

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE DRENES
HORIZONTALES Y CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD A PARTIR DEL
ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

MICHAEL STEPHEN MENA CUELLAR

CRISTIAN ORLANDO PULIDO REYES



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ, D.C.

2016

ABATIMIENTO DEL NIVEL FREÁTICO MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE DRENES
HORIZONTALES Y CALCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD A PARTIR DEL
ANÁLISIS DE ELEMENTOS

MICHAEL STEPHEN MENA CUELLAR

CRISTIAN ORLANDO PULIDO REYES

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por título de
ingeniero civil

Asesor Disciplinar:

Ic, Esp, Msc Edison Gárriz

Asesor Metodológico

Lic Roy Morales Pérez

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2016

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la inteligencia, paciencia y fortaleza para ejecutar en su totalidad el proyecto de grado.

A mis padres y hermanas, Eber Antonio Mena mi padre y Dora Cristina Cuellar mi madre por su apoyo durante el transcurso de mi carrera y la ejecución del proyecto de grado, por sus consejos en los momentos difíciles y retarme a ser mejor cada día.

Al ingeniero Edison Garzón, asesor del proyecto por depositar su confianza en nosotros, brindarnos el tiempo, su conocimiento y su apoyo constante para lograr el objetivo de este proyecto; al ingeniero Miguel Sarmiento por sus asesorías, conocimiento y voluntad cuando fue necesaria su ayuda.

A mis amigos Oscar Santana, Nandy Fonseca, Cristian Polanco, Angie Lozano, Catherin López, Angélica Castañeda, Omar Parra, Andrés Gutiérrez, Mabel Holguín y demás conocidos por sus palabras de apoyo.

A la familia pulido por su apoyo incondicional durante la ejecución del proyecto.

A mi compañero de tesis Cristian Orlando Pulido por su compromiso, sus conocimientos y su disposición para la ejecución del proyecto.

Para ellos son estos agradecimientos de tesis, pues es a ellos a quienes se las debo por su apoyo incondicional.

Michael Stephen Mena Cuellar

Agradecimientos

Primero que todo, agradecer a mis padres Uriel Pulido Pineda, Ana Gilma Reyes Parra, hermana Wendy Pulido y abuelito Adonái Pulido, por su apoyo y por aportar un grano de arena durante la formación profesional la cual fue vital para este proceso de aprendizaje que sin el apoyo de ellos no hubiese sido posible.

A mis docentes en general los cuales guiaron de manera correcta los conocimientos adquiridos durante este lindo proceso. Al Ingeniero Edison Garzón por su conocimiento y apoyo durante la ejecución de este proyecto de grado como asesor disciplinar, al ingeniero Andrés Rodríguez por sus aportes y direccionamiento de tesis, que fueron determinantes en los resultados obtenidos y al ingeniero Miguel por su disposición aportar conocimientos en el proceso de ejecución de la tesis.

Al profesor Roy Morales, por su correcto lineamiento el cual nos ayudó a enfocar lo metodológico de nuestro proyecto de grado.

Por ultimo a mi compañero de tesis Michael Mena por su disposición de trabajo y su tiempo el cual fue determinante en la culminación de este proceso.

A todos ellos doy mis infinitos agradecimientos por acompañarme en este proceso de formación.

Cristian Orlando Pulido Reyes

TABLA DE CONTENIDO

1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.	JUSTIFICACIÓN	19
3.	OBJETIVOS	20
3.1.	OBJETIVO GENERAL	20
3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4.	ANTECEDENTES	21
5.	MARCO REFERENCIAL.....	26
5.1.	MARCO CONCEPTUAL	26
5.1.1.	Taludes y laderas	26
5.1.1.1.	Partes de un talud.....	26
5.1.1.2.	Deslizamientos.....	27
5.1.2.	Análisis de estabilidad.....	28
5.1.2.1.	Elementos finitos.....	30
5.1.2.2.	Ventajas del método de elementos finitos.....	31
5.1.2.3.	Desventaja del método de elementos finitos.....	31
5.1.2.4.	Evaluación del factor de seguridad utilizando elementos finitos.	32
5.1.3.	Parámetros del suelo para el análisis.....	32
5.1.3.1.	Angulo de Fricción.	32
5.1.3.2.	Cohesión.....	32
5.1.4.	Métodos de manejo y estabilización.....	33

5.1.4.1.	Obras de drenaje y subdrenaje.....	34
5.1.4.2.	Drenes horizontales o de penetración.....	34
5.1.4.3.	Diseño de drenes de penetración.	34
5.1.5.	Herramienta para determinar el comportamiento de los drenes horizontales.....	35
5.2.	MARCO GEOGRÁFICO.....	39
5.3.	MARCO LEGAL	40
5.3.1.	Regulaciones incluidas en los códigos.....	41
5.3.2.	Efectividad de los códigos de laderas	41
5.3.3.	Escala de los códigos.....	41
5.3.4.	Objetivos de los códigos	41
5.3.5.	Aplicación del código y actividades que se regulan	42
5.3.6.	Estudios mínimos exigidos.....	42
6.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	43
6.1.	ENFOQUE METODOLÓGICO	43
6.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	43
6.3.	FASES DE LA INVESTIGACIÓN	43
6.3.1.	Fase I.	43
6.3.2.	Fase II.	43
6.3.3.	Fase III.	44
6.3.4.	Fase IV.....	44
6.4.	DESARROLLO METODOLÓGICO	45
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
7.1.	PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y PROPIEDADES GEOMÉTRICAS	46

7.2.	FACTOR DE SEGURIDAD POR ELEMENTOS FINITOS	47
7.2.1.	Análisis de las arcillas	47
7.2.1.1.	Análisis del flujo en las arcillas.....	47
7.2.1.2.	Arcillas estáticas	49
7.2.1.2.1.	Talud de 40° de inclinación.....	49
7.2.1.2.2.	Talud de 50° de inclinación.....	52
7.2.1.2.3.	Talud de 60° de inclinación.....	55
7.2.1.3.	Arcillas pseudo estática	59
7.2.1.3.1.	Talud de 40° de inclinación.....	59
7.2.1.3.2.	Talud de 50° de inclinación.....	63
7.2.1.3.3.	Talud de 60° de inclinación.....	66
7.2.2.	Análisis de los limos	69
7.2.2.1.	Análisis del flujo en los limos	69
7.2.2.2.	Limos estáticos	70
7.2.2.2.1.	Talud de 40° de inclinación.....	70
7.2.2.2.2.	Talud de 50° de inclinación.....	73
7.2.2.2.3.	Talud de 60° de inclinación.....	76
7.2.2.3.	Limos pseudo estáticos.....	78
7.2.2.2.1	Talud de 40° de inclinación análisis pseudo estático	79
7.2.2.3.1.	Talud de 50° de inclinación análisis pseudo estático.....	81
7.2.2.3.2.	Talud de 60° de inclinación análisis pseudo estático.....	83
7.2.2.4.	Arenas estáticas	86
7.2.2.4.1.	Taludes de 40° de inclinación.....	86

7.3. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR ELEMENTOS FINITOS VERSUS EQUILIBRIO LIMITE.	89
8. CONCLUSIONES	91
9. RECOMENDACIONES	93
9.1. RECOMENDACIONES RESPECTO A PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS TALUDES. 93	
9.2. RECOMENDACIONES RESPECTO A PARÁMETROS GEO MECÁNICOS UTILIZADOS	93
9.3. RECOMENDACIONES RESPECTO AL ANÁLISIS DEL FLUJO	93
10. BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Nomenclatura de las partes de un talud.....	27
Tabla 2 Nomenclatura partes de un deslizamiento	28
Tabla 3 Metodologías utilizadas en la modelación de taludes	29
Tabla 4 Secuencia de entrega de informes de estudios previos.....	42
Tabla 5 Fase uno del diseño metodológico	43
Tabla 6 Fase dos del diseño metodológico.....	43
Tabla 7 Fase tres del diseño metodológico	44
Tabla 8 Fase cuatro del diseño metodológico	44
Tabla 9 Parámetros geotécnicos de los materiales	46
Tabla 10 Parámetros geométricos de los taludes.....	46
Tabla 11 Propiedades geométricas de los drenes.....	47

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un talud.....	27
Ilustración 2 Circulo de Mohr Coulomb	33
Ilustración 3 Geometrías de los taludes con las diferentes inclinaciones	35
Ilustración 4 Geometría del talud y del dren horizontal en el software Phase 2D ..	36
Ilustración 5 Calculo de la presión de poros PLAXIS.....	36
Ilustración 6 Generar malla de elementos y poner las debidas restricciones	37
Ilustración 7 Sub programa de caculos PLAXIS	37
Ilustración 8 Programa análisis de elementos finitos en Phase 2D.....	38
Ilustración 9 Mapa ciudad de Santiago de Cali.	39
Ilustración 10 Mapa de los ríos del municipio de Cali.	40
Ilustración 11 Comportamiento del flujo talud de 40° sin drenes y con drenes	48
Ilustración 12 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 2°	50
Ilustración 13 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 10°	50
Ilustración 14 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 15°	51
Ilustración 15 Comportamiento de la falla del talud de 40° con la inclusión de los diferentes drenes	51
Ilustración 16 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático en un talud de 50°-Estático para los drenes de 10 y 20 metros de profundidad con una inclinación de 2°	53

Ilustración 17 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático para un talud de 50°-Estático, para los drenes de 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 10°.....	53
Ilustración 18 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático en un talud de 50°-Estático, para los drenes de 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 15°.....	54
Ilustración 19 Comportamiento de la falla del talud de 50°-Estático con la inclusión de los drenes	54
Ilustración 20 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 60°-Estático, para los drenes de 5 y 10 metros de profundidad con una inclinación de 2°	56
Ilustración 21 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estático, para los drenes de 5 10 y 20 metros de profundidad con una inclinación de 2°	56
Ilustración 22 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estático, para los drenes de 10, 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 10°	57
Ilustración 23 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estático, para los drenes de 5, 10, 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 15°	58
Ilustración 24 Comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla para un talud de 40°-Estático.....	59
Ilustración 25 Comportamiento del nivel freático en un talud de 40°-Seudo estático, en las posibles superficies de falla.....	60
Ilustración 26 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 40°-Seudo estático variando la profundidad del dren	61
Ilustración 27 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 40°-Seudo estático con drenes de 20 y 30 metros de profundidad	62
Ilustración 28 Posibles fallas en un talud de 40°- Seudo estático con drenes	62
Ilustración 29 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50°-Seudo estático, drenes de 20 metros y 30 metros	63

Ilustración 30 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50°-Seudo estático, drenes de 5 metros, 10 metros, 20 metros y 30 metros	64
Ilustración 31 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50°-Seudo estático, drenes de 5 metros, 10 metros, 20 metros y 30 metros	65
Ilustración 32 Posibles fallas en un talud de 50°- Seudo estático con drenes de 10 metros y 2° de inclinación	65
Ilustración 33 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 20 y 30 metros	66
Ilustración 34 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 10, 20 y 30 metros con una inclinación de 10°	67
Ilustración 35 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 5, 10, 20 y 30 metros con una inclinación de 15°	68
Ilustración 36 Comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla para un talud de 40°-Estatico	68
Ilustración 37 Comportamiento del flujo talud de 40°Estatico sin drenes y con drenes	69
Ilustración 38 Comportamiento de los esfuerzos totales para inclinaciones de 2°.	71
Ilustración 39 abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación	71
Ilustración 40 abatimiento del nivel freático para inclinación de dren de 15 ° y longitud de 30 m	72
Ilustración 41 comportamiento de la falla del talud de 40° con inclusión de los diferentes drenes	72
Ilustración 42 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 50°-Estatico para inclinaciones de 2°	74
Ilustración 43 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estatico para inclinaciones de 10°	74
Ilustración 44 Comportamiento del nivel freático en un talud de 40°-Estatico para inclinaciones de 2°	75

Ilustración 45 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 2° y diferentes profundidades.....	76
Ilustración 46 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 10° y diferentes profundidades.....	77
Ilustración 47 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 15° y diferentes profundidades.....	78
Ilustración 48 Abatimiento del nivel freático para drenes de 2° de inclinación en un talud de “Limo 40°-Seudo estático”	79
Ilustración 49 Abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación en un talud de “Limo 40°-Seudo estático”	80
Ilustración 50 Superficie de falla para un talud de “Limo 40°-Seudo estático”	81
Ilustración 51 Abatimiento del nivel freático en taludes de 50°-seudo estático drenes de inclinación de 2°	82
Ilustración 52 Abatimiento del nivel freático en taludes de 50°-seudo estático drenes de inclinación de 10°	82
Ilustración 53 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° seudo estático de 2° de inclinación.....	84
Ilustración 54 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° seudo estático de 10° de inclinación.....	85
Ilustración 55 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° seudo estático de 15° de inclinación.....	85
Ilustración 56 Abatimiento del nivel freático para drenes de 2° de inclinación en un talud de “Arena 40°-estático”	87
Ilustración 57 Abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación en un talud de “Arena 40°-Seudo estático”	87
Ilustración 58 Superficie de falla para un talud de “Arena 40°- estática”	88

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 40°-Arcilla-Estática”	49
Gráfica 2 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Estatica”	52
Gráfica 3 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 60-Arcilla-Estatica”	55
Gráfica 4 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 40-Arcilla-Seudo estática”	59
Gráfica 5 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Seudo estática”	63
Gráfica 6 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Seudo estática”	66
Gráfica 7 Factor de seguridad vs longitud del dren “talud de 40°-limo -Estática” ..	70
Gráfica 8 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 50°-Limo-Estático ..	73
Gráfica 9 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 60°-Arcilla-Estática”	76
Gráfica 10 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 50°-Limo- seudo Estática	81
Gráfica 11 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 60°-Limo- seudo ..	83
Gráfica 12 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 40°-Arena-Estática”	86

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Resultados de las arcillas

Anexo 2 – Resultado de los limos

Anexo 3 – Resultado de las arenas

Anexo 4 – Planos de los diferentes taludes

Anexo 5 – CD con todas las modelaciones

INTRODUCCIÓN

Una de las problemáticas que se genera en el campo de la ingeniería civil, específicamente en la rama de la geotecnia es la inestabilidad de los taludes, en Colombia debido a su geografía tan variada se encuentra con mucha frecuencia problemas de inestabilidad de taludes que afectan los diferentes proyectos de la infraestructura, generando deslizamientos de tierra que afectan de manera directa el aspecto social y económico

Por este motivo en el presente proyecto se hace un planteamiento del problema abordado desde las condiciones geográficas y climáticas, que afectan de manera directa el manejo de las aguas subterráneas, que finalmente termina siendo uno de los principales factores detonantes de los procesos de inestabilidad, esto se genera debido a que el aumento de la presión de poros genera una disminución a la resistencia al corte de los suelos que componen los taludes, lo que se ve reflejado en la disminución de los factores de seguridad cuando se realiza el análisis de estabilidad, generando que se activen los procesos de remoción de masa.

Partiendo de esta problemática se propone determinar cómo varía el comportamiento del factor de seguridad mediante la inclusión de drenes horizontales modelado por un programa de análisis de elementos finitos, (Phase 2d), donde se varía la geometría y las propiedades geotécnicas de suelo que compone el talud y la geometría de los drenes como es profundidad de inclusión e inclinación.

Por ultimo como finalidad del presente proyecto de grado, se pretende comparar los resultados obtenidos con investigaciones anteriores donde se empleó el método de equilibrio limite, con los realizados por elementos finitos, esto se logra mediante la generación de unas gráficas que permiten determinar el comportamiento del factor de seguridad cuando se varía la longitud de inclusión del dren.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país que se encuentra ubicado en una zona geográfica donde el factor climático es bastante variable, hay épocas de lluvia y épocas de sol con periodos extensos, los cuales generan daños y deterioro en las obras de ingeniería civil que se realizan en todo el país, principalmente las obras de infraestructura vial son las que se ven afectadas por este tipo de cambios en el clima. Una de las partes que conforma una vía es el talud, la ladera y/o terraplén, en la ingeniería es de principal importancia realizar los respectivos análisis con el fin de determinar cómo sería el comportamiento de una estructura de estas.

Como se mencionó anteriormente una de las partes más importantes, son los taludes algunos de origen natural y otros de origen artificial, es de gran importancia conocer cómo se van a comportar cuando están expuesto a los diferentes factores detonantes de inestabilidad de taludes como los sismos y el agua, siendo este último uno de los factores que más afecta la estabilidad en los taludes debido a que en las épocas de invierno el nivel freático tiende a aumentar generando una disminución de los esfuerzos totales, incremento en la presión de poros y una disminución del factor de seguridad, al ser mayor la fuerza actuante que la fuerza resistente.

Una de las maneras de controlar o disminuir el nivel freático es mediante el uso de drenes horizontales que se encargan de disminuirlo hasta un punto determinado con el fin de mejorar los estados de esfuerzos del tramo drenado.

Para determinar la viabilidad de los drenes horizontales se utiliza un software de análisis geotécnico especializado en determinar los factores de seguridad de un talud o una ladera, en el mercado se encuentran softwares que trabajan por diferentes métodos, entre los principales métodos que se utilizan están, equilibrio limite y análisis mediante elementos finitos.

Los drenes horizontales se han modelado en diferentes trabajos de grado, uno de ellos es “influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes” realizado en Colombia donde las modelaciones se hicieron con el software Slide de la casa rockscience que trabaja mediante equilibrio limite una de las limitantes del programa es que no permite ingresar los drenes horizontales como tal si no que se ingresan como un material drenado, en ese trabajo se realizaron modelos variando los ángulos de inclinación del talud, inclinación y longitud de los drenes buscando como variaba el factor de seguridad.

El análisis de elementos finitos permite determinar de una manera más exacta como es el comportamiento de una solución ingenieril, para el caso de estudio sería la ingeniería geotécnica en situ. Como tal las investigaciones respecto a cómo es el comportamiento de los drenes horizontales para abatir el nivel freático en un talud es muy mínima por lo que la pregunta que se genera para este proyecto de grado es la siguiente:

¿Cómo varia el factor de seguridad con la inclusión de drenes horizontales a partir de la modelación de elementos finitos con un programa especializado en análisis geotécnico?

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia los deslizamientos son asociados a distintas causas, de las cuales, y para efectos del presente trabajo se van a tener en cuenta, los deslizamientos provocados por efectos de aumento en la presión de poros por aguas sub superficiales. Este tipo de fallas son asociadas principalmente a la disminución del factor de seguridad por falta de obras que permitan manejar adecuadamente el flujo subterráneo, una de los métodos para controlar el nivel freático es mediante el uso de drenes horizontales encargados de disminuir el nivel freático y por consiguiente aumentando el factor de seguridad al disminuir la presión de poros.

Dado que en la mayoría de los casos el diseño de drenes horizontales se realiza mediante drenes prescriptivos de acuerdo al Manual de drenaje para carreteras del instituto nacional de vías¹, y aunque en la geotecnia o mecánica de suelos se sabe que el abatir o controlar el nivel freático mejora las condiciones de resistencia al corte, con el trabajo de investigación planteado se quiere llegar a obtener una serie de ábacos que permitan reconocer cual sería la mejor alternativa según el tipo de suelo y la inclinación del talud. Logrando un avance en las investigaciones realizadas sobre el tema de modelación y comportamiento de los drenes horizontales.

¹ MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de drenaje para carreteras, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009, p 5-12.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la variación del factor de seguridad mediante la inclusión de drenes horizontales modelado por un programa de análisis de elementos finitos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 3.2.1 Definir los parámetros geotécnicos y geométricos que se van a utilizar en las modelaciones.
- 3.2.2 Calcular el factor de seguridad de los diferentes taludes con la implementación y sin la implementación de los drenes horizontales usando el método de elementos finitos.
- 3.2.3 Comparar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos en investigaciones anteriores.
- 3.2.4 Generar unos ábacos que permitan reconocer el comportamiento de los drenes.

4. ANTECEDENTES

El trabajo realizado por Alejandra Carolina Alfaro Alarcón², tiene como objetivo principal “Elaborar una herramienta que permita comparar el efecto de distintas configuraciones espaciales de los drenes sub horizontales, en la estabilidad de un talud representativo en el sur de Chile”. La recolección de datos para los diferentes modelos se realiza mediante una investigación de conceptos asociados a la mecánica de suelos y al flujo de agua en medios porosos, variación de presión de poros en profundidad debido a infiltraciones, estudio de drenes en laboratorio y análisis numérico, y efectividad del método de estabilización.

Los taludes se modelaron según su material y su geometría con un programa que trabaja mediante elementos finitos primero teniendo en cuenta el nivel freático, pero sin la inclusión de drenes y luego con el nivel freático e inclusión de drenes, se determina cómo influye el espaciamiento entre drenes, la longitud y el diámetro del dren en el factor de seguridad; finalmente se confeccionara un cuadro donde se relacionan los parámetros geométricos de diseño de los drenes con el factor de seguridad.

En la investigación se concluyó que realizar el análisis de estabilidad de talud en tres dimensiones y no en dos es fundamental debido a que el talud falla en tres dimensiones y no en una franja limitada, es fundamental realizar el diseño del dren para que trabaje según el largo y espaciamiento dispuesto y que utilizar drenes horizontales es una medida alternativa para estabilizar un talud. Cuanto aumenta su estabilidad estará principalmente sujeta a sus parámetros de resistencia al corte. Algunas de las recomendaciones que realiza la autora son monitorear las presiones de poros en taludes con drenes horizontales y mediciones de caudal y reiterar análisis con distintos parámetros de resistencia al corte.

Del anterior trabajo se toma la idea de realizar un análisis de estabilidad de taludes con un software que realice su análisis por elementos finitos, variar los suelos y determinar el comportamiento de este.

Además en Diciembre de 2.005, el INGEOMINAS³ (Instituto Colombiano de Geología y Minería) en compañía del DAGMA (Departamento Administrativo de

² ALFARO, Alejandra.Tesis, MODELACIÓN NUMÉRICA 3D PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES UTILIZANDO DRENES SUBHORIZONTALES.En: Santiago de Chile,2013.

³ INGEOMINAS. INFORME 4, INVESTIGACIONES Y ZONIFICACIONES GEOTECNICAS DE LA CIUDAD DE SANTIAGO DE CALI.En: Cali colombia,2005

Gestión del Medio Ambiente), presentaron el “Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali”, en el cual se encuentran los estudios de suelos que se realizaron a lo largo de la ciudad de Santiago de Cali, con el fin de conocer el perfil del subsuelo, el comportamiento mecánico de los materiales (suelo, roca, materiales artificiales) y la aplicación de la mecánica de suelos y rocas, lo cual es denominada por Burland (1987) como el triángulo de la mecánica de suelos. En este estudio se lograron agrupar los suelos con base a las exploraciones realizadas, en cuanto a los comportamientos geo-mecánicos similares según sus propiedades índice, de compresibilidad y resistencia, en seis clases de arcillas, cinco tipos de limos, cuatro clases de arenas, cuatro clases de gravas y dos tipos de materia orgánica. De esta manera se plantearon nueve secciones geotécnicas en el sentido de la deposición de los materiales provenientes de las cuencas de la cordillera, con lo que se logró visualizar las siguientes zonas: el piedemonte, el ápice, la parte media y distal de los abanicos, hasta llegar a la llanura de inundación del río Cauca y el sector de Interconexión entre los abanicos y la llanura aluvial.

De la anterior investigación se toman los estudios realizados en las diferentes zonas de la ciudad de Santiago de Cali con el fin de determinar los parámetros geotécnicos de los materiales a utilizar en el presente trabajo de grado.

También se aporta el proyecto realizado por Carlos Javier Gonzáles Vergara y Edgar Iván Dussan Buitrago⁴ tiene como objetivo general “Proponer un criterio de diseño de obras de drenaje (drenes horizontales) en estabilidad de taludes”

Para cumplir con el objetivo es necesario escoger una herramienta que solucione la estabilidad del talud y el flujo con la inclusión de drenes se escoge el programa de Slide de la casa Rockscience que trabaja el análisis de estabilidad de talud mediante los métodos de equilibrio limite y el flujo por elementos finitos. Se definen unos parámetros geotécnicos y otros geométricos con el fin de realizar un análisis de sensibilidad del factor de seguridad con la inclusión de drenes horizontales, generando unos ábacos de factor de seguridad vs talud.

Encontrando las siguientes conclusiones, los drenes generan un aumento en el factor de seguridad, los drenes horizontales generan mejores resultados cuando se ubican en la parte inferior del talud, para futuros trabajos se recomienda que se

⁴ Gonzales, Javier. Tesis, MODELACIÓN DEL FLUJO EN TALUDES PARA DRENES HORIZONTALES. En: Universidad Javeriana sede Bogota, Julio del 2011

realice el análisis del comportamiento de los drenes horizontales en un software que trabaje en 3D y determinar cómo es el comportamiento del abatimiento del nivel freático mediante drenes horizontales cuando se tiene en cuenta la permeabilidad del suelo.

La ubicación del dren se puede realizar en cualquier parte del talud, del anterior trabajo se define que la ubicación óptima del dren es en la parte inferior del talud, ya que en esta posición se generan los factores de seguridad más altos.

