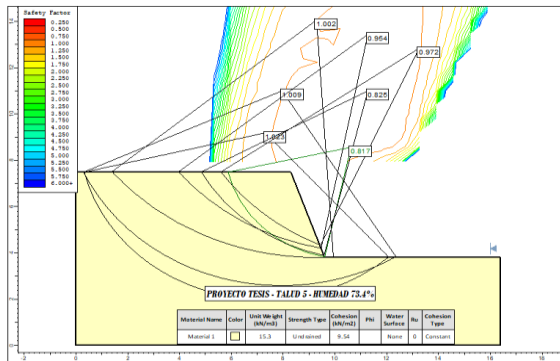
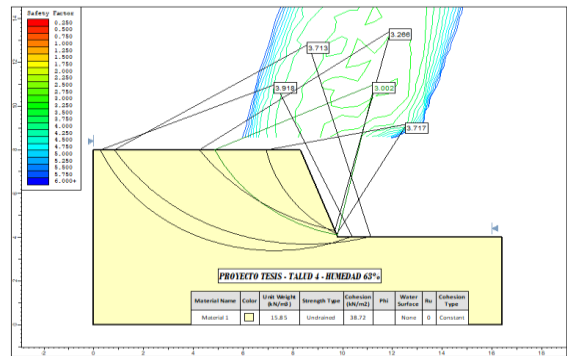
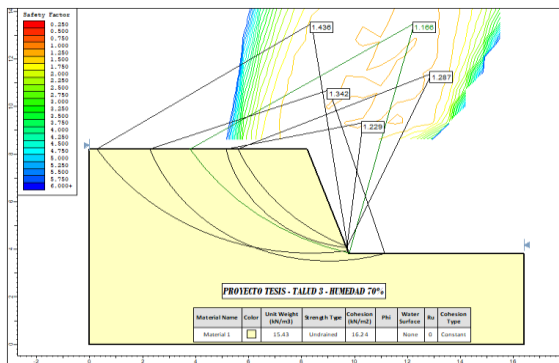
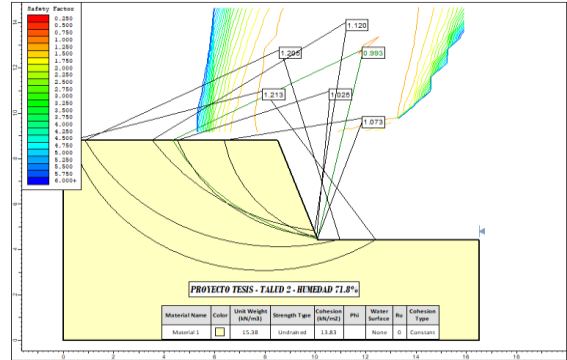
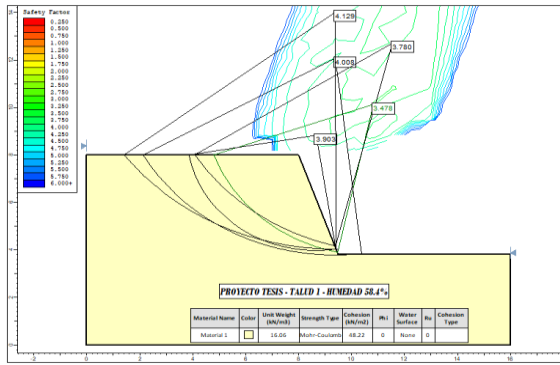


MODELACION TIPO 2





MODELACION TIPO 1



MODELACION TIPO 2