Julián Andrés Pulecio Díaz⁵ presento un trabajo que tiene como objetivo general “determinación de los parámetros de resistencia al corte en un talud de terraplén, mediante el modelador computacional Plaxis”, determinar los parámetros geotécnicos y geométricos se realiza mediante la recolección de datos de una situación real, para realizar el análisis se plantean dos situaciones una estática y otra pseudoestática modelada mediante el software Plaxis, a cada una se le genera una solución con el fin de aumentar la estabilidad del talud más precisamente el factor de seguridad.

Llegando a las siguientes conclusiones, el método de Bishop tiene dificultad para determinar la posible falla de corte a presentarse, el método de análisis de elementos finitos presenta menor dificultad por ser un método numérico que aproxima la solución de un problema, y el incluir drenes permite lograr factores de seguridad más altos, superficies de falla de menor afectación y por lo tanto disminución de la presión de poros.

Aportan Andrés Mateo Olguín y Andrés Leonardo Leudo⁶ un trabajo cuyo objetivo general es “evaluar el efecto del abatimiento del nivel freático mediante la inclusión de drenes sub-horizontales en el cálculo del factor de seguridad en la estabilidad de taludes” para cumplir con el objetivo se definieron una serie de parámetros geotécnicos y geométricos de los diferentes taludes, teniendo esas propiedades se realizan los diferentes modelos utilizando una herramienta para el cálculo del factor de seguridad seleccionando el software Slide de la casa Rockscience para solucionar los modelos y los flujos, determinando de esta manera un factor de seguridad, por cada talud se realiza una gráfica donde se compara la inclinación de los drenes por cada longitud instalada y otra grafica donde se comparan las

⁵ PULECIO,Andres. Determinación de los parámetros de resistencia al corte en un talud de terraplén, mediante el modelador computacional “Plaxis”.En: Universidad Santo tomas, Bogotá Colombia,

⁶ OLGUIN,Andres.LEUDO,Leonardo.TESIS, influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes.En:Universidad la Gran Colombia, Bogota Colombia,2015.

longitudes instaladas por cada inclinación obteniendo las siguientes conclusiones en el trabajo.

“Se definieron los parámetros geo-mecánicos de los materiales a utilizar en las modelaciones (arcillas, limos y arenas), a partir de la información recopilada en la primera fase del presente trabajo de grado, gracias al estudio de microzonificación sísmica realizada en la ciudad de Santiago de Cali, por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), en compañía del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).”⁷

“Se analizaron los resultados producto de las modelaciones realizadas de lo cual se concluyó que, en cuanto al abatimiento del nivel freático, a mayor longitud de dren el abatimiento es mayor, obteniendo valores dependiendo del lugar de medición, mayores a los 10 metros medidos desde la posición inicial (sin drenes) del nivel freático.”⁸

“Para la mayoría de los taludes modelados en cualquier de los tres (3) materiales utilizados, el factor de seguridad presenta un aumento con relación al factor de seguridad inicial, es decir el obtenido en las modelaciones sin drenes, de valores cercanos al 50% en los aumentos máximos, aunque también se debe aclarar que en algunos casos el dren genero un efecto contrario al esperado ya que el nivel freático supero el nivel inicial en cerca de 1 metro.”⁹

“Se generaron una serie de ábacos con base en las modelaciones realizadas, de las cuales se concluyó que los primeros ábacos los cuales fueron realizados en cuanto a la longitud del dren comparado con el factor de seguridad, el comportamiento del factor de seguridad es directamente proporcional al aumento de la longitud del dren y a partir de esta comparación se pueden establecer longitudes efectivas de uso de dren para la estabilización de un talud. Para los segundos ábacos realizados, se comparó la inclinación del dren con el factor de seguridad, donde el comportamiento del factor de seguridad es inversamente proporcional a la inclinación del dren, y con base en este comportamiento se pudieron establecer inclinaciones efectivas de dren. Las longitudes e inclinaciones

⁷ Ibíd., p 81

⁸ Ibíd., p 81

⁹ Ibíd., p 81

de dren se pueden observar en el análisis de resultado del presente trabajo de grado.”¹⁰

Entre las recomendaciones generadas se encuentra realizar el análisis de estabilidad de taludes mediante una metodología diferente a Bishop o Jambu.

El anterior trabajo sirve como referencia para comparar los resultados obtenidos de los modelos con diferente tipo de suelo, el comportamiento que se genera en los drenes cuando se varia la inclinación y la longitud de inclusión, analizado cuando no se tiene sismo o una condición estática y cuando se tiene sismo condición pseudoestática.

¹⁰ *Ibíd.*, p 81

5. MARCO REFERENCIAL

En el presente marco referencial se exponen todos los conceptos necesarios para la completa comprensión del trabajo de grado que fue desarrollado y cuyos resultados se plasmaron en el presente documento, conceptos como la ubicación geográfica donde se tomaron los datos para las modelaciones realizadas, los conceptos legales que se deben tener en cuenta para la estabilidad de taludes y de igual manera se representan los conceptos teóricos que explican el manejo del software que se utilizó.

5.1. MARCO CONCEPTUAL

El enfoque teórico empleado para el desarrollo del presente proyecto de grado, está dirigido al tratamiento que se sigue en procesos de estabilización de taludes artificiales donde el principal factor a tener en cuenta es la presión de poros generada por la presencia de agua, también conocido como nivel freático.

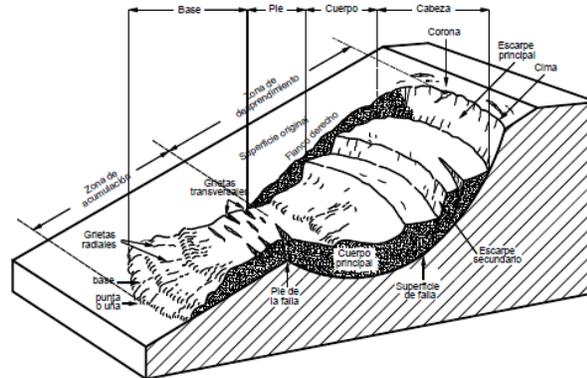
5.1.1. Taludes y laderas

Es necesario establecer una nomenclatura básica para tratar el tema, se recomienda la clasificación propuesta por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978) este último fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247", es el sistema de nomenclatura y clasificación más utilizado en el mundo. Talud o ladera es considerada como una masa de tierra que posee una pendiente o un cambio significativo de altura, en la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación es de origen natural y talud cuando su conformación es artificial.

5.1.1.1. Partes de un talud

El talud comprende tres partes principales una parte alta convexa con una cabeza, cima, cresta o escarpe en la que se presentan procesos de denudación o erosión, una parte intermedia semirrecta y una parte baja cóncava también llamada pie pata o base en la que ocurren principalmente procesos de deposición, en la ilustración 3 se muestran las partes de un talud.

Ilustración 1 Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un talud



Fuente: SUÁREZ DÍAZ, Jaime, Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.4

El autor Jaime Suarez en el libro deslizamientos análisis geotécnico capítulo 1 trata el significado de las diferentes partes que conforman una ladera y un talud a continuación se realiza una descripción de estas.

Tabla 1 Nomenclatura de las partes de un talud

Pie pata o base	El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera.
Cabeza, cresta, cima o escarpe	Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera.
Altura	Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en los taludes artificiales.
Altura de nivel freático	Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua
Pendiente	Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera

Fuente: Tomado y adaptado de SUAREZ DIAZ, Jaime, Análisis geotécnico, Bucaramanga, Colombia, Capítulo 1, p.4

5.1.1.2. Deslizamientos

Los deslizamientos consisten en movimientos de masas de rocas, residuos o tierra hacia la parte baja de un talud. En el término deslizamiento están incluidos los procesos de denudación y de erosión. Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de la superficie de falla, por caída libre, movimientos en masa, erosión o flujos,

los fenómenos de inestabilidad incluyen generalmente una combinación de procesos por erosión y denudación.

En la *Ilustración 1* se muestran cuáles son las partes principales que se generan en un deslizamiento y en la *Tabla 1* se encuentra el significado de cada parte del talud, según la investigación realizada por el Ing. Jaime Suarez.

Tabla 2 Nomenclatura partes de un deslizamiento

Cabeza	Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud arriba de la cabeza esta la corona.
Cima	El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
Corona	El material que se encuentra en el sitio (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.
Escarpe principal	Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento causada por el desplazamiento del material.
Escarpe secundario	Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve
Superficie de falla	Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado.
Pie de la superficie de falla	La línea de interceptación entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
Base	El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
Punta o uña	El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
Cuerpo principal del deslizamiento	El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla
Superficie original del terreno	La superficie que existía antes de generarse el movimiento.
Costado o flanco	Un lado del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho del izquierdo.

Fuente: Tomado y adaptado de SUAREZ DIAZ, Jaime, *Análisis geotécnico, Bucaramanga, Colombia, Capítulo 1, p.4-6*

5.1.2. Análisis de estabilidad

Las modelaciones matemáticas principalmente se realizan para determinar la estabilidad de un talud, para ello existen diferentes métodos que varían según el objetivo de análisis el ingeniero Jaime Suarez en su libro análisis geotécnico describe las características de los diferentes métodos en la Tabla 3

Tabla 3 Metodologías utilizadas en la modelación de taludes

Método	Parámetros utilizados	Ventajas	Limitaciones
Límite de Equilibrio	Topografía del talud, estratigrafía, ángulo de fricción, cohesión, peso unitario, niveles freáticos y cargas externas	Existe una gran cantidad de paquetes de software. Se obtiene un número de factor de seguridad. Analiza superficies curvas, rectas, cuñas, inclinaciones, etc. Análisis en dos y tres dimensiones con muchos materiales, refuerzos y condiciones de nivel de agua.	Genera un número único de factor de seguridad sin tener en cuenta el mecanismo de inestabilidad. El resultado difiere de acuerdo con el método que se utilice. No incluye análisis de las deformaciones.
Esfuerzo-deformación continua	Geometría del talud propiedad de los materiales, propiedades elásticas, elastoplásticas y de "creep". Niveles freáticos, resistencia	Permite simular procesos de deformación. Permite determinar la deformación del talud y el proceso de falla. Existen programas para trabajar en dos y tres dimensiones. Se puede incluir, análisis dinámico y análisis de "creep"	Es complejo y no lineal. Comúnmente no se tiene conocimiento de los valores reales a utilizar en la modelación. Se presentan varios grados de libertad. No permite modelar roca muy fracturada
Discontinuos Esfuerzo-deformación elementos discretos	Geometría del talud Propiedades del material, rigidez discontinuidades resistencia y niveles freáticos	Permite analizar la deformación y el movimiento relativo de bloques.	Existe poca información disponible sobre las propiedades de las juntas. Se presentan problemas de escala, especialmente en los taludes de roca.
Cinemáticos estereográficas para taludes en roca	Geometría y caracterización de las discontinuidades. Resistencia a las discontinuidades.	Es relativamente fácil de utilizar. Permite identificación y análisis de bloques críticos. Pueden combinarse con técnicas estadísticas	Útiles para el diseño preliminar. Se requiere criterio de ingeniería para determinar cuáles son las discontinuidades críticas. Evalúan las juntas

Tabla 3 Metodologías utilizadas en la modelación de taludes

Dinámica de caídos de roca	Geometría del talud tamaño y forma de los bloques y coeficiente de restricción	Permite analizar la dinámica de los bloques y existen programas en dos y tres dimensiones	Existe muy poca experiencia de su uso en los países tropicales
Dinámica de flujos	Relieve del terreno concentración de sedimentos viscosidad y propiedades de la mezcla suelo-agua	Se puede predecir el comportamiento velocidades distancia de recorrido y sedimentación de los flujos	Se requiere calibrar los modelos para los materiales de cada región. Los resultados varían de acuerdo con el modelo utilizado

Fuente: SUAREZ DIAZ, Jaime, Análisis geotécnico, Bucaramanga, Colombia, Capítulo 4, p.129

Los métodos de cálculo se dividen en dos primordialmente métodos de equilibrio límite y métodos numéricos, los métodos de equilibrio límite contienen otros métodos en los que no se va a profundizar debido a que el presente trabajo de grado se realiza bajo el método de elementos finitos contenido en los métodos numéricos.

5.1.2.1. Elementos finitos

El método de elementos finitos fue introducido por Clough y Woodward (1967). El método esencialmente, divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. En el método divide esencialmente, la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. En el método UDEC, el talud se divide en bloques de acuerdo al sistema de juntas o grietas, los cuales pueden ser rígidos o deformables¹¹

Estos elementos se interconectan en los nodos y los bordes predefinidos, el método se basa en la formulación de desplazamientos que presenta su resultado en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales, la condición de falla obtenido es la de un fenómeno progresivo en donde todos los nodos fallan simultáneamente, una de las principales dificultades es obtener un factor de seguridad de la falla.

El análisis de elementos finitos debe satisfacer lo siguiente.

¹¹ SUARES, Jaime. Deslizamiento: técnicas de remediación tomo 1. Bucaramanga, Colombia. Capítulo 4, p 162

Debe mantener el equilibrio de esfuerzos en cada punto, el cual es realizado empleando la teoría elástica para describir los esfuerzos y deformaciones. Para producir el nivel de esfuerzos es necesario conocer la relación esfuerzo-deformación¹².

Las condiciones de esfuerzos de frontera se deben satisfacer¹³.

Los elementos finitos se emplean para estudiar las diversas posibilidades de falla o para encontrar los efectos generados por un sistema de estabilización, en casos generales donde las propiedades del suelo y las condiciones de frontera se pueden suponer.

5.1.2.2. Ventajas del método de elementos finitos

El método de elementos finitos presenta una serie de ventajas sobre los demás métodos, a continuación, se relacionan las más importantes.

Se considera el comportamiento no lineal de los materiales en la totalidad del dominio.

La falla es progresiva.

Los detalles estructurales de juntas o fisuras cercanas pueden modelarse.

Se puede introducir un comportamiento de los materiales con base en el tiempo.

Se puede emplear una formulación convencional de deformaciones para la mayoría de posibilidades de carga.

Se han desarrollado formulaciones especiales para incluir el análisis del agua subterránea.

5.1.2.3. Desventaja del método de elementos finitos

Las desventajas que se nombran a continuación son más pronunciadas en el análisis 3D para el análisis 2D son menos fuertes.

Debido a que el sistema de ecuaciones es muy grande son necesarios tiempos prolongados y capacidades altas de memoria.

La totalidad de volumen del dominio tiene que discretizarse.

Algunos modelos requieren logaritmos sofisticados de acuerdo al tipo de material.

El método no es apropiado para rocas muy fracturadas o suelos altamente fisurados.

¹² Ibid, p 161

¹³ Ibid, p 161

5.1.2.4. Evaluación del factor de seguridad utilizando elementos finitos.

Ugai (1989) desarrollo un método que permite calcular el factor de seguridad utilizando el criterio de falla de Mohr Coulomb por medio de los elementos finitos que consiste el realizar una disminución gradual de los parámetros c' y ϕ' del suelo induciendo a una falla del análisis¹⁴.

A este método se le conoce como modelo de elementos finitos de reducción de resistencia al cortante (SSRFEM)¹⁵

5.1.3. Parámetros del suelo para el análisis

Para realizar el análisis de estabilidad de taludes es necesario tener ciertos parámetros del suelo como son el Angulo de fricción, la cohesión, presión de poros y pesos unitarios totales.

5.1.3.1. Angulo de Fricción.

El Angulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física¹⁶.

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan \phi$$

Ecuación 1

El ángulo de fricción determina si un suelo es cohesivo o no cohesivo según el círculo de Mohr que define que cuando un suelo es netamente cohesivo no posee ángulo de fricción interna y cuando un suelo no tiene cohesión tiene ángulo de fricción.

5.1.3.2. Cohesión

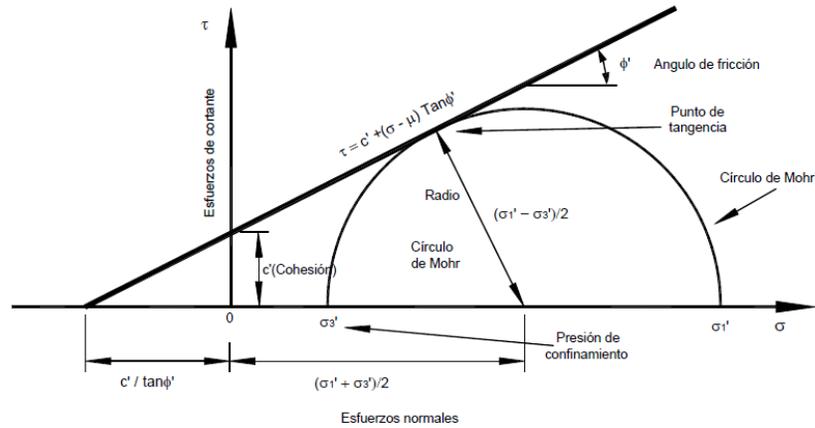
La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos se usa para representar la resistencia al cortante producidas por la cementación entre las partículas.

¹⁴ Ibid, p 164

¹⁵ Ibid, p 164

¹⁶ SUAREZ DÍAZ, Jaime, Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga, Colombia, 1998, p.56.

Ilustración 2 Circulo de Mohr Coulomb



Fuente: Propia

La cohesión se encuentra mediante el análisis del círculo de Mohr en la Presión de Poros.

La presión de poros consiste en la presión ejercida por el agua dentro de los poros del suelo y en la literatura es identificada con la letra “ μ ”. La presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre las partículas debido a que las separa y de esta manera disminuye la resistencia a la fricción.

La presión de poros se halla mediante la siguiente ecuación.

$$\mu = \gamma_w * Z_w \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

γ_w =Peso unitario del agua

Z_w =Profundidad vertical del punto por debajo del nivel de agua freática

5.1.4. Métodos de manejo y estabilización

El objetivo principal de realizar un análisis de estabilidad de taludes, es diseñar medidas de prevención que permitan una remediación o estabilización para disminuir el riesgo y la amenaza. Se han desarrollado gran cantidad de métodos como son: método de control de aguas superficiales y subterráneas, sistemas de estructuras de contención de tierras, conformación y diseños de taludes y tecnologías de vegetación y bioingeniería.

5.1.4.1. Obras de drenaje y subdrenaje

El drenaje y subdrenaje son metodologías de remediación o prevención de deslizamientos muy eficientes, su uso es muy común y existen varias metodologías para su diseño, el drenaje de aguas superficiales y subterráneas consisten en disminuir la presión de poros y de esa forma aumentar la resistencia al corte, eliminar las fuerzas hidrostáticas desestabilizantes y de esta manera aumentar el factor de seguridad de las superficies de falla por debajo del nivel de agua, los sistemas más comunes para el manejo de las aguas son los siguientes.

Zanjas de coronación o canales colectores drenaje superficial.

Subdrenes de zanja o subdrenes interceptores.

Subdrenes horizontales o de penetración.

Puesto que el trabajo trata del comportamiento de los drenes horizontales solo se va a profundizar en este tema.

5.1.4.2. Drenes horizontales o de penetración.

Un dren horizontal o subdren de penetración consiste en una tubería perforada colocada a través de una masa de suelo mediante una perforación profunda subhorizontal o ligeramente inclinada con la cual se busca abatir el nivel freático hasta donde se incremente la estabilidad del talud¹⁷

El diámetro de las perforaciones es aproximadamente de 3 a 4 pulgadas dentro de las cuales se colocan tuberías perforadas, generalmente la tubería utilizada es metálica, polietileno o PVC, las tuberías se pueden perforar con agujeros o hacerles ranuras en sentido transversal, los agujeros se recomiendan que sean de 5 a 1.5 milímetros con una densidad de 15 a 30 agujeros por metro, en el caso de las ranuras deben tener un ancho de 0.02 pulgadas en la totalidad de tubería a instalar con excepción del 1.5 a 5.0 metros más cercanos a la superficie del talud esto con el fin de que las raíces de los árboles no invadan el interior de la tubería.

5.1.4.3. Diseño de drenes de penetración.

Para el diseño de los drenes se recomienda hacer previamente un estudio geotécnico para determinar las características y el régimen del agua subterránea, es necesario tener ciertos parámetros en cuenta.

El dren se ubica en una cota de forma que la cabeza de agua sea suficiente, preferiblemente que se encuentre por debajo de la zona fallada y se verifique este dentro del acuífero.

¹⁷ DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. International Thomson editores S.A. 2001. P. 59

La longitud de los drenes depende de las necesidades de drenaje. Comúnmente sus longitudes varían de 10 a 40 metros pero se conocen drenes instalados hasta de 120 metros.

La pendiente debe ser tal, que al profundizar el dren no suba a cotas por encima de la línea del nivel de agua. Las perforaciones se realizan con inclinaciones del 5% al 20%.

El alineamiento puede ser paralelo entre el grupo de drenes de penetración o en forma de abanico con un punto común de salida.

El espaciamiento entre drenes depende de la permeabilidad de los materiales del suelo del talud. Los espaciamientos típicos son de 1 a 5 metros.

En la literatura se encuentran dos tipos de diseño, drenes diseñados con los cuales se espera que mejoren el factor de seguridad por si solos, y los drenes prescriptivos que se combinan con otros métodos de estabilización para aumentar el factor de seguridad.

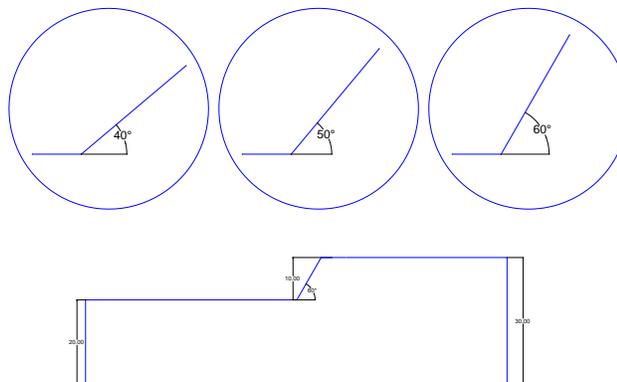
5.1.5. Herramienta para determinar el comportamiento de los drenes horizontales

Para lograr el objetivo del presente trabajo es necesario utilizar varias herramienta de trabajo como lo es AutoCAD, Phase 2D y Excel, Phase 2D es un software especializado en análisis geotécnicos que realiza sus análisis mediante los elementos finitos y permite determinar un factor de seguridad mediante la teoría reducción de Φ y de c.

El software soluciona el flujo por elementos finitos y determina el factor de seguridad por el mismo método garantizando de esta manera que su trabajo es conjunto, a continuación, se muestra como se realizan las modelaciones.

Lo primero es realizar los dibujos en AutoCAD de los diferentes taludes cuando se varia la inclinación del talud y los diferentes parámetros geotécnicos de los drenes horizontales.

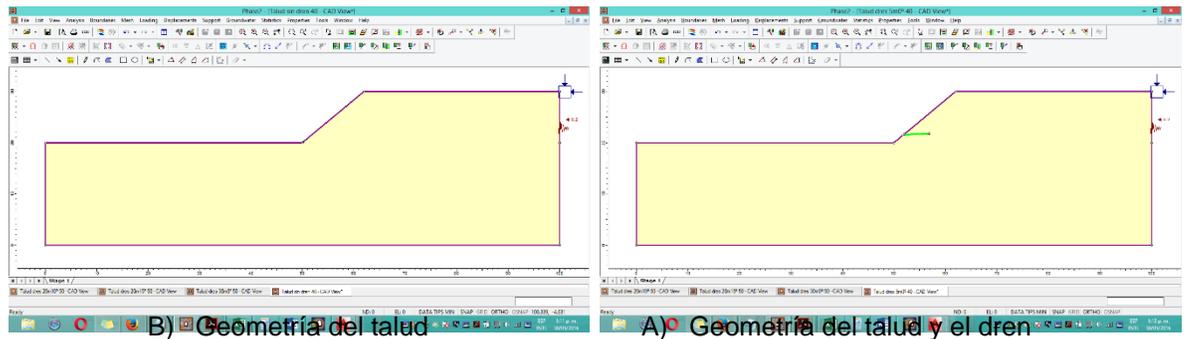
Ilustración 3 Geometrías de los taludes con las diferentes inclinaciones



Fuente: Propia

Teniendo las geometrías de los taludes se procede a importar como archivo .dxf al software de Phase 2D y agregar las propiedades geotécnicas a los materiales y a los drenes horizontales, y agregar las propiedades para poder solucionar el comportamiento del flujo en el material.

Ilustración 4 Geometría del talud y del dren horizontal en el software Phase 2D



Fuente: Propia

Teniendo la geometría del talud y del dren horizontal se agregan las propiedades geotécnicas del material que se está usando y la permeabilidad equivalente para el material que conforma el dren horizontal encontrada con ayuda de la tabla en Excel suministrada por el ingeniero Diego Olaya en la ilustración 5 se observa la metodología.

Ilustración 5 Calculo de la presión de poros PLAXIS

Ingresar materiales

Ingresar permeabilidades

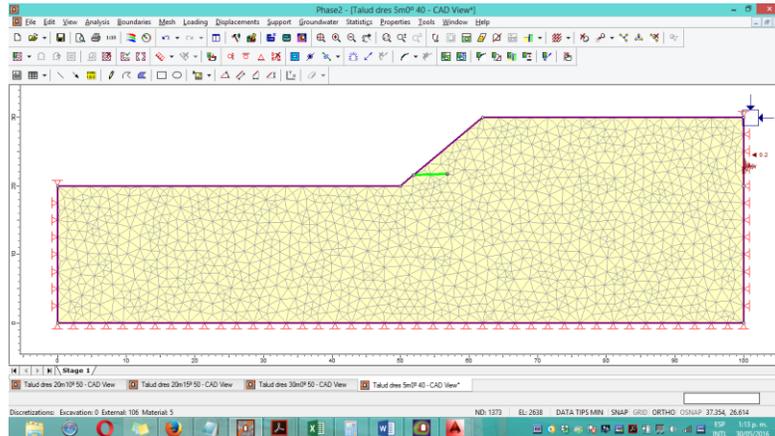
PERMEABILIDADES EQUIVALENTES		
PARAMETRO	UNID	
K (Permeabilidad Suelo)		3.13E-07
D (Diámetro)	m	0.0762
n (Manning)		0.0100
S (Pendiente)	m/m	0.0524
Rh (Radio Hidráulico)	m	0.0191
V (Velocidad)	m/s	1.6328
k (Permeabilidad Tubería)	m/s	0.3116
A (Área Tubería)	m ²	0.0046
ESPAC (m)	3	0.224039633 6.216E-03

Permeabilidad equivalente

Fuente: Propia

Teniendo los parámetros anteriormente nombrados se procede a definir la malla para poder realizar el análisis de elementos finitos dándole los siguientes parámetros 1500 número de elementos y luego poner las respectivas restricciones (xy)

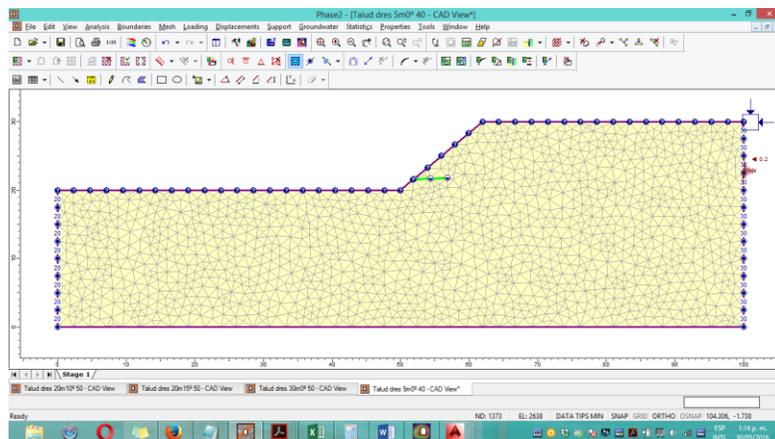
Ilustración 6 Generar malla de elementos y poner las debidas restricciones



Fuente: Propia

La solución del flujo se realiza mediante cabezas de presiones totales en los costados derecho e izquierdo del talud la parte superior del talud se le solicita al software que lo solucione. Para generar que el agua ingrese al dren se pone presión 0 debido a la presión atmosférica.

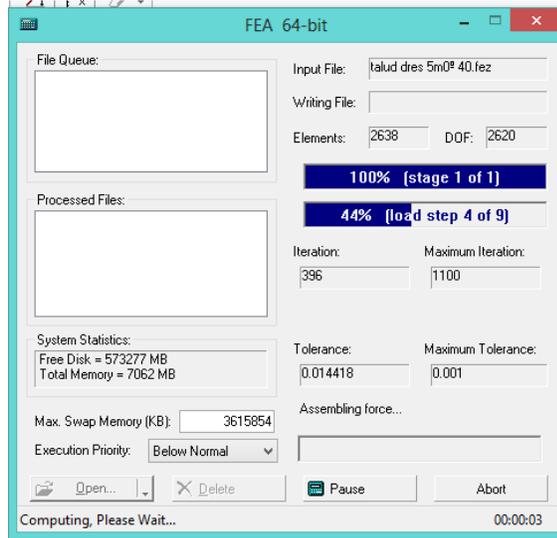
Ilustración 7 Sub programa de caculos PLAXIS



Fuente: Propia

Teniendo definido todos los parámetros se procede a realizar el análisis por elementos finitos y de esta manera poder determinar cómo es el comportamiento del flujo, el factor de seguridad más crítico y la superficie de falla.

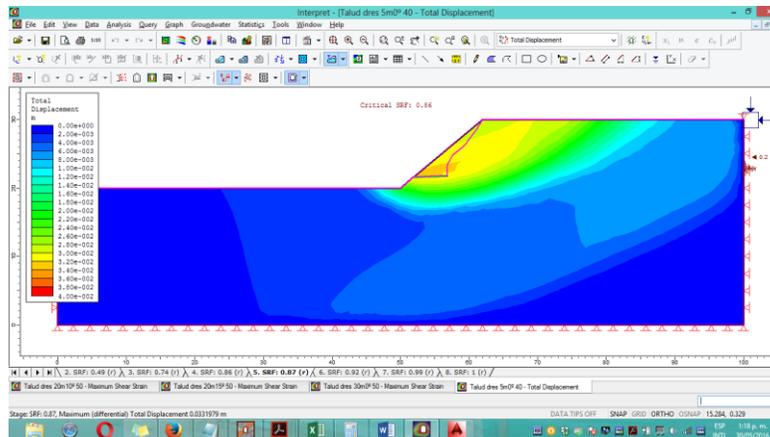
Ilustración 8 Programa análisis de elementos finitos en Phase 2D



Fuente: Propia

En la plataforma de resultados de Phase 2D se pueden obtener todo tipos de resultados los que más interesan para el desarrollo de este proyecto. Los desplazamientos totales nos permiten determinar la superficie de falla y si el dren si se encuentra trabajando en esta zona y presión de poros para realizar el análisis de cómo se abatió el nivel freático con la inclusión de los diferentes drenes a comparación del nivel freático inicial.

Ilustración 9 Plataforma de análisis software Phase 2D



Fuente: Propia

5.2. MARCO GEOGRÁFICO

En el presente marco geográfico se presenta la zona donde se realizaron los estudios geotécnicos necesarios para la obtención de los parámetros geo mecánicos que se utilizaron en la realización de las modelaciones correspondientes al presente trabajo de grado.

Los estudios realizados para la obtención de los parámetros geo mecánicos utilizados en el presente trabajo de grado, hicieron parte del estudio del Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali () realizado por el Instituto Colombiano De Geología y Minería INGEOMINAS en colaboración con el Departamento Administrativo de Gestión Del Medio Ambiente DAGMA, presentado en el mes de diciembre del año 2.005.

Santiago de Cali es la capital del departamento del Valle del Cauca, igualmente es la tercera ciudad más poblada de Colombia, tiene un área aproximada de 564 kilómetros cuadrados y hace parte del área metropolitana de Santiago de Cali.

Geográficamente Cali está ubicado en el valle del rio Cauca el cual es el segundo en importancia del país, la zona urbana de Cali se encuentra al costado occidental del rio y a la parte occidental la ciudad se encuentra rodeada por los Farallones de Cali, los cuales se encuentran incluidos en la cordillera occidental delos andes colombianos.

Ilustración 9 Mapa ciudad de Santiago de Cali.



Fuente: Alcaldía Santiago de Cali [Citado 22, abril, 2015]. Disponible en www.cali.gov.co/.

En cuanto a la hidrografía el municipio de Cali tiene como rio principal el rio cauca, el cual en cuanto a la parte correspondiente al municipio inicia desde la

En Colombia se puede observar el caso de Bucaramanga donde el código de laderas es manejado por las autoridades ambientales, caso tal de la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, aunque se debe aclarar que en otros departamentos o municipios estos códigos son manejados por los departamentos de planeación directamente

5.3.1. Regulaciones incluidas en los códigos

Dentro de estos códigos se establecen normas para cubrir los siguientes aspectos importantes:

Requisitos para la presentación de proyectos que evalúan modificación del terreno.

Parámetros mínimos para la elaboración de estudios geotécnicos y de estabilidad.

Aislamientos mínimos de pie y corona de taludes, cauces de quebradas, colectores de alcantarillado, etc.

Procedimiento para el manejo y estabilización de taludes, tales como muros de contención, control de aguas superficiales y subterráneas.

Normas para el control de las corrientes de agua.

Requisitos para la construcción de vías en áreas susceptibles, rellenos en tierra y disposición de escombros.

5.3.2. Efectividad de los códigos de laderas

Se puede evidenciar que la efectividad de los códigos de ladera en cuanto a la prevención de deslizamientos de tierras, es muy alta ya que estos códigos tienen a sobre diseñar las estructuras con el fin de conseguir factores de seguridad lo más considerables posibles.

5.3.3. Escala de los códigos

La escala de estos códigos se mide según su población y su extensión geográfica dividiéndose de la siguiente manera: Nacionales, estatales, ciudades o municipios, dependiendo de su escala los objetivos de estos códigos pueden variar al igual que su alcance.

5.3.4. Objetivos de los códigos

Los objetivos de los códigos de laderas pueden variar según la escala sobre la que esté realizando el estudio, ya que cada nación, ciudad o municipio, tiene geologías, condiciones climáticas diferentes por lo cual el código de ladera de una ciudad no puede aplicarse a otra ciudad. Es por esta razón que antes de elaborar cualquier

código se debe tener en cuenta que este debe cubrir un marco legal de prevención de deslizamientos con base a la zona donde se esté trabajando.

5.3.5. Aplicación del código y actividades que se regulan

En cuanto a las áreas de aplicación el código de ladera que se utilizó debe tener claramente identificadas las zonas de aplicación o si por el contrario la aplicación es para cualquier proyecto que se encuentra dentro de la escala de estudio sin importar su ubicación. Al igual que las áreas de aplicación el código se debe tener claridad sobre las actividades que regulan identificado claramente sobre cuales se puede trabajar.

5.3.6. Estudios mínimos exigidos

En varias ocasiones los códigos de laderas especifican que tipo de estudios técnicos son requeridos al igual que las características propias. Estos códigos exigen detalles de las investigaciones tales como el número y profundidad de sondeos, así como los ensayos geotécnicos realizados.

En la Tabla 4, se muestra una secuencia de entrega de los informes de geología realizadas en la ciudad de San Mateo, California, Estados Unidos.

Tabla 4 Secuencia de entrega de informes de estudios previos

PASO	TITULO DEL INFORME	PROPÓSITO	EXTENSIÓN
1	Informe geológico y de suelos	Información geológica y geotécnica requerida	Mapas, caracterización geológica y geotécnica, sondeos y ensayos.
2	Análisis geotécnico y plan de manejo de los taludes.	Análisis geotécnico y diseño de obras de manejo y estabilización de los taludes.	Informa detallado de análisis y diseño para revisión y aprobación por parte de la autoridad competente.
3	Informe "as-built" de las obras de manejo de los taludes	Informe final basado en la inspección de las obras construidas.	Levantamiento topográfico de las obras terminadas, ensayos de inspección, resultados de instrumentación

Fuente: Propia

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

Cuantitativo: A partir de datos geo-mecánicos obtenidos por medio de estudios geotécnicos referenciados en los antecedentes del presente trabajo de grado, se realizó un análisis numérico de la influencia de la aplicación de drenes horizontales en el abatimiento del nivel freático y el cálculo del factor de seguridad de un talud.

6.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Experimental: Con base en una serie de modelaciones, con datos y propiedades específicas, se obtuvo una serie de ábacos para el diseño e implementación de drenes horizontales en la estabilidad de taludes.

6.3. FASES DE LA INVESTIGACIÓN

6.3.1. Fase I.

Tabla 5 Fase uno del diseño metodológico

Definir los parámetros geotécnicos y geométricos que se van a utilizar en las modelaciones.	
ACTIVIDAD 1	Definir los parámetros geo mecánicos de los materiales
ACTIVIDAD 2	Definir las geometrías e inclinaciones de los taludes
ACTIVIDAD 3	Definir las inclinaciones longitudes de incrustación de los drenes

Fuente: Propia

6.3.2. Fase II.

Tabla 6 Fase dos del diseño metodológico

Calcular el factor de seguridad de los diferentes taludes con la implementación y sin la implementación de los drenes horizontales usando el método de elementos finitos.	
ACTIVIDAD 1	Solucionar el flujo para los diferentes taludes
ACTIVIDAD 2	Realizar los modelos con el material de arcilla con inclusión y sin inclusión de los drenes horizontales y determinar un factor de seguridad para el caso estático y pseudoestática
ACTIVIDAD 3	Realizar los modelos con el material de limo con inclusión y sin inclusión de los drenes horizontales y determinar un factor de seguridad para el caso estático y pseudoestática
ACTIVIDAD 4	Realizar los modelos con el material de arena con inclusión y sin inclusión de los drenes horizontales y determinar un factor de seguridad para el caso estático y pseudoestática

Fuente: Propia

6.3.3. Fase III.

Tabla 7 Fase tres del diseño metodológico

Comparar los resultados obtenidos con los resultados obtenidos en investigaciones anteriores.	
ACTIVIDAD 1	Recolectar datos de los análisis realizados por el método de equilibrio limite.
ACTIVIDAD 2	Recolectar datos de los análisis realizados por elementos finitos.
ACTIVIDAD 3	Comparar los valores óptimos obtenidos para los ábacos realizando una gráfica de columnas

Fuente: Propia

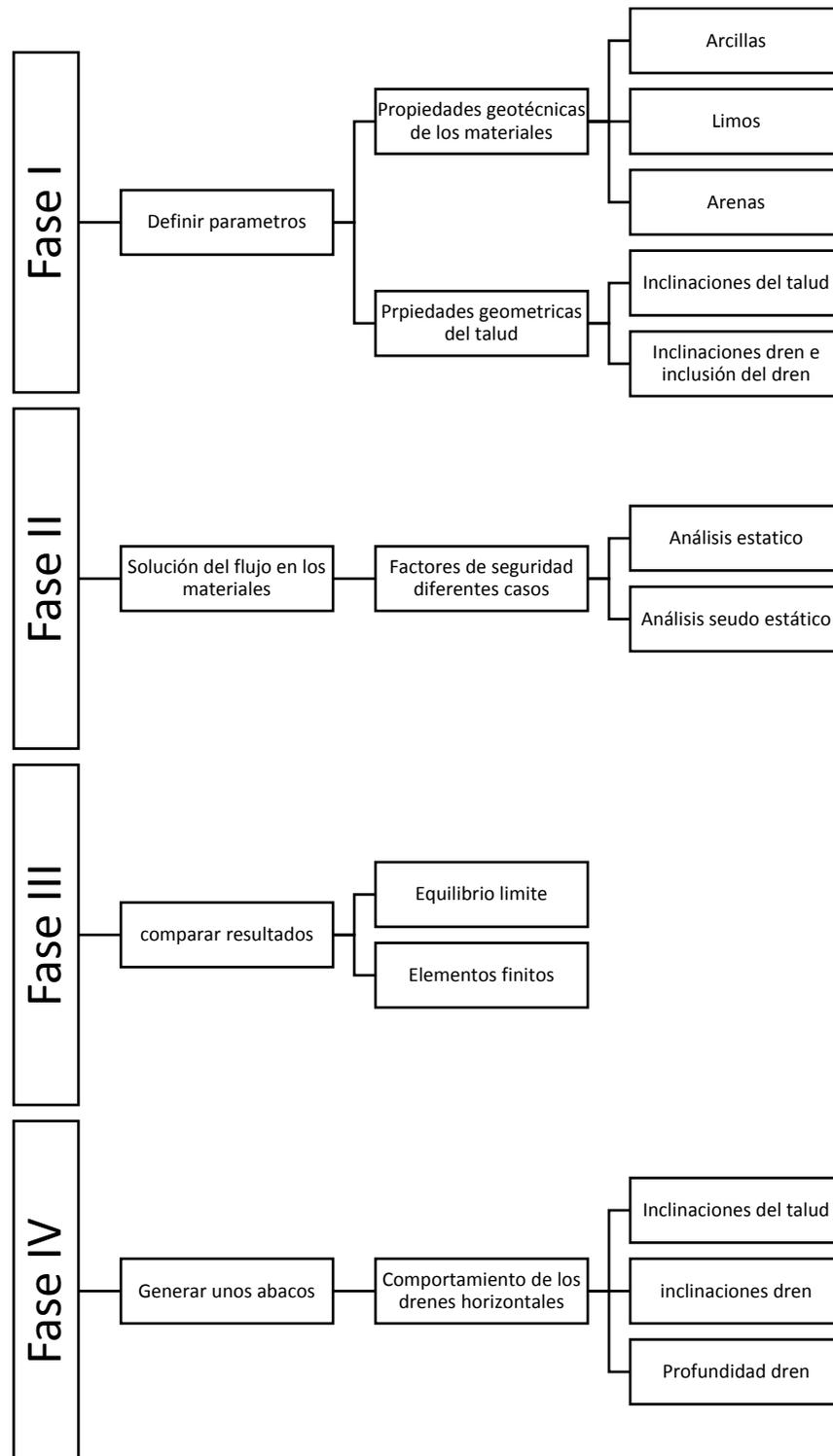
6.3.4. Fase IV.

Tabla 8 Fase cuatro del diseño metodológico

Generar unos ábacos que permitan reconocer el comportamiento de los drenes	
ACTIVIDAD 1	Generar un ábaco por cada material donde se enfrenten factor de seguridad versus inclinación de los taludes, dejando como constante a inclinación y profundidad de inclusión del dren

Fuente: Propia

6.4. DESARROLLO METODOLÓGICO



7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente numeral se presentan los resultados obtenidos para cada fase del trabajo.

7.1. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS Y PROPIEDADES GEOMÉTRICAS

Los parámetros geotécnicos se definen con el estudio de investigación realizado por el INGEOMINAS y el DAGMA, determinando mediante los laboratorios realizados las propiedades geotécnicas de estos, en la Tabla 9 se relacionan las propiedades encontradas.

Tabla 9 Parámetros geotécnicos de los materiales

Material	Unidades	Arcilla	Limo	Arena
Nombre		CH	MH	SM
Peso unitario	kn/m ³	18	17	17.2
Módulo de young	kpa	5.00E+05	4.31E+05	5.55E+05
Relación de poisson		0.33	0.35	0.33
Criterio de falla	Mohr Coulomb			
Esfuerzo de tension	kpa	0	0	
Angulo fricción	deg	23	25	35
Cohesión pico	kpa	30	56	8
Angulo fricción residual	deg	19	21	31
Cohesión residual	kpa	20	40	4
Permeabilidad	m/s	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-05
Permeabilidad equivalente	m/s	6.21E-03	6.21E-03	6.22E-03

Fuente: Propia

Las propiedades geométricas del talud son obtenida de la investigación “influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes” las propiedades geométricas de los drenes horizontales se toman según indicaciones constructivas es necesario tener en cuenta que los drenes horizontales se instalan a partir de 1.50 m de la pata del talud, en la Tabla 10 se muestran las inclinaciones trabajadas.

Tabla 10 Parámetros geométricos de los taludes

Altura de los taludes (m)	Inclinación de los taludes (°)
10 m	40°
	50°
	60°

Fuente: Propia

Para los drenes horizontales se toma la decisión de variar la longitud del dren, la inclinación del dren según investigaciones previas y pendiente de los drenes. La única inclinación que no se toma de investigaciones previas es la de 0° grados ya que con esta no se logra abatir el nivel freático, la norma indica que la pendiente mínima de instalación es del 3% que en grados es 2°. En la tabla 11 se muestran las propiedades con que se trabajaron los modelos

Tabla 11 Propiedades geométricas de los drenes

Longitud del dren (m)	Inclinación del dren (°)
5	2, 10 y 15
10	2, 10 y 15
20	2, 10 y 15
30	2, 10 y 15

Fuente: Propia

7.2. FACTOR DE SEGURIDAD POR ELEMENTOS FINITOS

7.2.1. Análisis de las arcillas

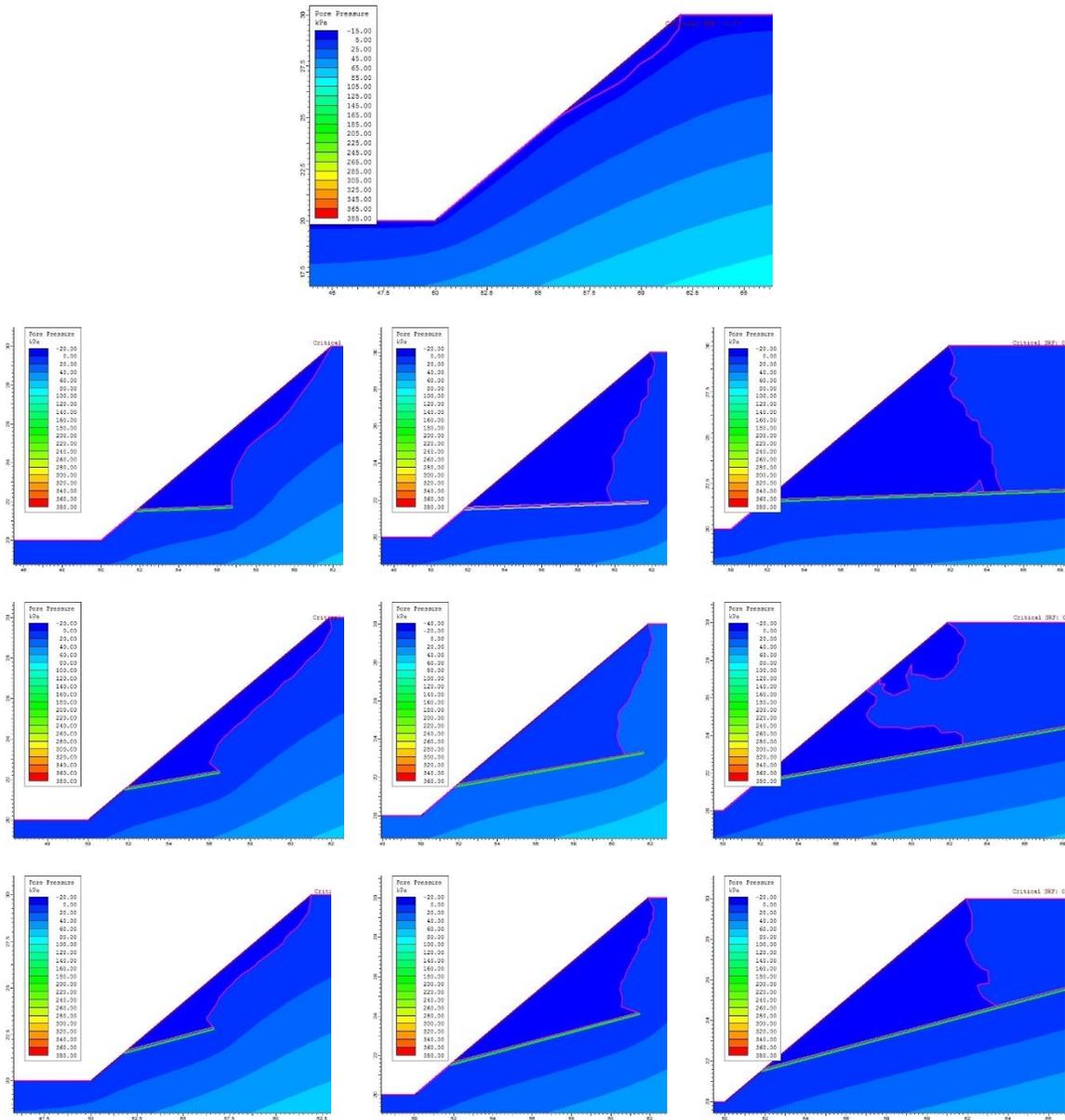
7.2.1.1. Análisis del flujo en las arcillas

Para realizar un análisis estático es necesario tener un comportamiento del flujo, debido a que en los estudios previos no se tiene información acerca del nivel freático se hace necesario determinar un comportamiento cuando no se tienen drenes horizontales y cuando se tienen drenes horizontales con sus diferentes inclinaciones y profundidades.

Se hicieron las modelaciones variando las inclinaciones en 40°, 50° y 60° en la geometría del talud y para los drenes horizontales se varió la profundidad en 5 m, 10 m, 20 m y 30 m, para la inclinación del dren se tomaron valores de 2°, 10° y 15°.

En la ilustración 12 se observa como fue el comportamiento de los drenes horizontales frente al nivel freático inicial.

Ilustración 11 Comportamiento del flujo talud de 40° sin drenes y con drenes



Fuente: propia

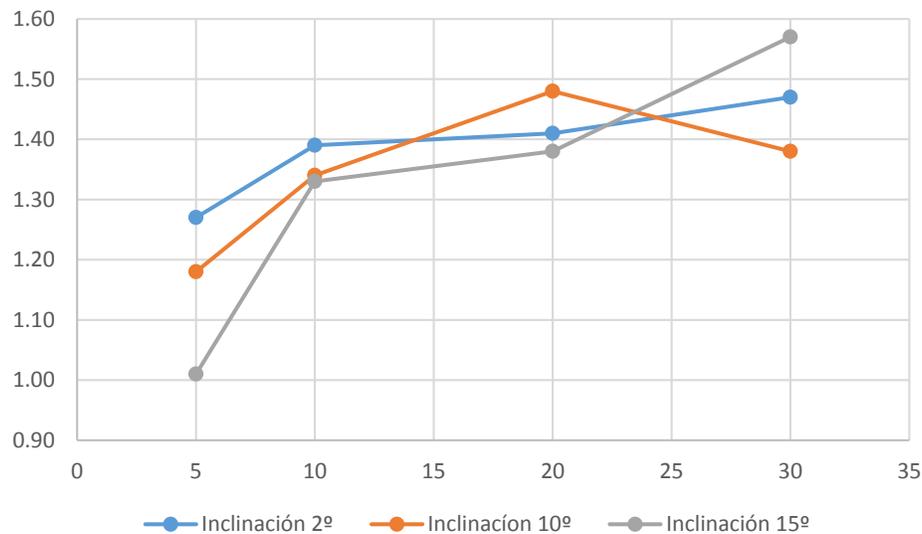
En la ilustración 12 se muestra como es el comportamiento del flujo cuando se varia la inclinación del dren encontrando que a partir de los 20 metros el abatimiento de nivel freático es muy similar al de 10 metros, mostrándonos que una inclusión superior a los 20 metros es innecesaria. Sin embargo, es necesario resaltar que en los análisis se hicieron hasta los 30 metros.

7.2.1.2. Arcillas estáticas

Para determinar el comportamiento de las arcillas se realizaron un total de 13 modelos por inclinación de talud teniendo un total de 39 modelos, para facilitar el análisis de los datos se plantea realizar una gráficas, factor de seguridad vs longitud del dren que permite determinar cómo es el comportamiento a medida que se aumenta la inclusión del dren y factor de seguridad versus inclinación del dren para determinar cómo afecta la variación de la inclinación del dren el factor de seguridad.

7.2.1.2.1. Talud de 40° de inclinación

Gráfica 1 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 40°-Arcilla-Estática”

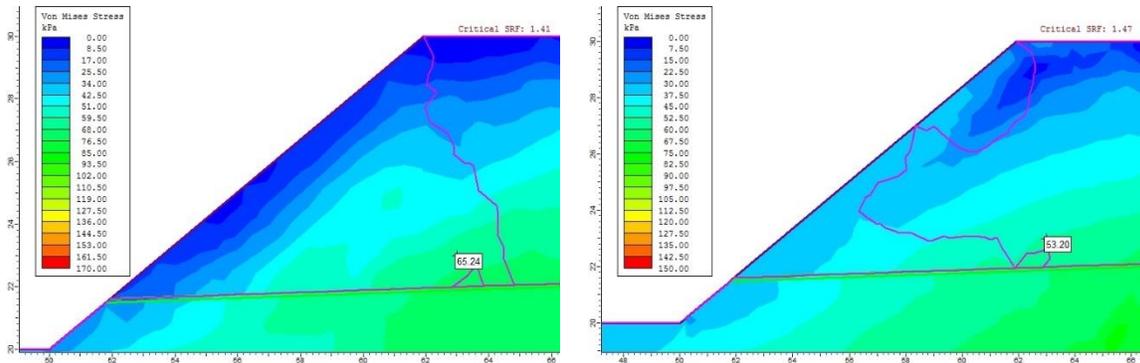


Fuente: Propia

En la Grafica 1 se muestra como es el comportamiento del factor de seguridad a medida que se aumenta la inclusión del dren, este análisis se realiza por cada inclinación del dren horizontal.

Para una inclinación de 2° o una pendiente del 3% se encuentra que hasta los 20 metros el factor de seguridad tiene un aumento contante, pero a los 30 metros el factor de seguridad sufre un aumento, revisando los esfuerzos totales se encuentra que para 20 metros el esfuerzo total es de 65.24 kpa mientras que para los 30 metros el esfuerzo total es de 53.20 kpa, esto nos indica lo que nos indica que la presión de poros para el dren de 20 metros es mayor que la de 30 en el punto analizado. En la ilustración 12 se muestra el comportamiento del nivel freático sobre el dren.

Ilustración 12 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 2°



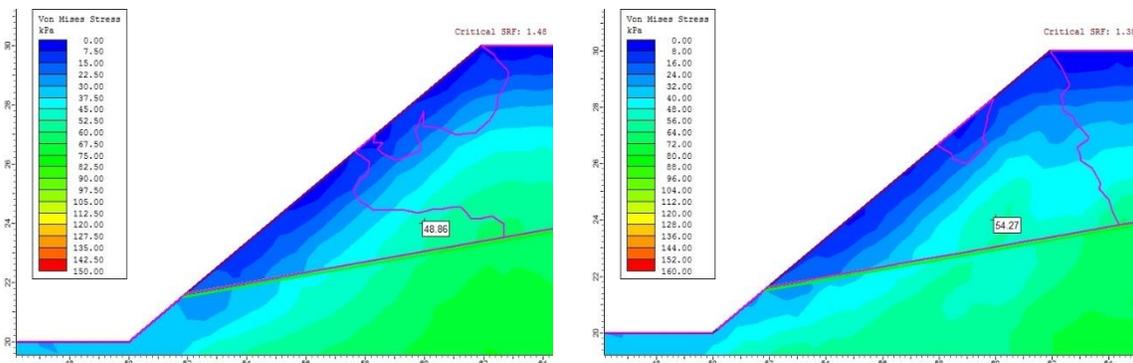
a) Esfuerzos totales drenes de 20 metros de profundidad

b) Esfuerzos totales drenes de 30 metros de profundidad

Fuente: Propia

Para una inclinación de 10° o una pendiente del 18% se encuentra que el factor de seguridad de los 5 metros a los 20 metros aumenta constantemente, de los 20 a los 30 metros el factor de seguridad disminuye debido a que el aumento de la profundidad de instalación del dren genera que el nivel freático valla a lugares donde no se encontraba. Esto se puede demostrar analizando como es el comportamiento de los esfuerzos totales en un mismo punto. En la ilustración 13 se muestra como es el comportamiento de los esfuerzos totales.

Ilustración 13 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 10°



a) Esfuerzos totales drenes de 20 metros de profundidad

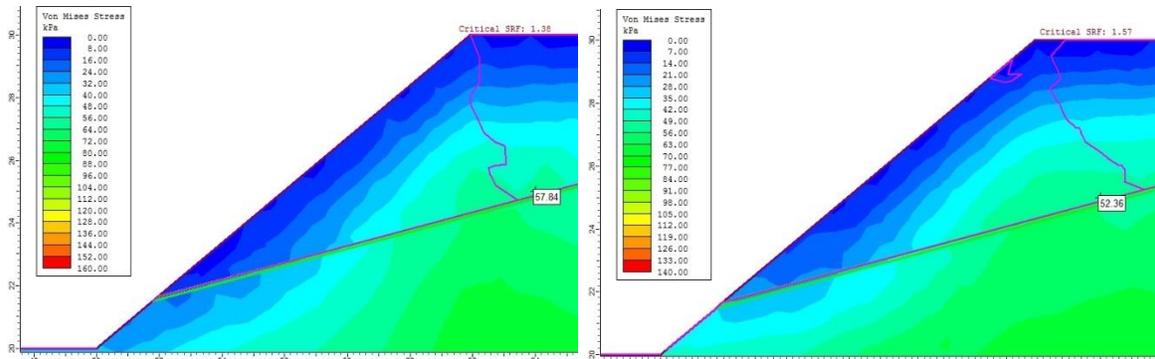
b) Esfuerzos totales drenes de 30 metros de profundidad

Fuente: Propia

Para una inclinación de 15° o una pendiente del 27% se observa que hay un aumento considerable del factor de seguridad de 5 a 20 metros debido a que la presión de poros disminuye cuando se aumenta la profundidad del dren, a los 30

metros el factor de seguridad aumenta debido a que la presión de poros en este punto disminuye, el esfuerzo total es mayor a los 20 metros y menor a los 30 lo que nos indica que la presión de poros es mayor a los 20 metros y por consiguiente el factor de seguridad disminuye.

Ilustración 14 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 15°



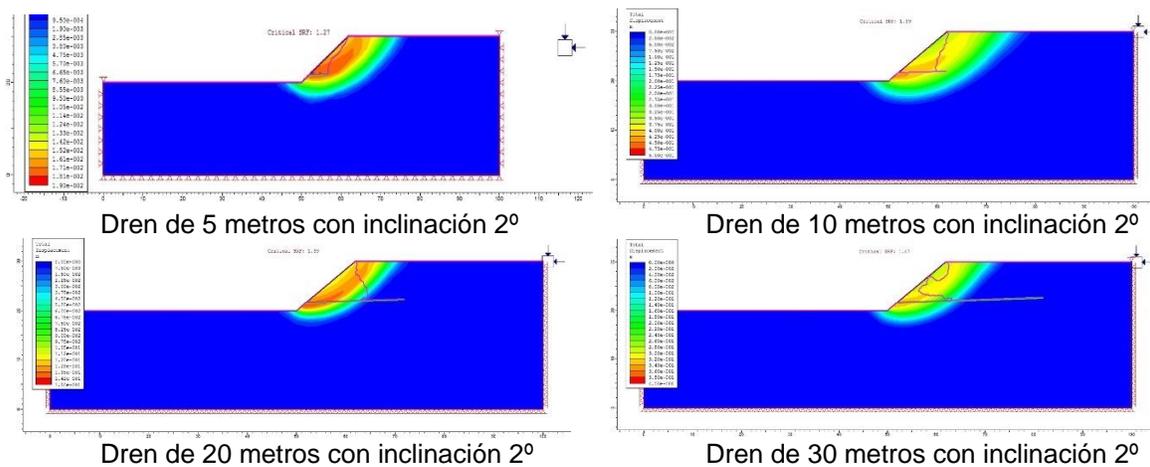
a) Esfuerzos totales drenes de 20 metros de profundidad

b) Esfuerzos totales drenes de 30 metros de profundidad

Fuente: Propia

el dren que presenta un mejor comportamiento y trabaja en la falla determinada por el programa es el de 10 metros de profundidad y 2° de inclinación, con el factor de seguridad encontrado con estas dos variables se determina trabajar el ábaco con estos datos. En la ilustración 15 se comparan las fallas encontradas para la inclinación de 2° y las profundidades de 5 m, 10 m, 20 m y 30 m.

Ilustración 15 Comportamiento de la falla del talud de 40° con la inclusión de los diferentes drenes



Dren de 5 metros con inclinación 2°

Dren de 10 metros con inclinación 2°

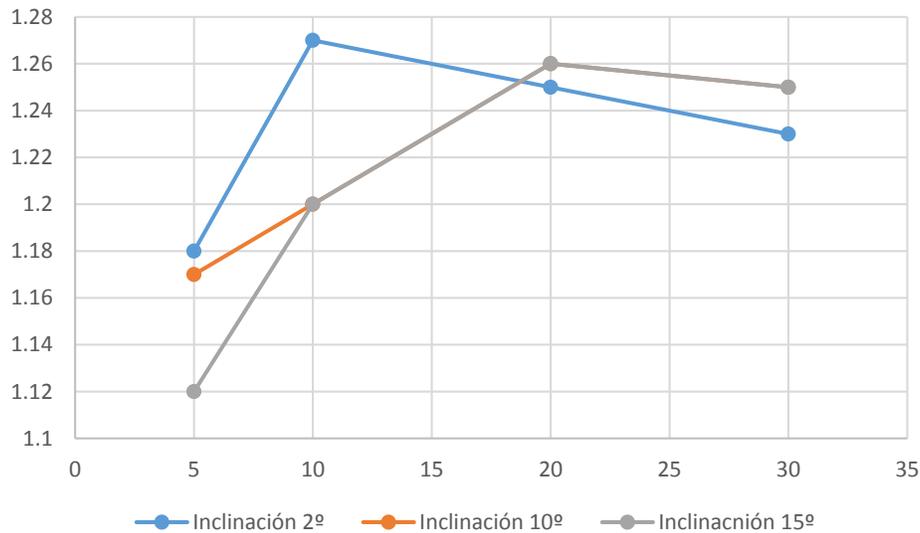
Dren de 20 metros con inclinación 2°

Dren de 30 metros con inclinación 2°

Fuente: Propia

7.2.1.2.2. Talud de 50° de inclinación

Gráfica 2 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Estatica”



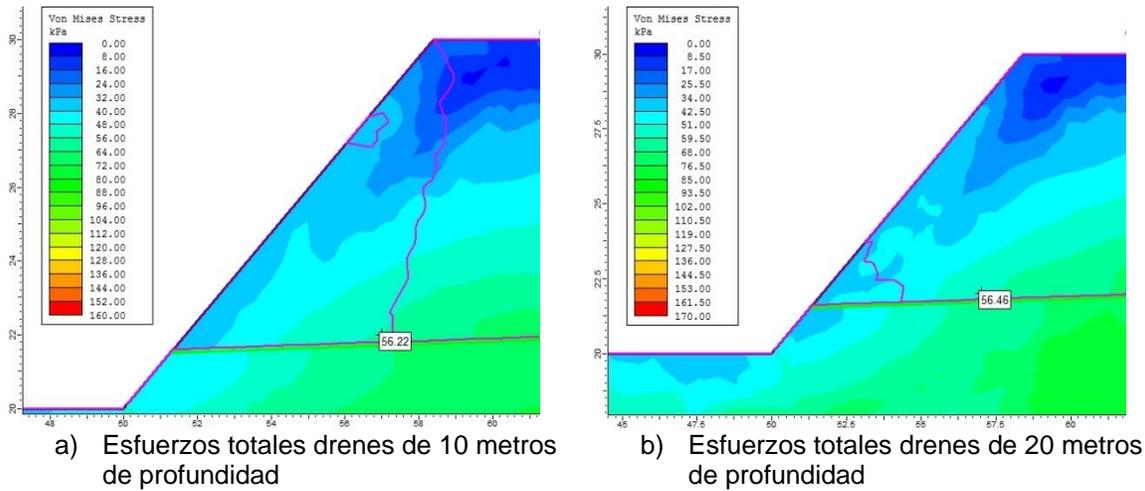
Fuente: Propia

En la gráfica 2 se muestra el comportamiento de los factores de seguridad para un talud de 50° de inclinación cuando se varía la profundidad de inclusión de los drenes.

Los drenes de 2° de inclinación presentan el siguiente comportamiento de 5 a 10 metros un aumento en el factor de seguridad debido a que la presión de poros disminuye cuando se tiene una profundidad de 10 metros, de los 10 a los 20 metros es necesario revisar el comportamiento de los esfuerzos totales para un mismo punto, a los 10 metros se tiene que el esfuerzo total es de 56.22 kpa mientras que para 20 metros es de 56.46 kpa, mostrándonos de esta manera que la presión de poros es mayor a los 20 metros explicando así por que el factor de seguridad disminuye. A los 30 metros se tiene que el esfuerzo total es de 57.77 kpa mostrando que la presión de poros es mayor en 30 metros que en 20 metros explicando de esta manera por qué disminuye el factor de seguridad.

En la ilustración 16 se muestra el comportamiento del nivel freático y los esfuerzos totales para los drenes de 10 metros y 20 metros.

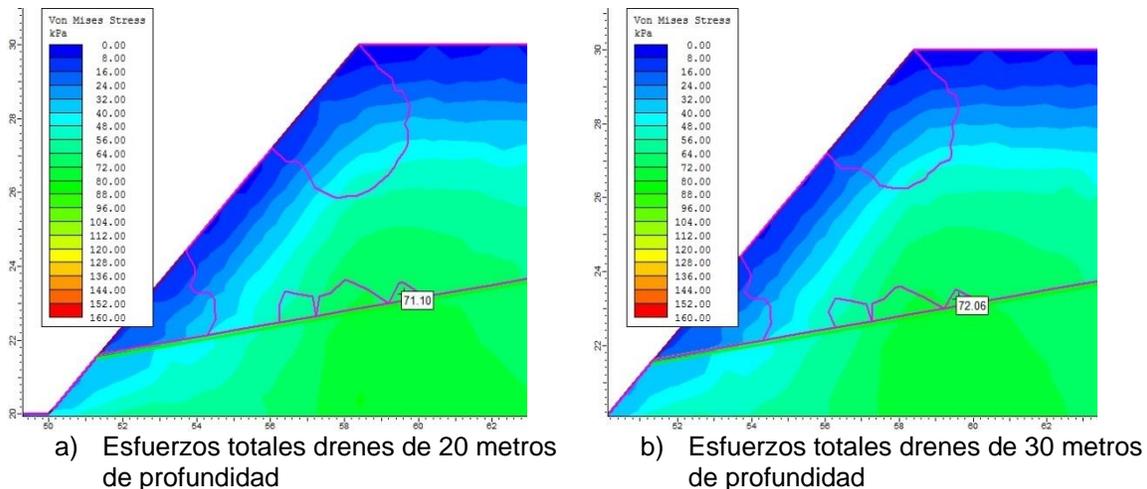
Ilustración 16 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático en un talud de 50°-Estático para los drenes de 10 y 20 metros de profundidad con una inclinación de 2°



Fuente: Propia

En los drenes de 10° de inclinación se observa que el comportamiento de 5 a 20 metros, de los 20 a los 30 metros hay una disminución en el factor de seguridad por lo que es necesario revisar los esfuerzos totales en un sector crítico del talud para dar una explicación a la disminución del factor de seguridad, para 20 metros se tiene un esfuerzo total de 71.10 kpa mientras que para 30 metros se tiene 72.06 kpa, esto nos indica que la presión de poros es mayor para 30 metros por lo que el factor de seguridad tendra a disminuir. En la ilustración 17 se muestra el comportamiento de los drenes de 20 y 30 metros.

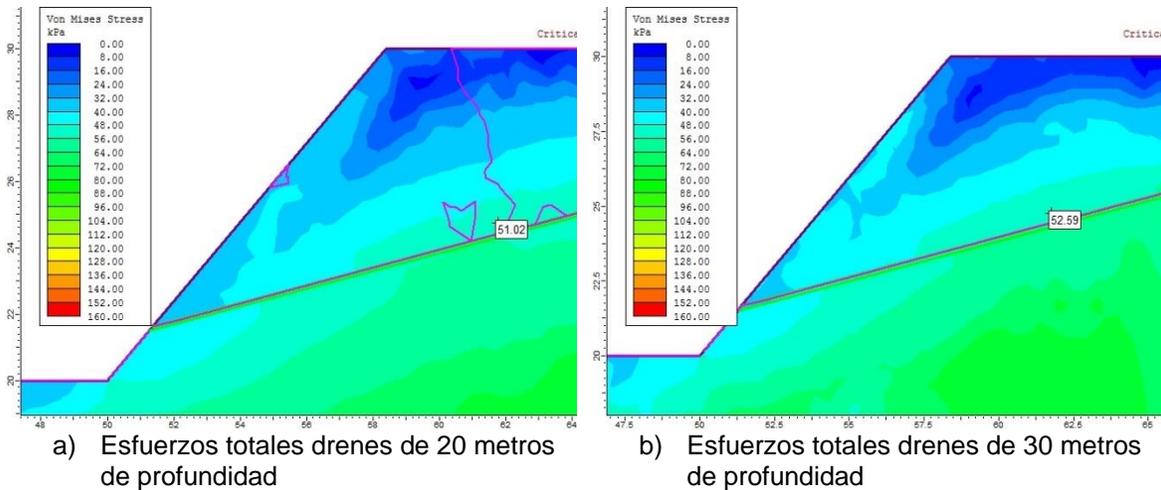
Ilustración 17 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático para un talud de 50°-Estático, para los drenes de 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 10°



Fuente: Propia

Los drenes de 15° de inclinación muestran un comportamiento constante de los 5 hasta los 20 metros, de los 20 a los 30 metros el factor de seguridad disminuye, realizando el análisis de los esfuerzos totales en una zona crítica para los 20 metros se tiene un esfuerzo total de 51.02 kpa mientras que para 30 metros el esfuerzo total es de 52.59 kpa, con estos resultados se puede concluir que la presión de poros es mayor a los 30 metros por lo que el factor de seguridad tiende a disminuir. En la ilustración 18 se muestra el comportamiento de los esfuerzos totales.

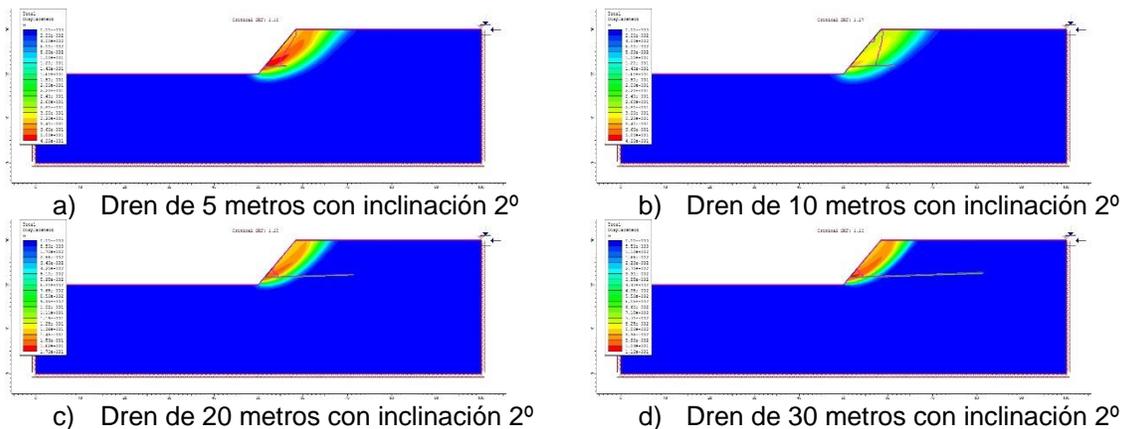
Ilustración 18 Comportamiento de los esfuerzos totales y nivel freático en un talud de 50°-Estático, para los drenes de 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 15°



Fuente: Propia

El dren que presenta un mejor comportamiento y actúa en la superficie de la falla es el de 2° de inclinación y 10 metros de inclusión en la ilustración 18 se muestra las fallas encontradas.

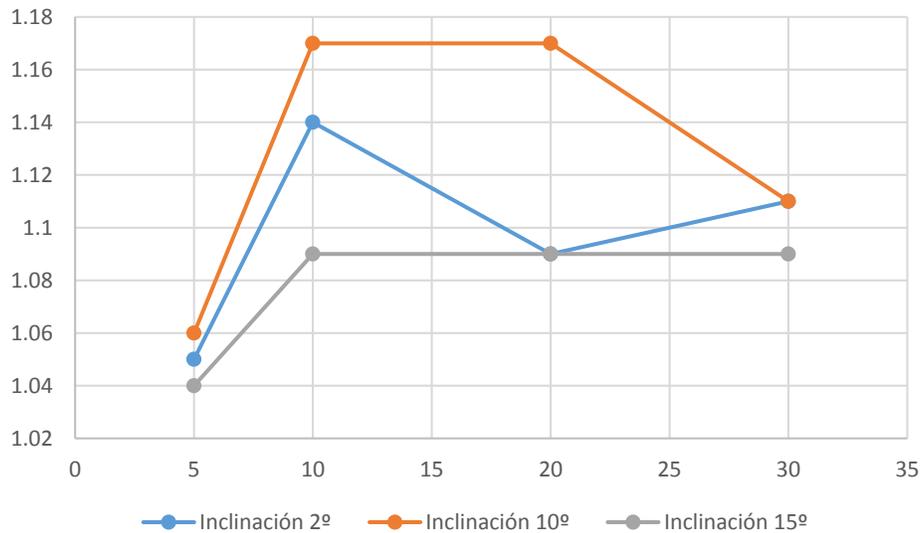
Ilustración 19 Comportamiento de la falla del talud de 50°-Estático con la inclusión de los drenes



Fuente: Propia

7.2.1.2.3. Talud de 60° de inclinación

Gráfica 3 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 60-Arcilla-Estatica”



Fuente: Propia

En la gráfica 3 se observa como es el comportamiento del factor de seguridad para un talud de 60° de inclinación cuando se varia la profundidad de inclusión de los drenes horizontales

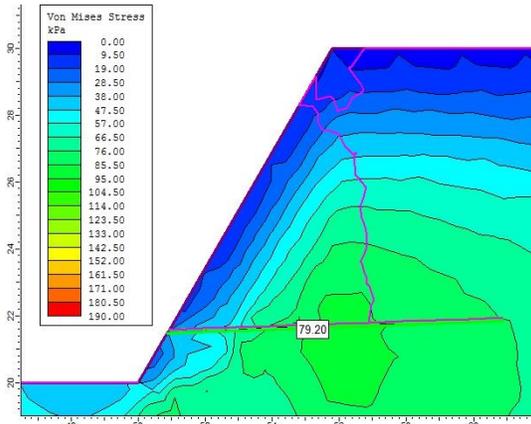
Los drenes de 2° inclinación muestran un aumento constante del factor de seguridad de los 5 a los 10 metros, de los 10 a los 20 metros sufre una disminución del factor de seguridad y de los 20 a los 30 metros sufre un aumento del factor de seguridad, para determinar cuales la razón por la que el factor de seguridad sufre ese cambio se analiza el comportamiento justo donde se abate el nivel freático.

Para 5 metros se tiene un esfuerzo total de 80.86 kpa mientras que para 10 metros el esfuerzo total es de 79.20 kpa, esto significa que existe una menor presión de poros para los 10 metros por lo que tiende a aumentar el factor de seguridad. Revisar la ilustración 20

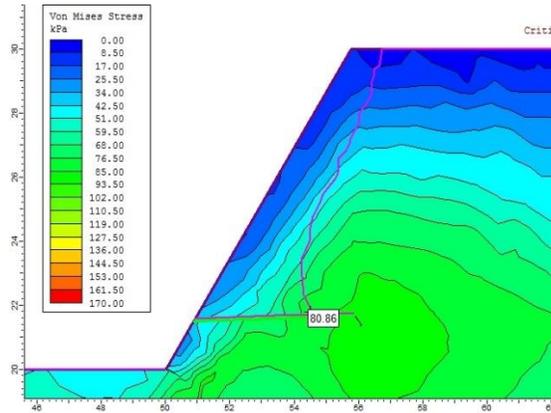
Para determinar por qué el factor de seguridad sufre una disminución a los 20 metros es necesario revisar como es el comportamiento de la presión de poros encontrando que encima del dren de 10 metros la presión de poros es menor a la que se encuentra en el dren de 20 metros, generando de esta manera que el factor de seguridad disminuya. Revisar ilustración 21

A los 30 metros el factor de seguridad aumenta debido a que la presión de poros disminuye donde se encuentra la falla.

Ilustración 20 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 60°-Estatico, para los drenes de 5 y 10 metros de profundidad con una inclinación de 2°



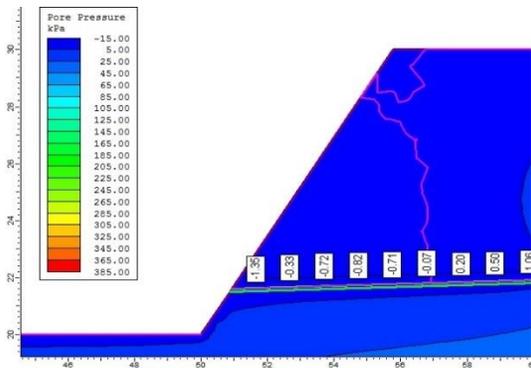
a) Esfuerzos totales drenes de 5 metros de profundidad



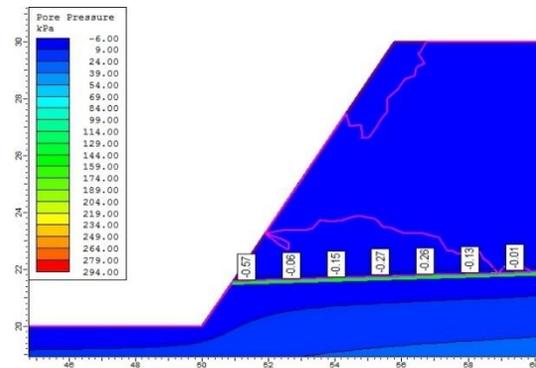
b) Esfuerzos totales drenes de 10 metros de profundidad

Fuente: Propia

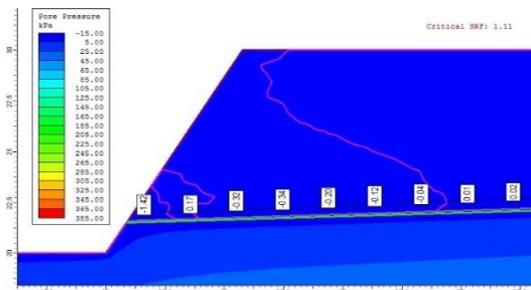
Ilustración 21 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estatico, para los drenes de 10 y 20 metros de profundidad con una inclinación de 2°



a) Presión de poros en los drenes de 5 metros de profundidad



b) Presión de poros en los drenes de 10 metros de profundidad

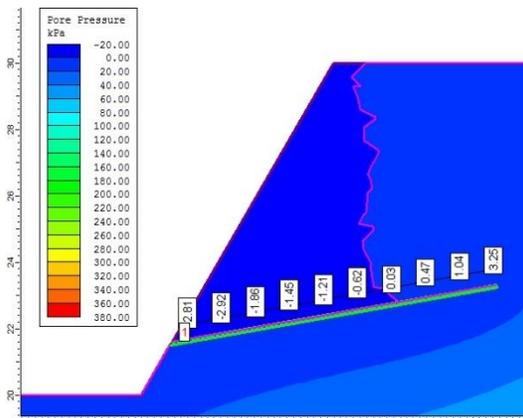


c) Presión de poros en los drenes de 30 metros

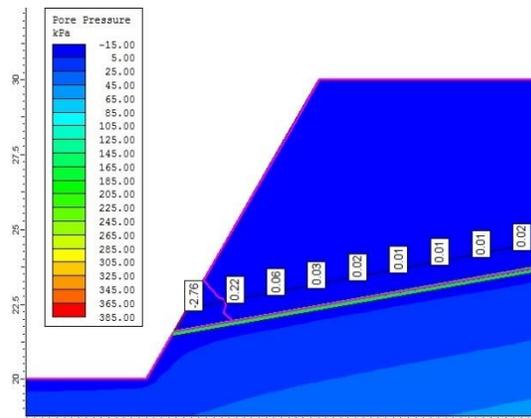
Fuente: Propia

Para los drenes de 10° inclinación se tiene que de los 5 a los 10 metros se sufre un aumento en el factor de seguridad debido a que la presión de poros disminuye, de los 10 a los 30 metros el factor de seguridad disminuye linealmente esto se debe a que el nivel freático ingresa en la superficie de falla además de que la presión de poros aumenta en gran parte del dren generando de esta manera que su factor de seguridad disminuye. En la ilustración 22 se puede observar como es el comportamiento de la presión de poros en los drenes de 10, 20 y 30 metros y como este aumento afecta el factor de seguridad.

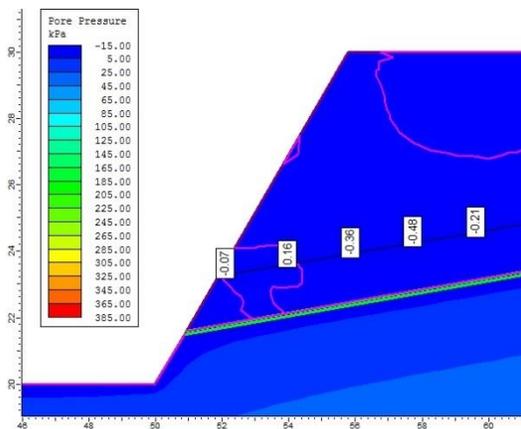
Ilustración 22 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estatico, para los drenes de 10, 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 10°



a) Presión de poros en los drenes de 10 metros de profundidad



b) Presión de poros en los drenes de 20 metros de profundidad



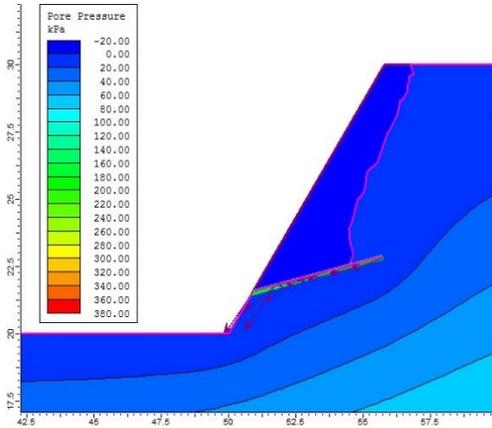
c) Presión de poros en los drenes de 30 metros de profundidad

Fuente propia

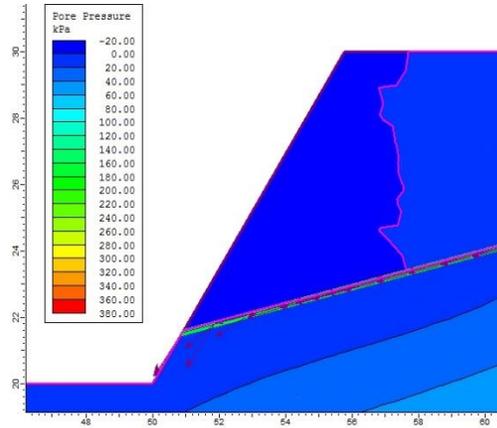
Para los drenes de 15° o con una pendiente del 27% se tiene que de 5 a 10 metros el factor de seguridad aumenta debido a que disminuye la presión de poros en la posible superficie de falla, después de los 10 metros el valor permanece constante debido a que el abatimiento del nivel freático se genera en el mismo tramo. En la

ilustración 23 se observa como es el comportamiento del nivel freático para los drenes de 10, 20 y 30 metros de profundidad.

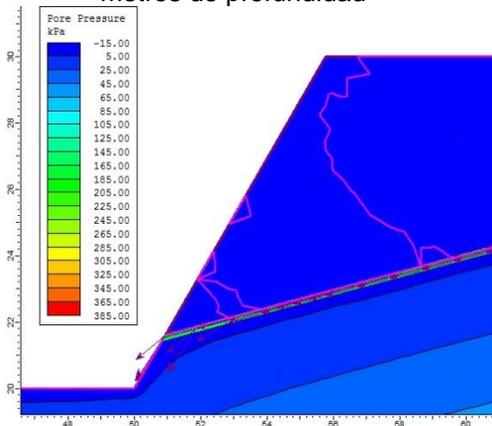
Ilustración 23 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60°-Estatico, para los drenes de 5, 10, 20 y 30 metros de profundidad con una inclinación de 15°



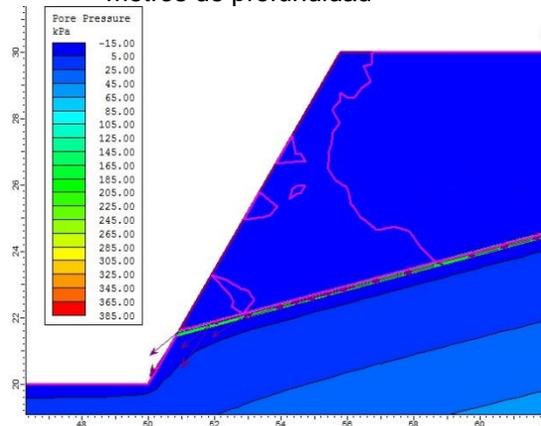
a) Presión de poros en los drenes de 5 metros de profundidad



b) Presión de poros en los drenes de 10 metros de profundidad



c) Presión de poros en los drenes de 20 metros de profundidad

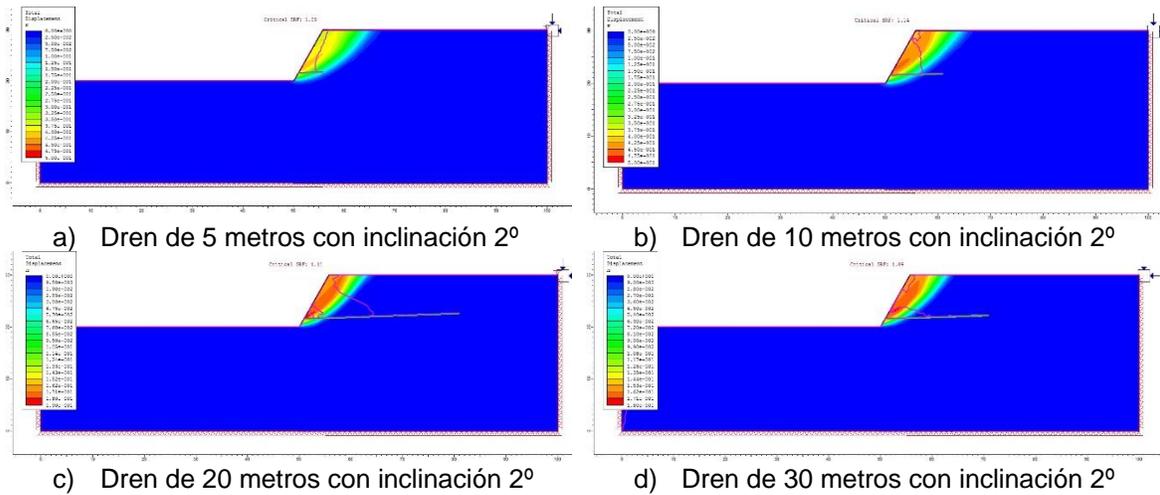


d) Presión de poros en los drenes de 30 metros de profundidad

Fuente Propia

Realizado el análisis se llega a la conclusión de que la inclinación que genera los mejores resultados y actúa en la posible superficie de falla es la de 15° y 10 metros de profundidad con el fin de que se pueda cumplir con el objetivo del presente proyecto se tomaran los datos de los drenes 2° y 10 metros de profundidad. En la ilustración 24 se muestra como es el comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla.

Ilustración 24 Comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla para un talud de 40°-Estatico



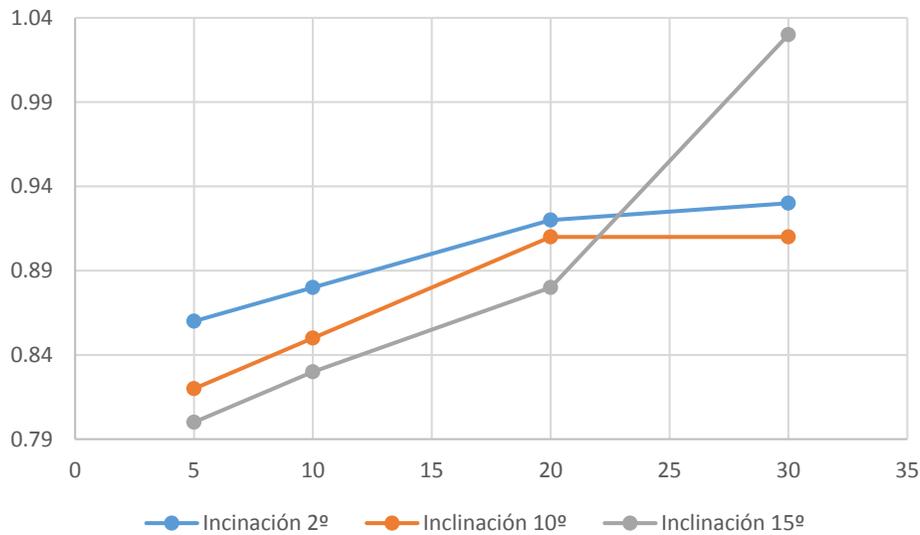
Fuente: Propia

7.2.1.3. Arcillas seudo estática

Las arcillas seudo estáticas fueron modeladas con un sismo de 0.20 acorde con la zona donde se realizaron los ensayos de los materiales. Se realizaron un total de 13 modelaciones por inclinación del talud, se varió la inclinación del talud en 40°, 50° y 60°.

7.2.1.3.1. Talud de 40° de inclinación

Gráfica 4 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 40-Arcilla-Seudo estática”

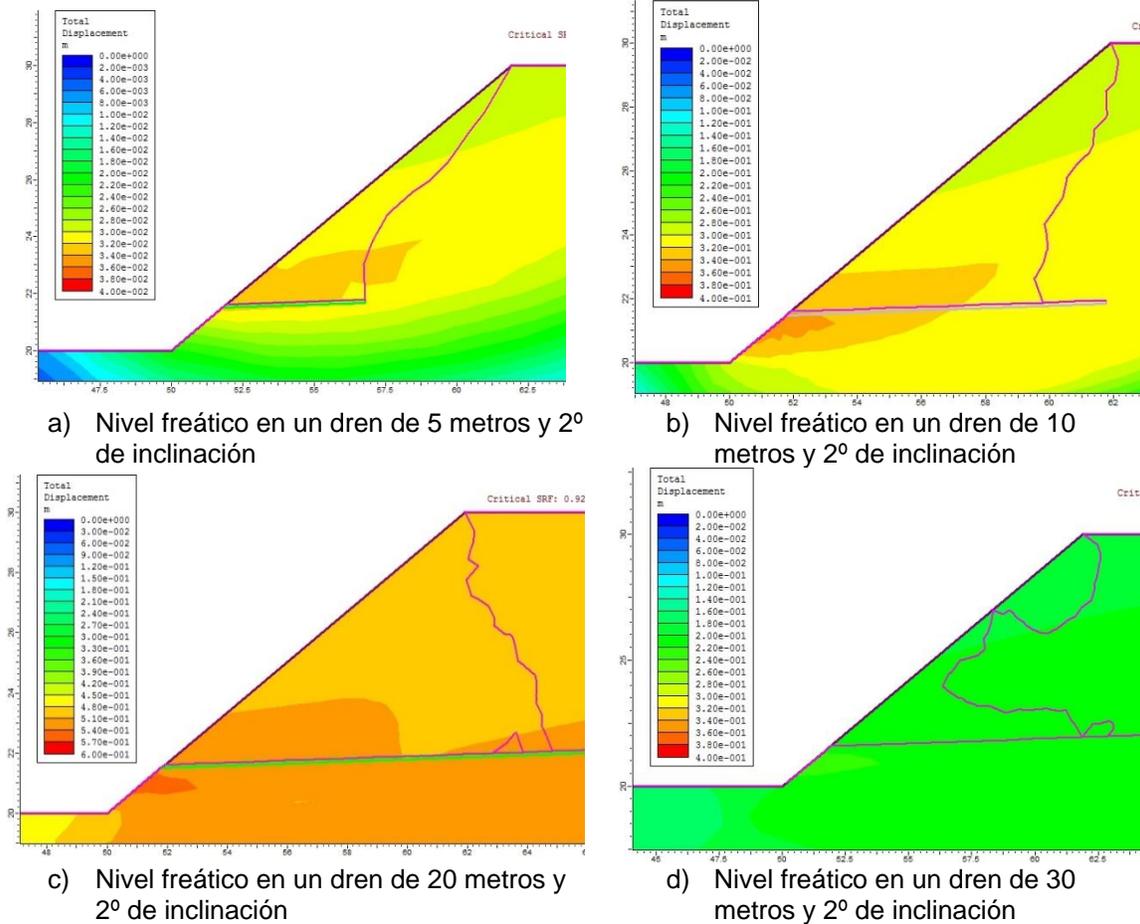


Fuente: Propia

En la gráfica 4 se realizó el análisis de como variaba el factor de seguridad a medida que aumenta la profundidad de inclusión y la inclinación del dren para un talud de 40°, el análisis se realizara por inclinación del dren.

Para los drenes de 2° inclinación se encontró que el comportamiento es lineal puesto que a medida que se aumenta la profundidad del dren se aumenta el factor de seguridad. Revisando la ilustración 25 encontramos que a medida que se aumenta la profundidad del dren el nivel freático que se encuentra en la superficie de falla va disminuyendo generando de esta manera que el factor de seguridad aumente debido a que de esta manera disminuye la presión de poros.

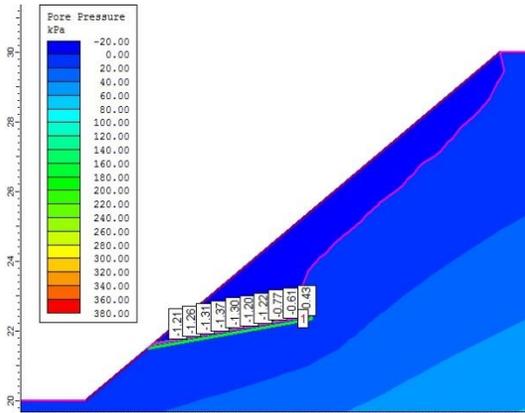
Ilustración 25 Comportamiento del nivel freático en un talud de 40°.Seudo estático, en las posibles superficies de falla.



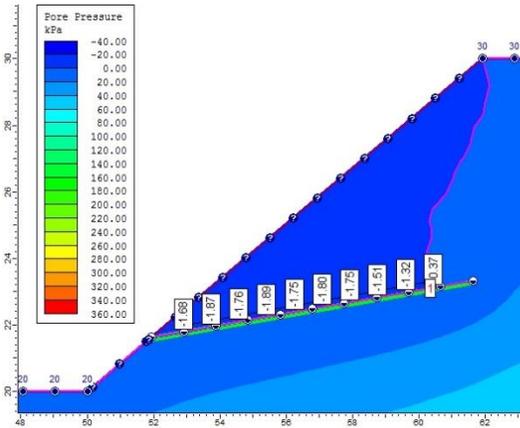
Fuente: Propia

Para los drenes de 10° de inclinación se encontró que el comportamiento es lineal puesto que a medida que se aumenta la profundidad del dren aumenta el factor de seguridad. revisando las presiones de poros encima del dren, se tiene que a medida que aumenta la longitud del dren menos es la presión de poros en el lugar donde se da el abatimiento. Revisar la ilustración 26 para observar el comportamiento de la presión de poros en las diferentes profundidades de instalación.

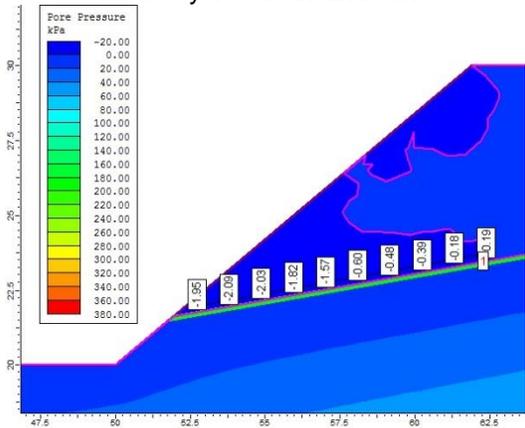
Ilustración 26 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 40°-Seudo estático variando la profundidad del dren



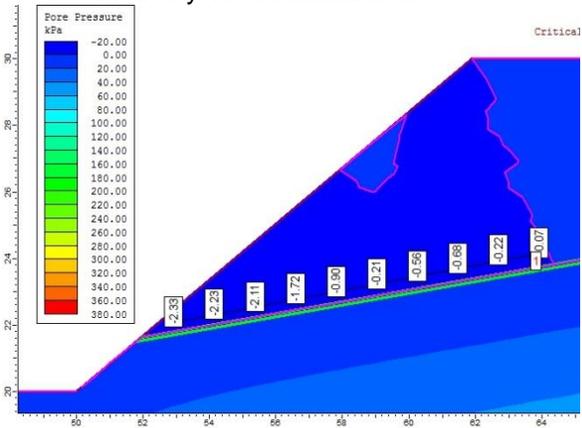
a) Presión de poros para un dren de 5 metros y 10° de inclinación



b) Presión de poros para un dren de 10 metros y 10° de inclinación



c) Presión de poros para un dren de 20 metros y 10° de inclinación



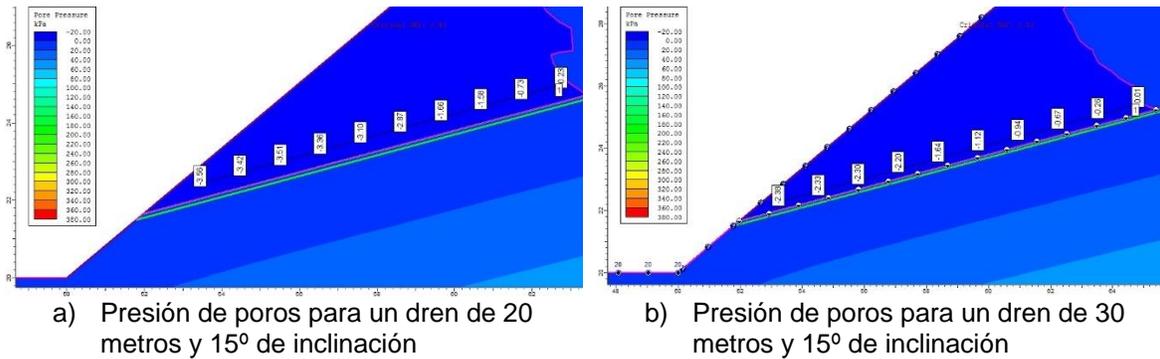
d) Presión de poros para un dren de 30 metros y 10° de inclinación

Fuente: Propia

Para los drenes de 15° de inclinación se muestra un comportamiento lineal desde los 5 metros hasta los 20 metros, puesto que a los 30 metros el factor de seguridad muestra un aumento considerable, debido a esto se realizó un análisis más profundo entre las superficies de falla de 20 y 30 metros.

A los 20 metros se encuentra que la presión de poros es mucho menor a la que se tiene a los 30 metros justificando de esta manera que el factor de seguridad aumente considerablemente, en la ilustración 27 se puede observar el comportamiento del nivel freático con la instalación de los drenes de 20 y 30 metros.

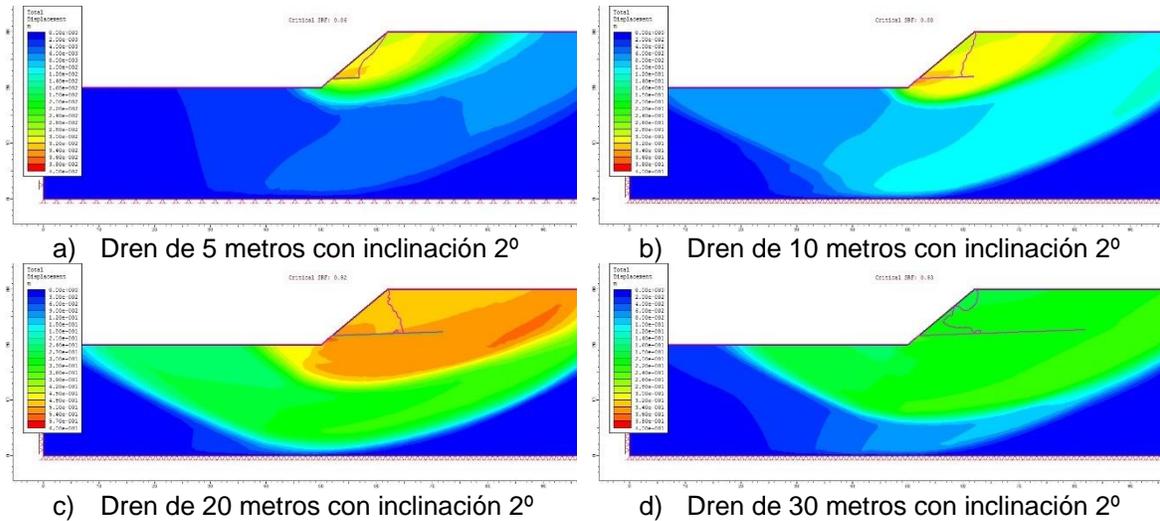
Ilustración 27 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 40°-Seudo estático con drenes de 20 y 30 metros de profundidad



Fuente: Propia

Realizando el análisis del comportamiento del nivel freático con las diferentes inclinaciones y profundidades de los drenes se encuentra que los que actúan en la superficie de falla son los de 20 metros de profundidad, la inclinación que genera factores de seguridad más altos es la de 2°.

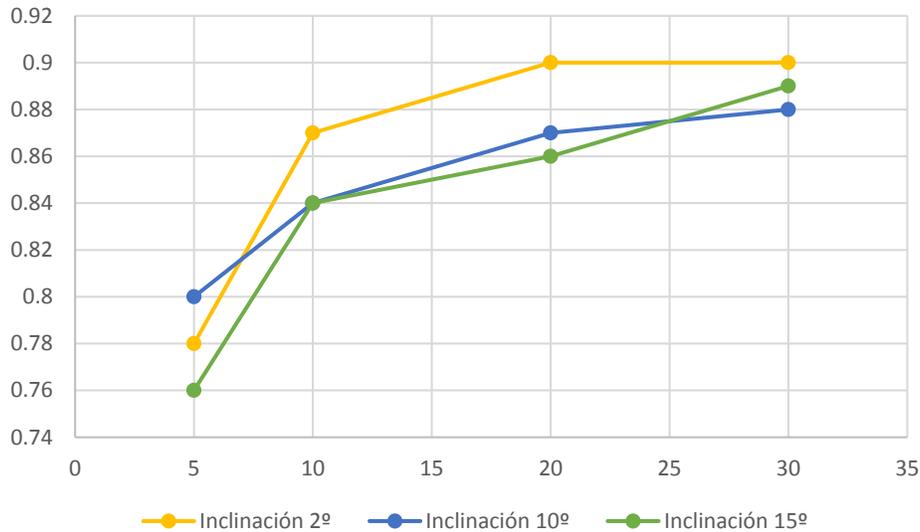
Ilustración 28 Posibles fallas en un talud de 40°- Seudo estático con drenes



Fuente: Propia

7.2.1.3.2. Talud de 50° de inclinación

Gráfica 5 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Seudo estática”

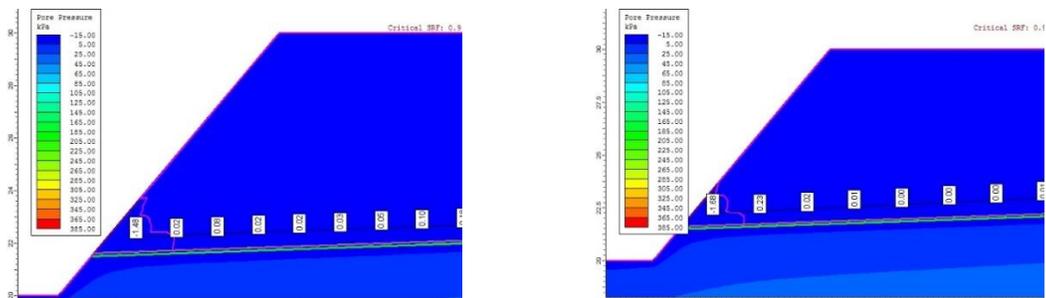


Fuente: Propia

Para los drenes de 2° de inclinación se tiene un aumento del factor de seguridad de los 5 metros hasta los 20 metros, mientras que de los 20 a los 30 metros el factor de seguridad permanece constante, revisando la presión de poros en el tramo del dren se encuentra que a pesar de que el nivel freático está en la falla la presión el cálculo de la presión de poros indica dos cosas la primera es que la presión de poros se comporta constante para los drenes de 20 y 30 metros y la presión de poros es menor a los 20 y 30 metros que a los 5 y 10 metros.

En la ilustración 28 se muestra como es el comportamiento de la presión de poros para los drenes de 20 y 30 metros.

Ilustración 29 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50°-Seudo estático, drenes de 20 metros y 30 metros



a) Presión de poros para un dren de 20 metros y 15° de inclinación

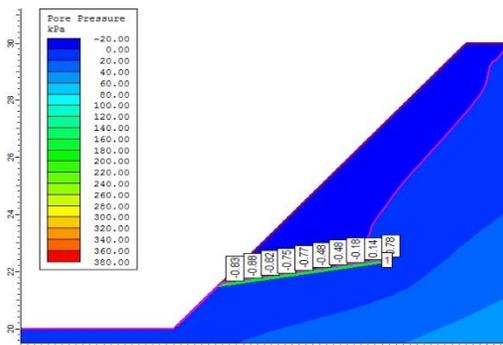
b) Presión de poros para un dren de 30 metros y 15° de inclinación

Fuente: Propia

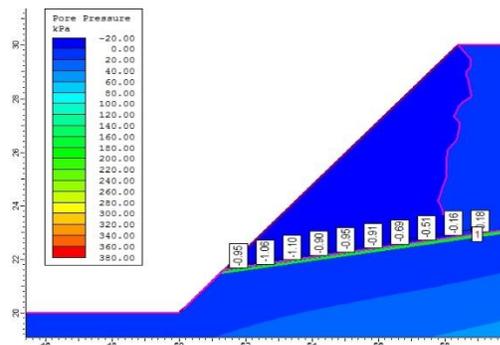
Para los drenes de 10° de inclinación se presenta un aumento del factor de seguridad de los 5 a los 30 metros, revisando el comportamiento de la presión de poros donde se abate el nivel freático se encuentra que para los diferentes drenes se tienen los siguientes valores 5 metros 0.78 kpa, para los 10 metros 0.18 kpa, los 20 metros 0.08 kpa y los 30 metros 0.07 kpa, mostrando de esta manera por que a medida que disminuye la presión de poros el factor de seguridad aumenta.

Revisando la ilustración 30 se muestra como es el comportamiento de los drenes horizontales a medida que se aumenta la profundidad de los drenes.

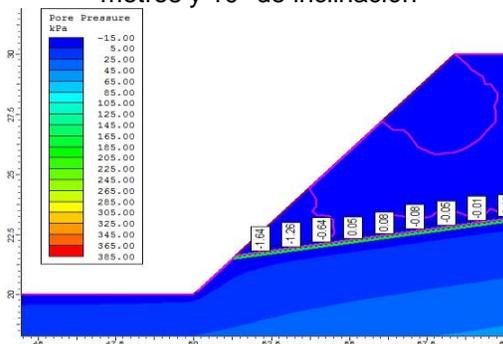
Ilustración 30 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50° -Seudo estático, drenes de 5 metros, 10 metros, 20 metros y 30 metros



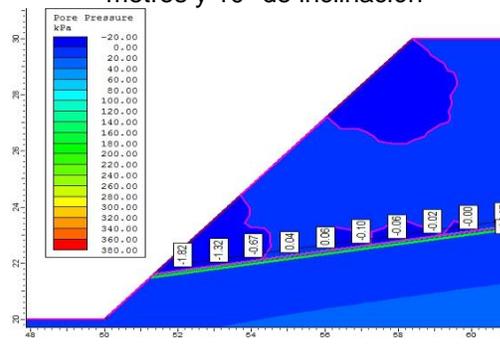
a) Presión de poros para un dren de 5 metros y 10° de inclinación



b) Presión de poros para un dren de 10 metros y 10° de inclinación



c) Presión de poros para un dren de 20 metros y 10° de inclinación



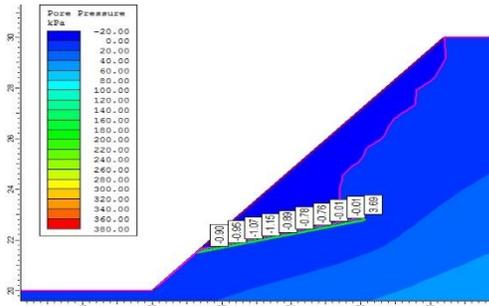
d) Presión de poros para un dren de 30 metros y 10° de inclinación

Fuente: Propia

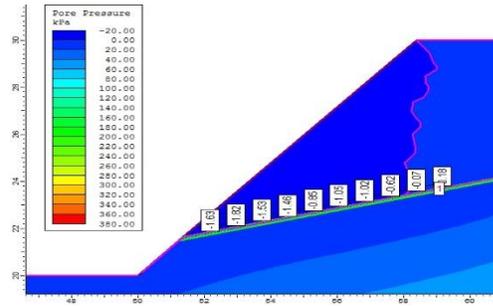
Para los drenes con 15° de inclinación se presenta que de los 5 a los 20 metros el factor de seguridad tiende a aumentar, analizando la presión de poros donde sucede el abatimiento del nivel freático se encuentra que a los 5 metros la presión de poros es de 3.69 kpa, para los 10 metros la presión de poros es de 0.18 kpa, para los 20 metros la presión de poros es de 0.02 y para los 30 metros la presión de poros es de 0.01.

En la ilustración 31 se observa como es el comportamiento de la presión de poros con las diferentes instalaciones de dren.

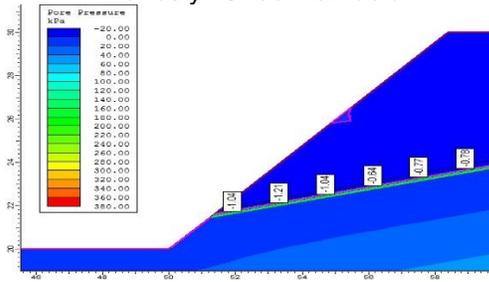
Ilustración 31 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 50°-Seudo estático, drenes de 5 metros, 10 metros, 20 metros y 30 metros



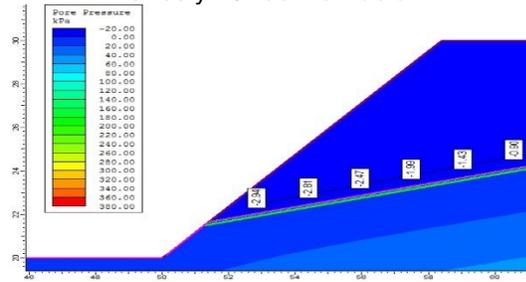
a) Presión de poros para un dren de 5 metros y 15° de inclinación



b) Presión de poros para un dren de 10 metros y 15° de inclinación



c) Presión de poros para un dren de 20 metros y 15° de inclinación



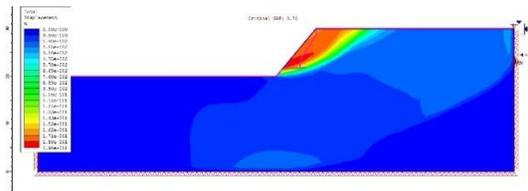
d) Presión de poros para un dren de 30 metros y 15° de inclinación

Fuente: Propia

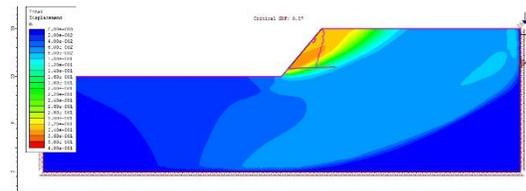
Realizando el análisis de las superficies de falla se encuentra que el dren que trabaja sobre la superficie de falla es la de 10 metros con 2° de inclinación.

En la ilustración 32 se observan las posibles superficies de falla cuando se varían las profundidades del dren manteniendo la inclinación de 2°.

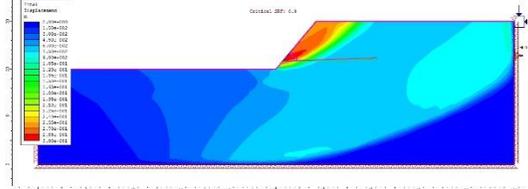
Ilustración 32 Posibles fallas en un talud de 50°- Seudo estático con drenes de 10 metros y 2° de inclinación



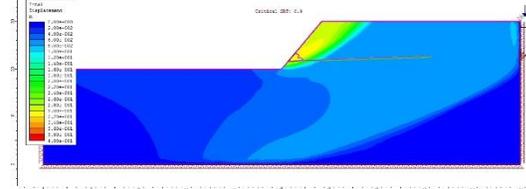
a) Dren de 5 metros con inclinación 2°



b) Dren de 10 metros con inclinación 2°



c) Dren de 20 metros con inclinación 2°

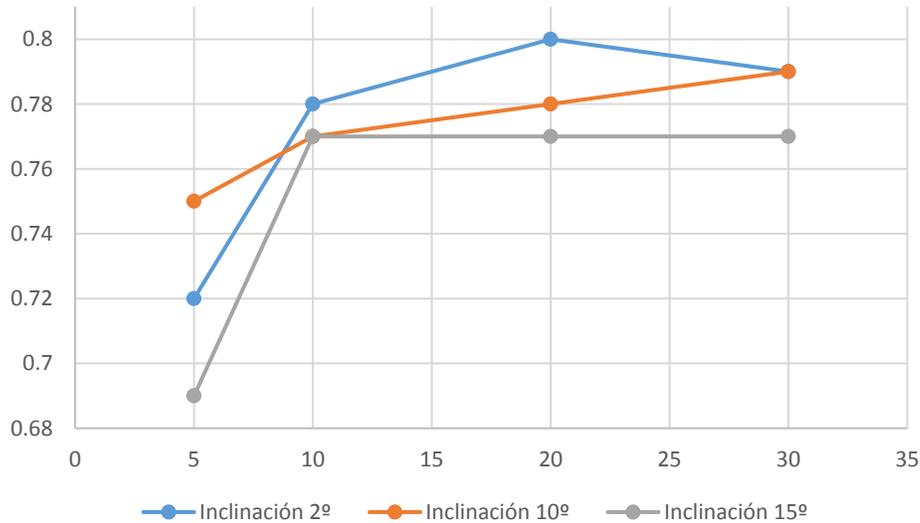


d) Dren de 30 metros con inclinación 2°

Fuente: Propia

7.2.1.3.3. Talud de 60° de inclinación

Gráfica 6 Factor de seguridad vs Longitud del dren “Talud de 50-Arcilla-Seudo estática”



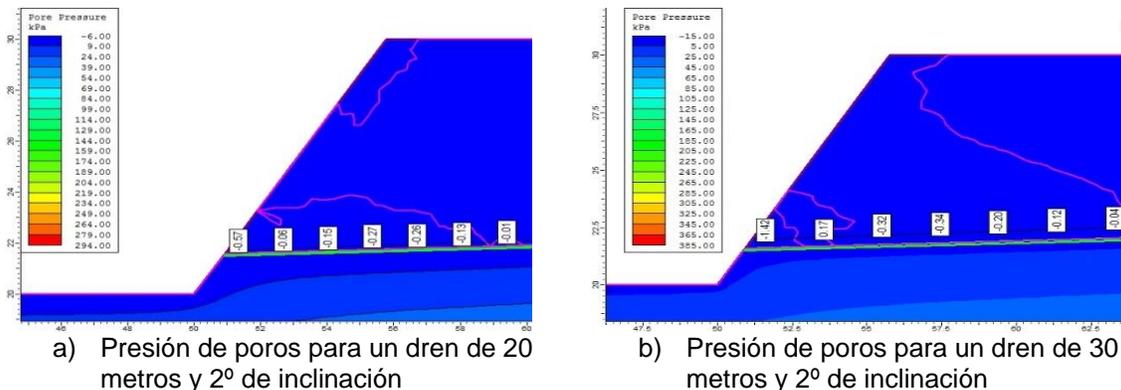
Fuente: Propia

En la gráfica 6 se muestra el comportamiento de los drenes horizontales para un talud de 60° de inclinación en la condición seudo estática.

Los drenes de 2° tienen un aumento del factor de seguridad de los 5 metros hasta los 20 metros constante esto se debe a la reducción de presión de poros, mientras que de los 20 a los 30 metros hay una disminución de la presión de poros lo que genera que se disminuya el factor de seguridad.

En la ilustración 33 se muestra como es el comportamiento de la presión de poros para los drenes de 20 y 30 metros

Ilustración 33 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 20 y 30 metros

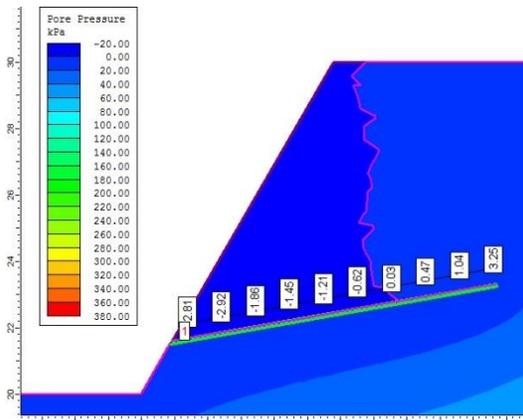


Fuente: Propia

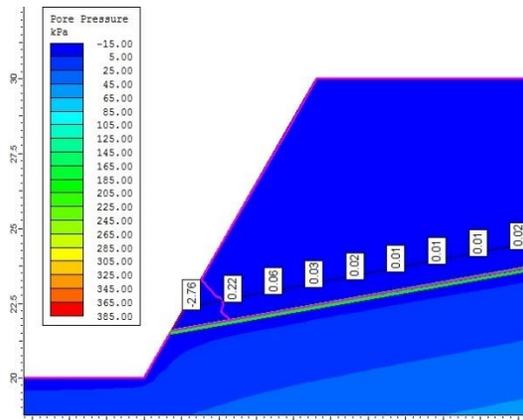
Los drenes de 10° de inclinación muestran un aumento en el factor de seguridad de los 5 metros hasta los 30 metros, revisando la presión de poros en el tramo de instalación del dren se encuentra que a medida que se aumenta la longitud del hay una disminución de la presión de poros, generando de esta manera un aumento en el factor de seguridad.

En la ilustración 34 se observa como es el comportamiento de La presión de poros a medida que se aumenta la longitud del dren

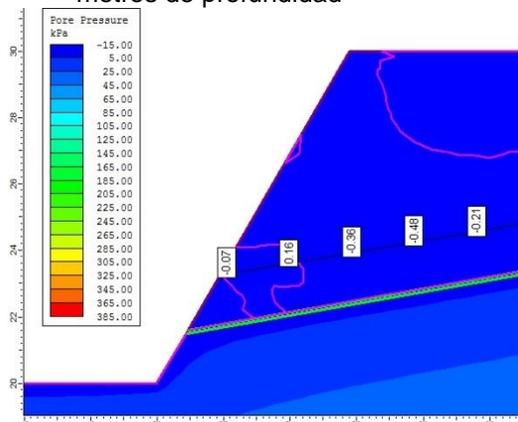
Ilustración 34 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 10, 20 y 30 metros con una inclinación de 10°



a) Presión de poros en los drenes de 10 metros de profundidad



b) Presión de poros en los drenes de 20 metros de profundidad

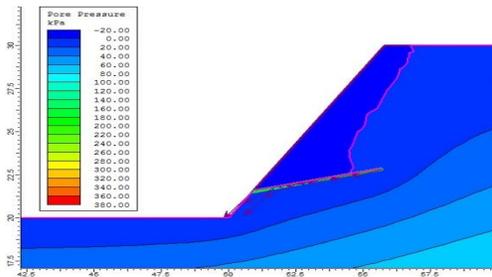


c) Presión de poros en los drenes de 30 metros de profundidad

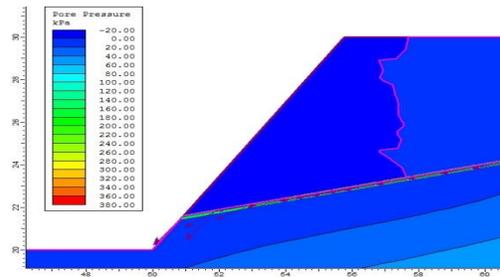
Fuente: Propia

Para los drenes de 15° o con una pendiente del 27% se tiene que de 5 a 10 metros el factor de seguridad aumenta debido a que disminuye la presión de poros en la posible superficie de falla, después de los 10 metros el valor permanece constante debido a que el abatimiento del nivel freático se genera en el mismo tramo. En la ilustración 35 se observa como es el comportamiento del nivel freático para los drenes de 10, 20 y 30 metros de profundidad.

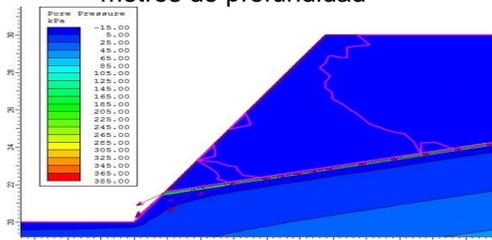
Ilustración 35 Comportamiento de la presión de poros para un talud de 60°-Seudo estático, drenes de 5, 10, 20 y 30 metros con una inclinación de 15°



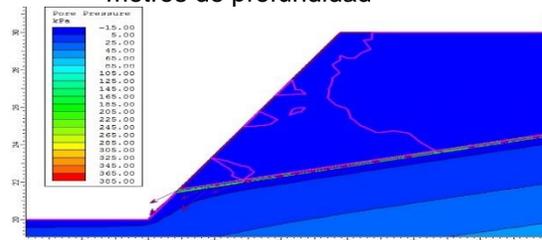
a) Presión de poros en los drenes de 5 metros de profundidad



b) Presión de poros en los drenes de 10 metros de profundidad



c) Presión de poros en los drenes de 20 metros de profundidad

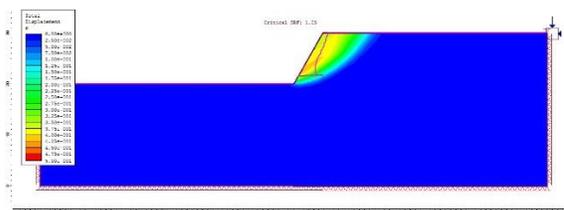


d) Presión de poros en los drenes de 30 metros de profundidad

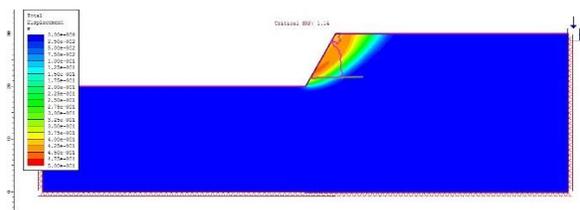
Fuente: Propia

Realizado el análisis se llega a la conclusión de que la inclinación que genera los mejores resultados y actúa en la posible superficie de falla es la de 15° y 10 metros de profundidad con el fin de que se pueda cumplir con el objetivo del presente proyecto se tomarán los datos de los drenes 2° y 10 metros de profundidad. En la ilustración 24 se muestra como es el comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla.

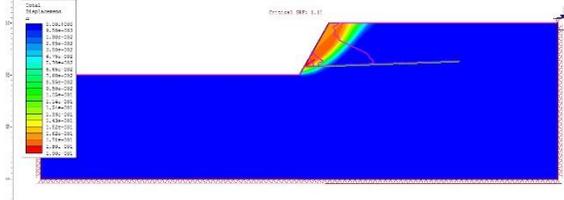
Ilustración 36 Comportamiento del nivel freático en las posibles superficies de falla para un talud de 40°-Estatico



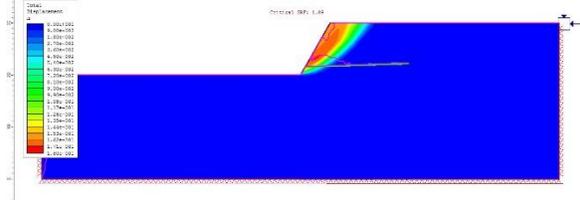
a) Dren de 5 metros con inclinación 2°



b) Dren de 10 metros con inclinación 2°



c) Dren de 20 metros con inclinación 2°



d) Dren de 30 metros con inclinación 2°

Fuente: Propia

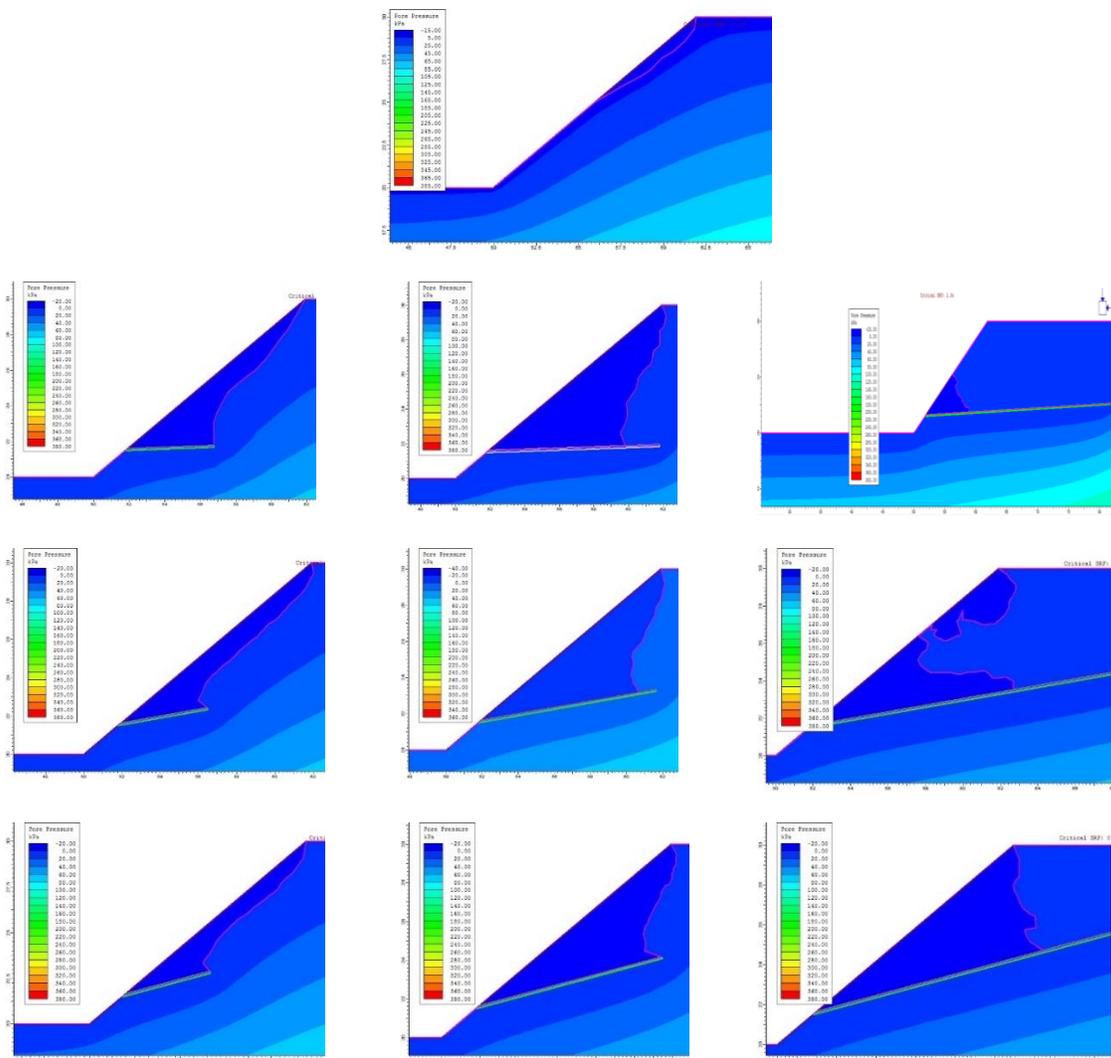
7.2.2. Análisis de los limos

7.2.2.1. Análisis del flujo en los limos

Para realizar un análisis estático se hace necesario hacer el análisis del flujo, debido a que en los estudios previos no se tiene información acerca del nivel freático se hace necesario determinar un comportamiento cuando no se tienen drenes horizontales y cuando se tienen drenes horizontales con sus diferentes inclinaciones y profundidades.

En la ilustración 37 se observa como fue el comportamiento de los drenes horizontales frente al nivel freático inicial.

Ilustración 37 Comportamiento del flujo talud de 40° Estático sin drenes y con drenes



Fuente: Propia

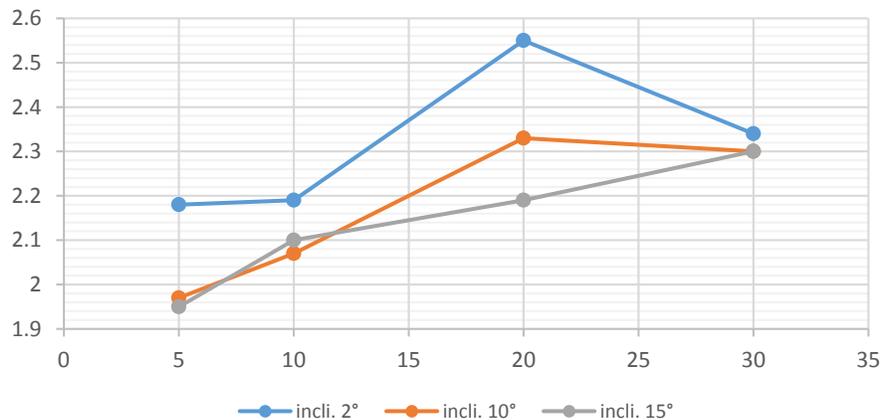
En la ilustración anterior se muestran como son los comportamientos del nivel freático con respecto a la inclinación y longitud de cada dren, observando que en los casos de inclinación de 2° del dren y la longitud de 10 es la que mejor abatimiento presenta, en el de 10° se tiene el mismo comportamiento que en el de 2° ya que no se logra abatir de la forma esperada y para la inclinación de 15° se presenta un mejor abatimiento en la longitud de 30 m.

7.2.2.2. Limos estáticos

Para determinar el comportamiento de los limos se realizaron un total de 13 modelos por inclinación de talud teniendo un total de 39 modelos, para facilitar el análisis de los datos se plantea realizar 1 gráfico, factor de seguridad vs longitud del dren que permite determinar cómo es el comportamiento a medida que se aumenta la inclusión del dren.

7.2.2.2.1. Talud de 40° de inclinación

Gráfica 7 Factor de seguridad vs longitud del dren “talud de 40°-limo -Estática”

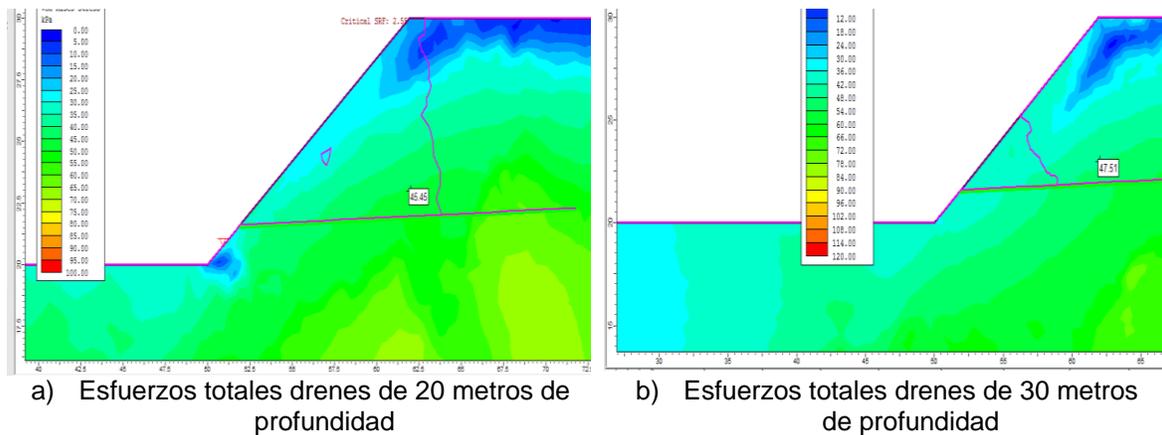


Fuente: propia

En la gráfica 7 se muestra como es el comportamiento del factor de seguridad con respecto a la longitud del dren variando su inclinación.

Para la inclinación de 2° se muestra claramente un valor de mayor factor de seguridad a una longitud del dren de 20m y una disminución a partir de 21m hasta la longitud de 30m a la cual fue la longitud máxima de inclusión de dren, donde haciendo un análisis en un mismo punto en el talud se encuentra que para el dren de 20 se tiene un valor de esfuerzo total es de 45.45 kpa y para un dren de 30 m en el mismo punto analizado 47.51 kpa como se ilustra en la imagen 27.

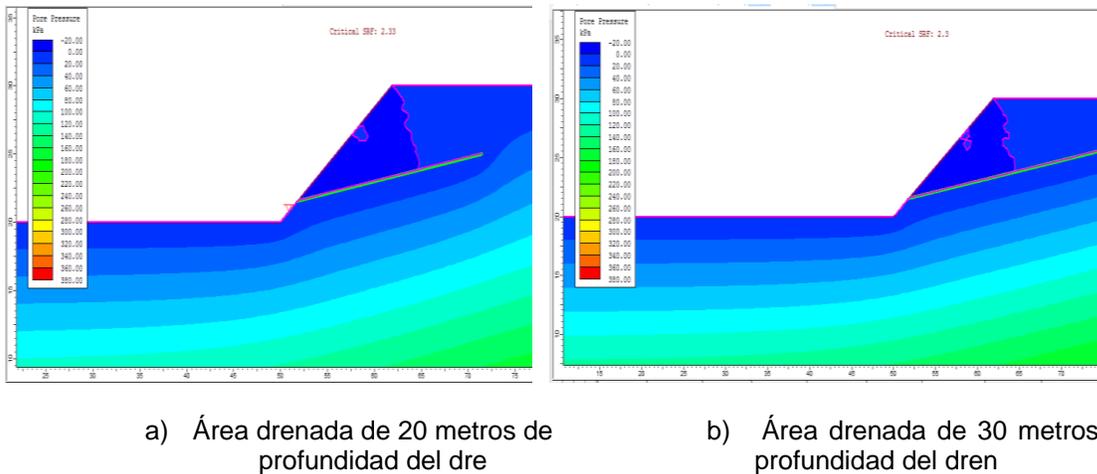
Ilustración 38 Comportamiento de los esfuerzos totales para inclinaciones de 2°



Fuente: Propia

Para una inclinación de 10° se encuentra que para una longitud de 20 m tiene un factor de seguridad mayor al de 30 m de longitud, entrando hacer el análisis en el comportamiento del flujo podemos detallar que para 20 m de longitud la zona drenada es mayor a la zona drenada por el dren de 30 m lo que genera un aumento del factor de seguridad del 0.03, el área de afectación la podemos ver en la ilustración 13.

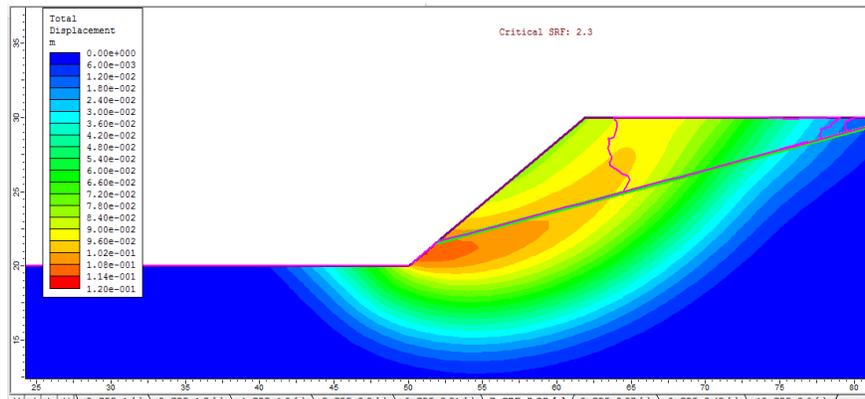
Ilustración 39 abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación



Fuente: Propia

Para una inclinación de 15° se observa un aumento constante del factor de seguridad hasta llegar a una longitud de 30 m donde observamos en los análisis elaborados que el dren logra hacer un abatimiento mayor con respecto a las otras inclinaciones, por su longitud, pero lo que no lo favorece la inclinación ya que sobresale de la superficie de falla y el agua abatida llega a contactar directamente la falla como se ve en la ilustración 14.

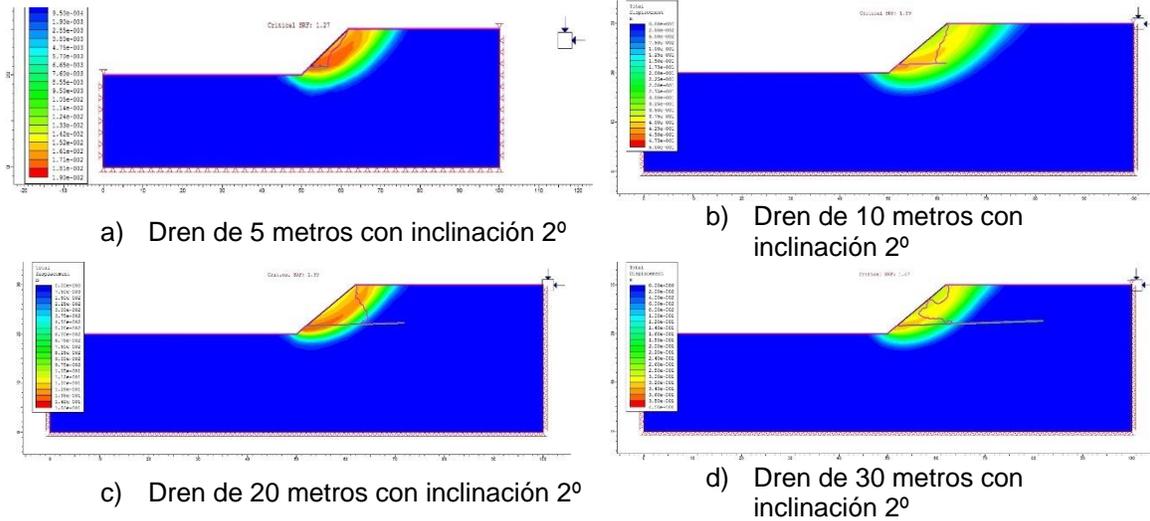
Ilustración 40 abatimiento del nivel freático para inclinación de dren de 15 ° y longitud de 30 m



Fuente: Propia

La mejor opción de abatimiento para las fallas presentes para esta modelación la cual es de 40° de inclinación de talud y de 10 m de altura, se encontró que fue el dren de 20 m de profundidad con una inclinación de 2° obteniendo que el valor de factor de seguridad fue de 2.55 siendo el mayor para los análisis hechos en esta geometría, lo cual nos muestra la ilustración 30.

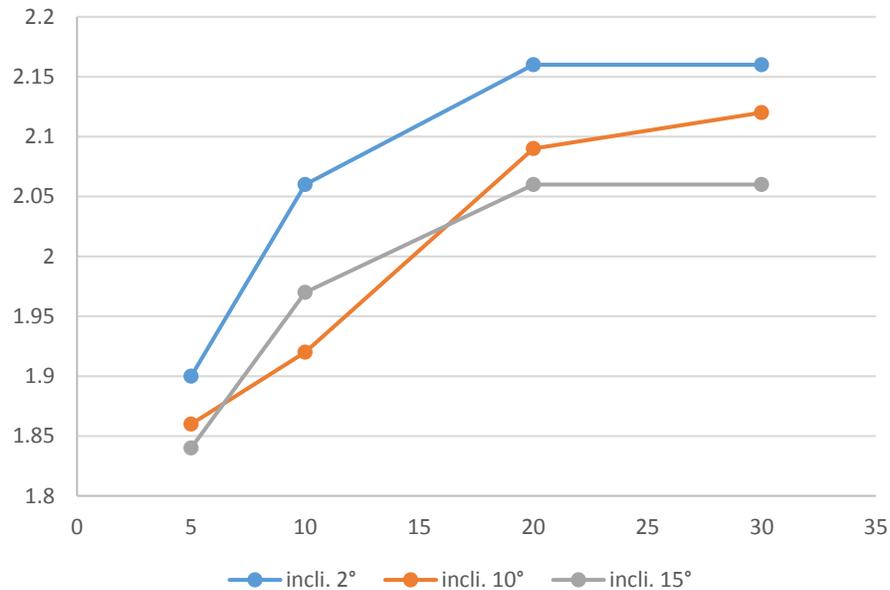
Ilustración 41 comportamiento de la falla del talud de 40° con inclusión de los diferentes drenes



Fuente: Propia

7.2.2.2.2. Talud de 50° de inclinación

Gráfica 8 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 50°-Limo-Estático

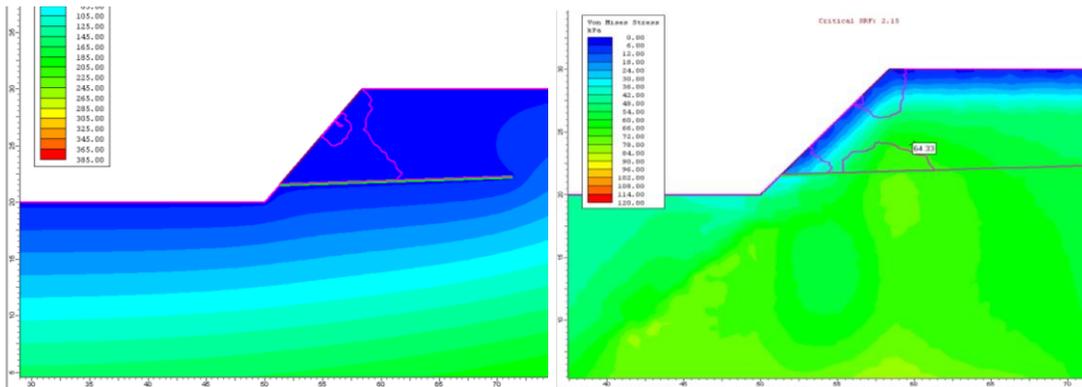


Fuente: Propia

En la gráfica 8 se muestra como es el comportamiento del factor de seguridad con respecto a la longitud del dren variando su inclinación.

Como lo podemos ver en la gráfica 8 para la inclinación de 2° tenemos el mejor comportamiento obteniendo los valores de factor de seguridad más altos, observando que luego de los 20m de profundidad del dren el factor de seguridad tiende a ser constante llegando a un valor de 30 m con el mismo valor del factor de seguridad, según esto y como lo podemos ver en la ilustración 42 donde se comparan los valores de esfuerzos totales en un mismo punto podemos ver que el valor del esfuerzo con un dren de 20m es de 64.09 kpa y para un dren de 30m es de 64.12 por lo que podemos decir que el dren de 30m para esta determinada inclinación de 2° cumple la misma función que el de 20m.

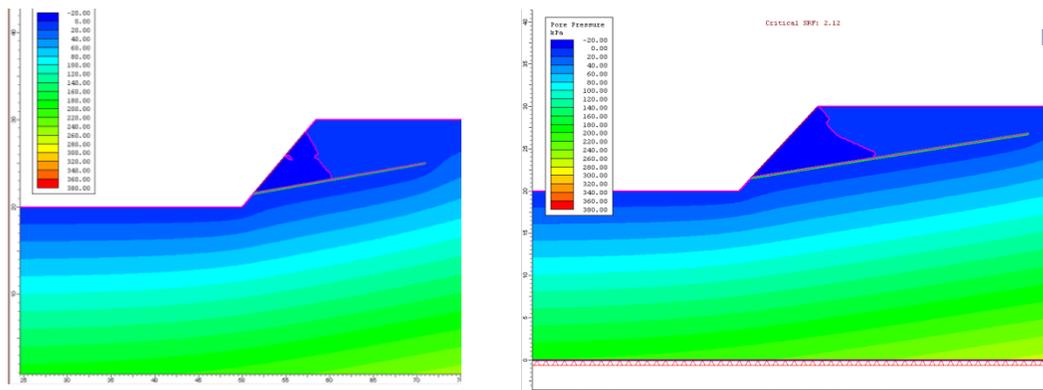
Ilustración 42 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 50°-Estático para inclinaciones de 2°



Fuente Propia

Para la inclinación de 10° el comportamiento es similar al dado por la inclinación de 2° ya que se presenta un valor constante del factor de seguridad desde la longitud de 20m hasta 30m de longitud del dren, la longitud con el valor de factor de seguridad más alto es la de 20m para la inclinación de 10°, como lo podemos ver en la ilustración 43 donde se observan los comportamientos de los abatimientos de los niveles freáticos correspondientes a las inclusiones de los drenes de 20 y 30 m se evidencia claramente que los

Ilustración 43 Comportamiento de los esfuerzos totales en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 10°



a) Abatimiento del nivel freático con Dren de 20m

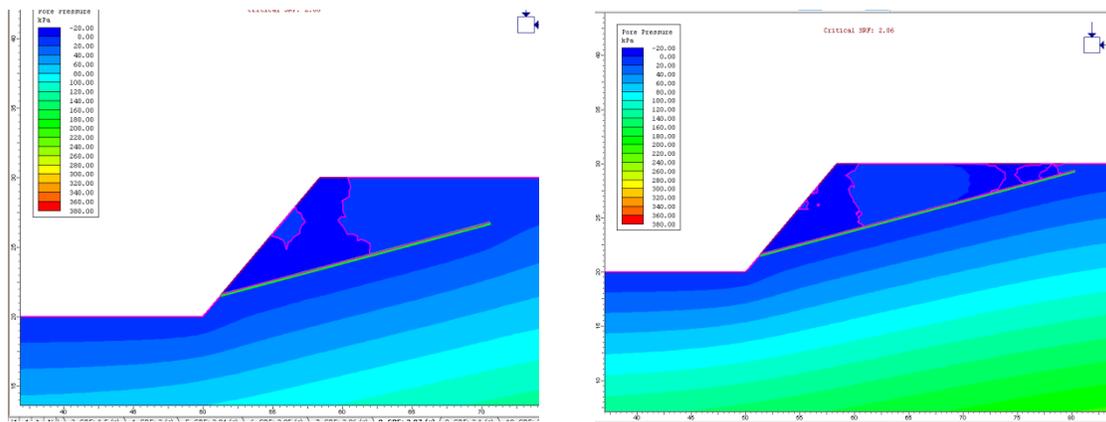
b) Abatimiento del nivel freático con dren de 30m

Fuente: Propia

Comportamientos de los niveles freáticos para las dos longitudes de los drenes tienen un mismo comportamiento por lo cual las presiones de poros en estos puntos son las mismas, concluyendo que para esta geometría de talud e inclinación de dren la inclinación y longitud óptima o con mayor factor de seguridad fue la de 2° y 20m de longitud de dren.

Para la inclinación de 15° vemos que el comportamiento tiene forma lineal y no se vuelve constante en ninguna de las longitudes a lo cual mostramos la ilustración 44 donde vemos cual es el comportamiento del nivel freático con la inclusión de los drenes evidenciamos que presento un abatimiento mayor a una longitud de dren de 30 m ya que al ser mayor la longitud e inclinación se generó mayor disminución de las presiones de poros logrando que el factor de seguridad fuera mayor que el de 20m el cual ha sido el valor de longitud efectiva en los comportamientos anterior mente descritos para la geometría de este talud.

Ilustración 44 Comportamiento del nivel freático en un talud de 40°-Estático para inclinaciones de 2°



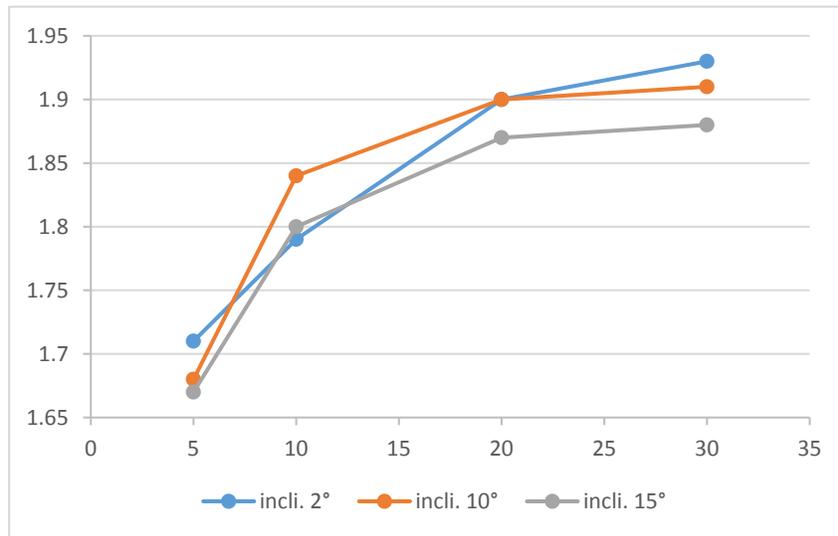
a) Abatimiento del nivel freático con Dren de 20m

b) Abatimiento del nivel freático con dren de 30m

Para las superficies de falla correspondientes a la geometría del talud de 50° de inclinación la longitud que presento mayores abatimientos fue la de 20m y la inclinación que mejor comportamiento genero fue la de 2°, encontrando que para 20m de dren con inclinación de 2° el factor de seguridad encontrado es de 2.16 con respecto al de sin dren el cual fue de 1.

7.2.2.2.3. Talud de 60° de inclinación

Gráfica 9 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 60°-Arcilla-Estática”



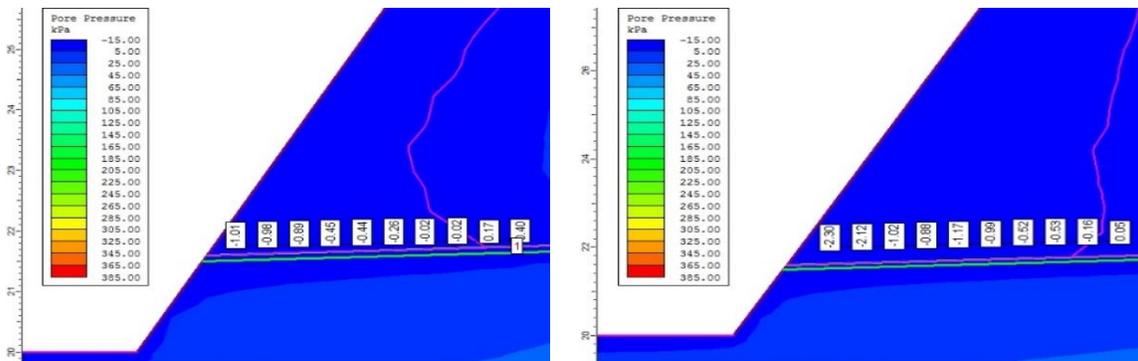
Fuente Propia

En la gráfica 9 se muestra el comportamiento del factor de seguridad a medida que se aumenta la profundidad del dren variando las inclinaciones.

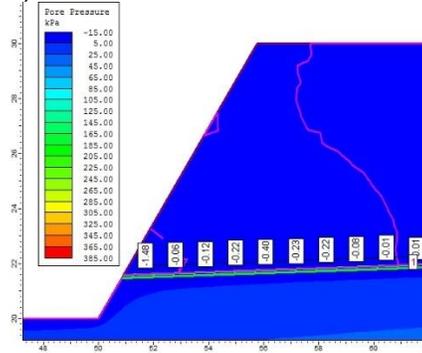
Los drenes con 2° de inclinación muestran un aumento lineal del factor de seguridad de los 5 a los 30 metros, para justificar este resultado se realiza un análisis de la presión de poros sobre la superficie del dren, para los 5 metros se obtiene una presión de poros de 0.17 kpa, para los 10 metros se obtiene un valor de 0.16 kpa, para los 20 metros un valor de 0.02 kpa y para los 30 metros u valor de 0.01 kpa.

En la ilustración 45 se muestra como es el comportamiento de la presión de poros en las diferentes superficies

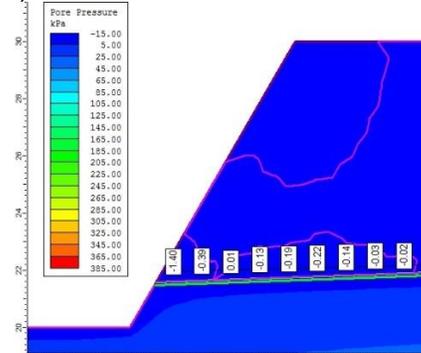
Ilustración 45 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 2° y diferentes profundidades



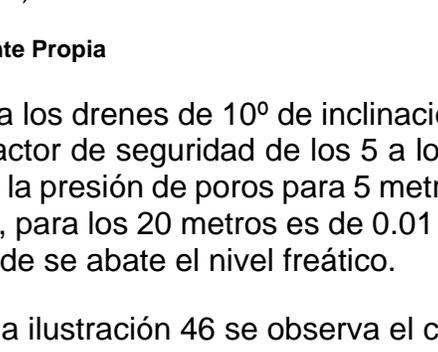
a) Dren de 5 metros con inclinación 2°



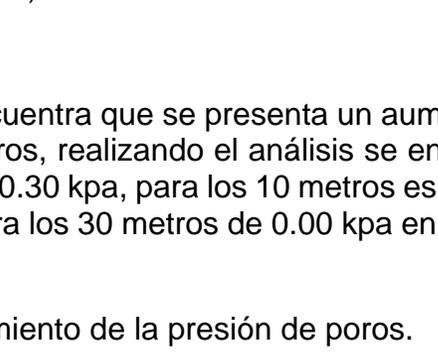
b) Dren de 10 metros con inclinación 2°



c) Dren de 20 metros con inclinación 2°



d) Dren de 30 metros con inclinación 2°

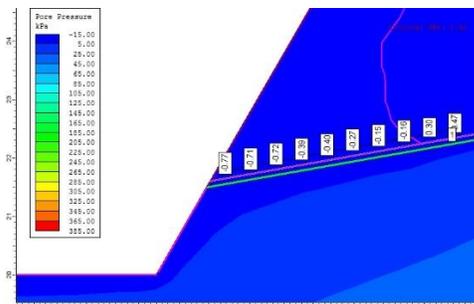


Fuente Propia

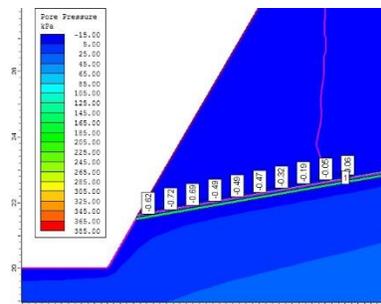
Para los drenes de 10° de inclinación se encuentra que se presenta un aumento en el factor de seguridad de los 5 a los 30 metros, realizando el análisis se encuentra que la presión de poros para 5 metros es de 0.30 kpa, para los 10 metros es de 0.06 kpa, para los 20 metros es de 0.01 kpa y para los 30 metros de 0.00 kpa en el lugar donde se abate el nivel freático.

En la ilustración 46 se observa el comportamiento de la presión de poros.

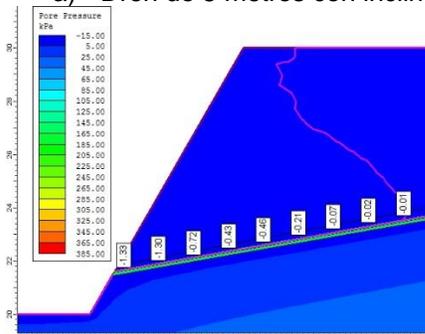
Ilustración 46 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 10° y diferentes profundidades



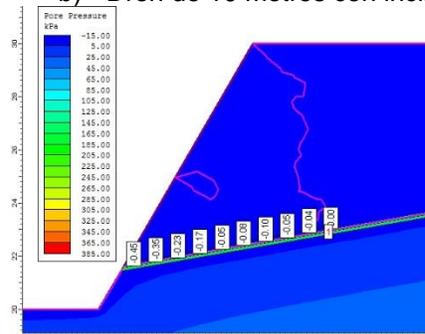
a) Dren de 5 metros con inclinación 10°



b) Dren de 10 metros con inclinación 10°



c) Dren de 20 metros con inclinación 10°



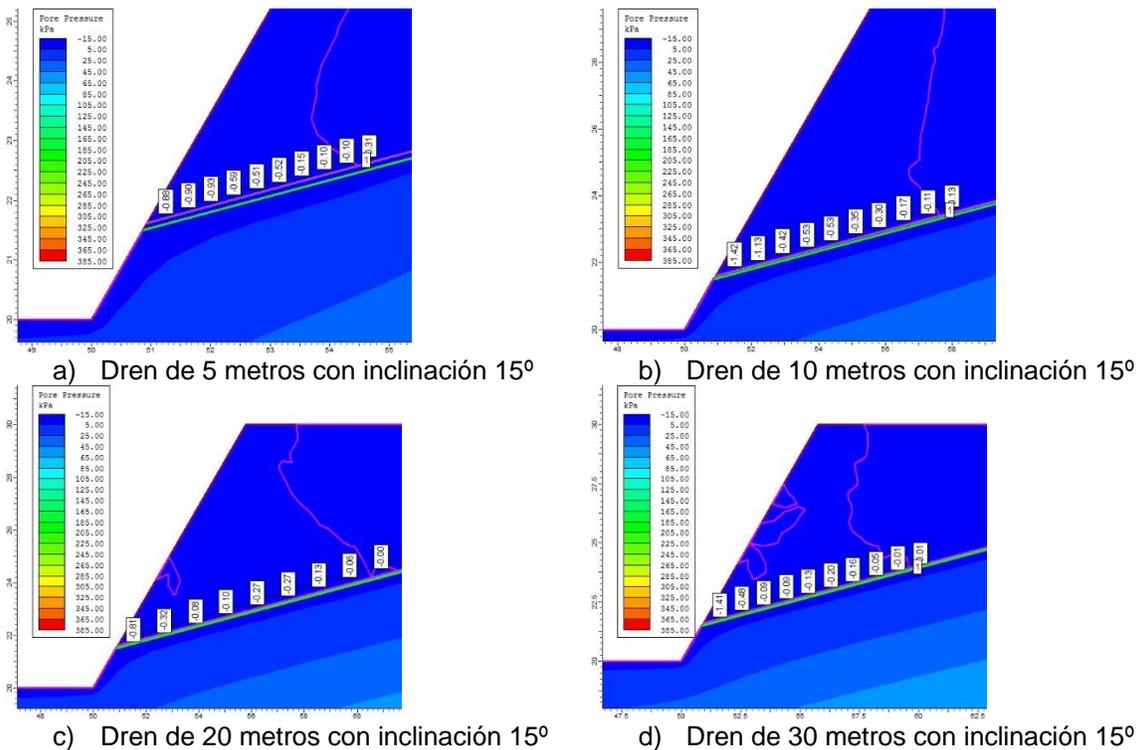
d) Dren de 30 metros con inclinación 10°

Fuente Propia

Para los drenes de 15° de inclinación se tiene que el comportamiento es un aumento del factor de seguridad desde los 5 metros hasta los 30 metros, revisando el comportamiento de la presión de poros se encuentra que para los 5 metros la presión de poros es de 0.31 kpa, para los 10 metros de 0.13 kpa, para los 20 metros de 0.01 kpa y para los 30 metros de 0.00 kpa, en la zona donde se realiza el abatimiento del nivel freático.

En la ilustración 47 se observa como es el comportamiento de la presión de poros en la zona donde sucede el abatimiento.

Ilustración 47 Comportamiento de la presión de poros en un talud 60°-Estático con inclinación de 15° y diferentes profundidades

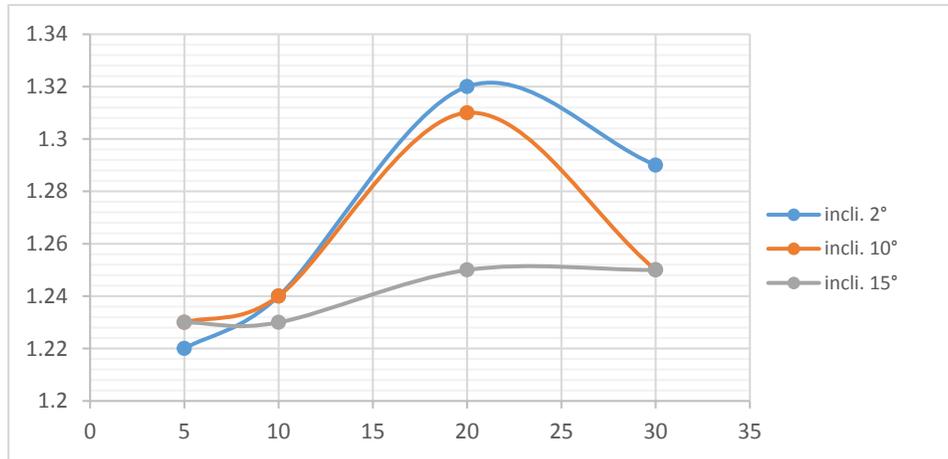


7.2.2.3. Limos pseudo estáticos.

Para determinar el comportamiento de los limos se realizaron un total de 13 modelos por inclinación de talud teniendo un total de 39 modelos, para facilitar el análisis de los datos se plantea realizar 1 gráfica, factor de seguridad vs longitud del dren que permite determinar cómo es el comportamiento a medida que se aumenta la inclusión del dren con un factor de seguridad variando la inclinación de los drenes, partiendo de un análisis por peso propio a un análisis pseudo estático.

7.2.2.2.1 Talud de 40° de inclinación análisis seudo estático

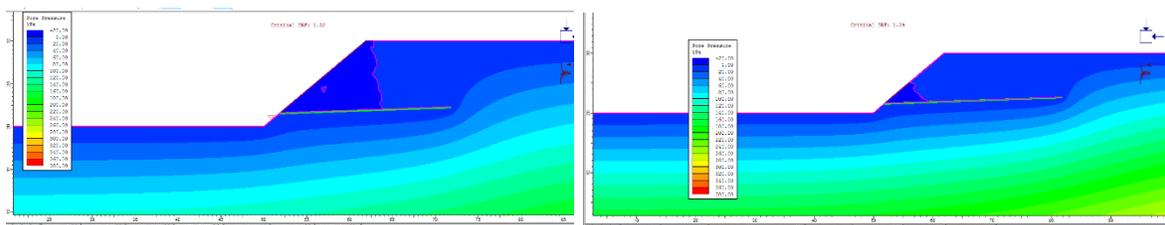
GRAFICA 1 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 40°-Limo- seudo Estática



Fuente: Propia

Como lo podemos ver en la Grafica 2 al hacer un análisis seudo estático para un talud de 40° de inclinación y altura de 10 m con inclusión de drenes de longitudes desde 5m a 30m, observamos que la longitud de mejor comportamiento es la de 20m de longitud con una inclinación de 2° ya que al tener una longitud de 30m de dren el factor de seguridad disminuye considerablemente. En la ilustración 48 observamos el comportamiento que presenta el nivel freático mediante un análisis seudo estático con el abatimiento del nivel freático.

Ilustración 48 Abatimiento del nivel freático para drenes de 2° de inclinación en un talud de “Limo 40°- Seudo estático”



a) Abatimiento del nivel freático con Dren de 20m seudo estático

con

b) Abatimiento del nivel freático con Dren de 30m seudo estático

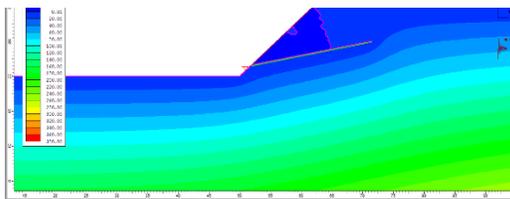
con

Fuente: Propia

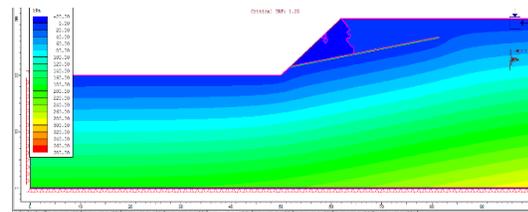
Donde podemos evidenciar que para una inclusión de dren de 20m de longitud el abatimiento es mayor, generando un factor de seguridad más alto que el que se generó con la profundidad de 30m al generarse menor presión de poros y aumentando el esfuerzo efectivo.

Para la inclinación de 10° del dren observamos que el comportamiento es igual al generado por la inclusión del dren con 2° con valores de factores de seguridad menores, pero con un comportamiento igual, observando que para una longitud de 20m se tiene el valor mayor de factor de seguridad y a partir de la longitud de 21m hasta los 30m de longitud del dren el valor disminuye considerablemente. Haciendo el análisis que se hizo para la inclinación de 2° se hace un análisis observando la ilustración 49 donde se analiza el comportamiento generado por el dren en un análisis seudo estático, para longitudes de dren de 20m y 30m.

Ilustración 49 Abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación en un talud de “Limo 40°- Seudo estático”



a) Abatimiento del nivel freático con drenes de 20 m



b) Abatimiento del nivel freático con drenes de 30 m

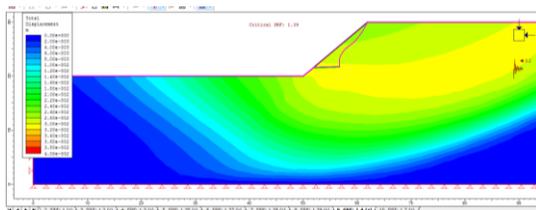
Fuente Propia

Donde encontramos que la diferencia que existe entre el dren de 20m y 30m es que la cantidad de agua desalojada por el dren de 20m es mayor a la de 30m encontrando así de esta manera que el factor de seguridad por ende para 20m es mayor porque se han mejorados los esfuerzos efectivos del tramo abatido al disminuir la presión de poros.

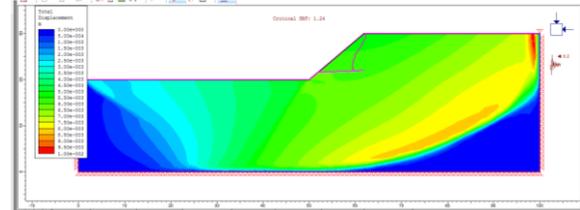
Para la inclinación de 15° la cual es la que menores factores de seguridad presenta para la geometría descrita, encontramos que los valores de factor de seguridad que se encuentran entre 20m y 30m de longitud del dren están comportándose linealmente, lo que nos indica que se tiene una longitud efectiva de 20m de dren, pero se hace innecesario hacer el análisis ya que como lo pudimos ver en los análisis anteriores el mejor comportamiento es para la inclinación de 2° y longitud de 20m de profundidad.

Como podemos observar en la ilustración 50, viendo las superficies de falla que afectan esta geometría de 40° de inclinación de talud y 10m de altura, podemos ver que para las superficies de falla en análisis seudo estatico son muy representativas y sobrepasan el rango de análisis para la altura que se tienen.

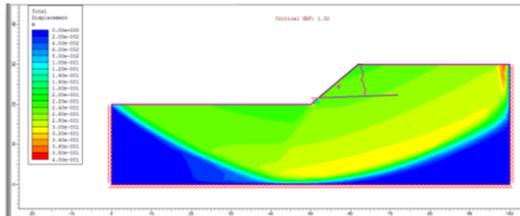
Ilustración 50 Superficie de falla para un talud de “Limo 40°-Seudo estático”



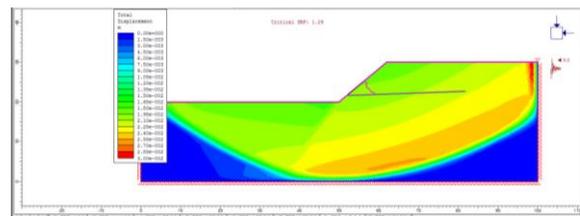
a) Dren de 5 metros con inclinación 2°



b) Dren de 10 metros con inclinación 2°



c) Dren de 20 metros con inclinación 2°

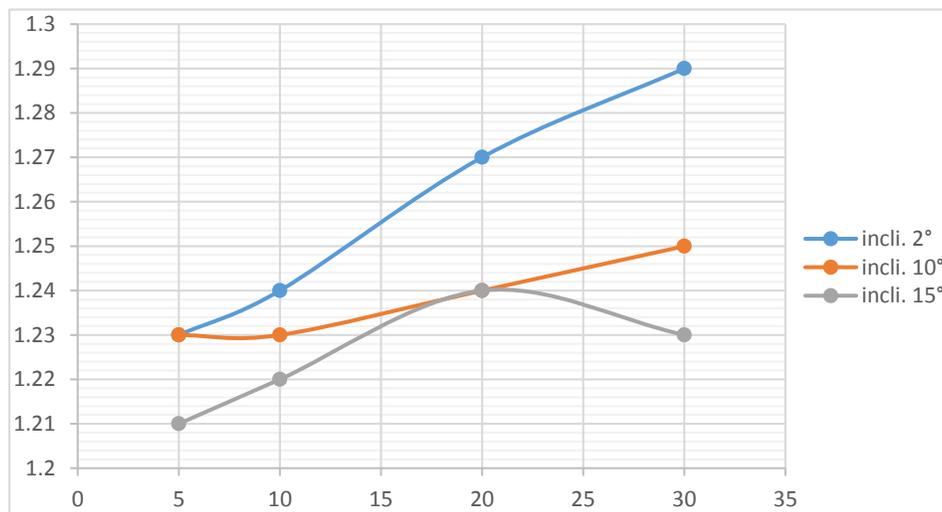


d) Dren de 30 metros con inclinación 2°

Fuente Propia

7.2.2.3.1. Talud de 50° de inclinación análisis seudo estático

Gráfica 10 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 50°-Limo- seudo Estática



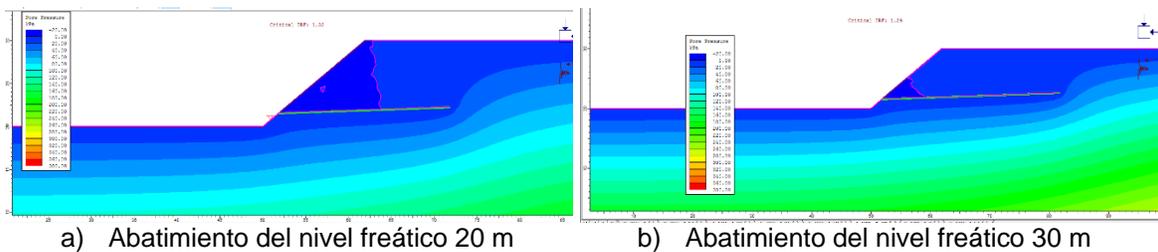
Fuente Propia

En la gráfica 10 se presenta el análisis seudo estático para un talud de 50° de inclinación y 10m de altura para un material de matriz limosa, a la cual se hacen

análisis de estabilidad por medio de las inclusiones de drenes de diferentes longitudes, los cuales tiene longitudes de 2° 10° y 15° respectivamente.

Para el análisis de los drenes con inclinaciones de 2° se encontró que el valor de factor de seguridad no tiene una forma constante ya que se presente un comportamiento de crecimiento lineal el cual aumenta desde los 5m hasta los 30m de longitud de cada dren, encontrando que para una longitud de 30m se dio el mayor factor de seguridad. Como lo podemos observar en las ilustraciones 38 donde se hace un análisis del comportamiento del nivel freático luego de haber sido corrido el modelo con drenes y sismo.

Ilustración 51 Abatimiento del nivel freático en taludes de 50°-seudo estático drenes de inclinación de 2°

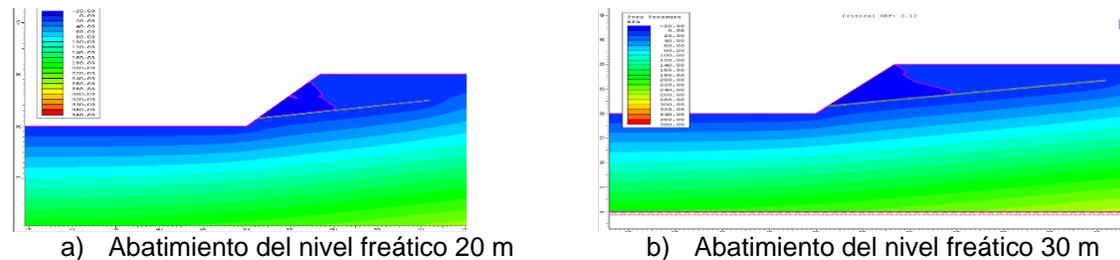


Fuente Propia

En cual encontramos que a medida que la longitud del dren va aumentando el valor del nivel freático va disminuyendo y el factor de seguridad va aumentando, donde en este análisis con la geometría de modelación no se puede estimar o encontrar una longitud efectiva ya que hasta una longitud de 30m el factor de seguridad sigue aumentando.

Para una inclinación de 10° se observa un aumento constante del factor de seguridad hasta llegar a una longitud de 30 m como lo fue en el de 2° donde observamos en los análisis elaborados que el dren logra hacer un abatimiento mayor con respecto a las otras inclinaciones, por no aumenta el factor de seguridad como fue con la inclinación de 2°.

Ilustración 52 Abatimiento del nivel freático en taludes de 50°-seudo estático drenes de inclinación de 10°



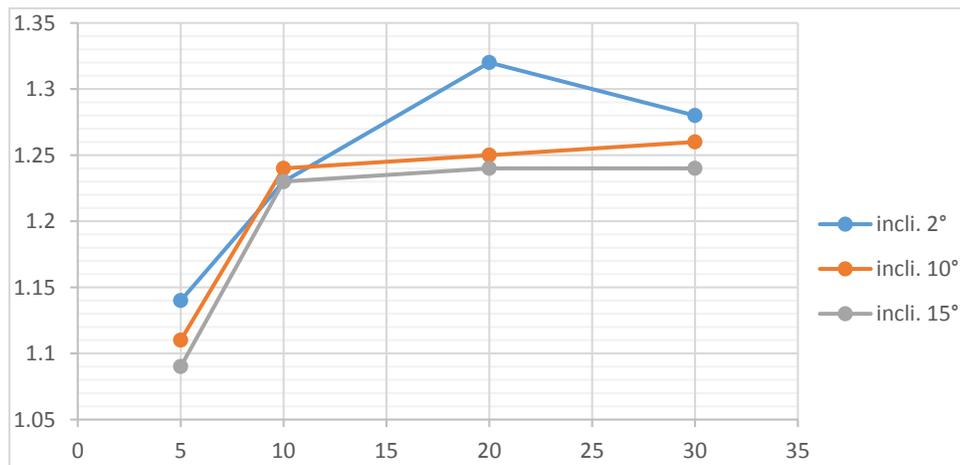
Fuente Propia

Como lo podemos ver en la ilustración 39 donde se tiene un dren de 30m de longitud se presenta mayor abatimiento del nivel freático lo que corrobora el valor obtenido en los factores de seguridad.

Para una inclinación del 15° se tiene que la longitud efectiva es de 20m, pero se hace innecesario hacer análisis ya que tenemos valores mayores de factores de seguridad para inclinaciones ya estimadas en modelaciones ya echas encontrando mejores comportamientos en los taludes.

7.2.2.3.2. Talud de 60° de inclinación análisis seudo estático

Gráfica 11 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 60°-Limo- seudo



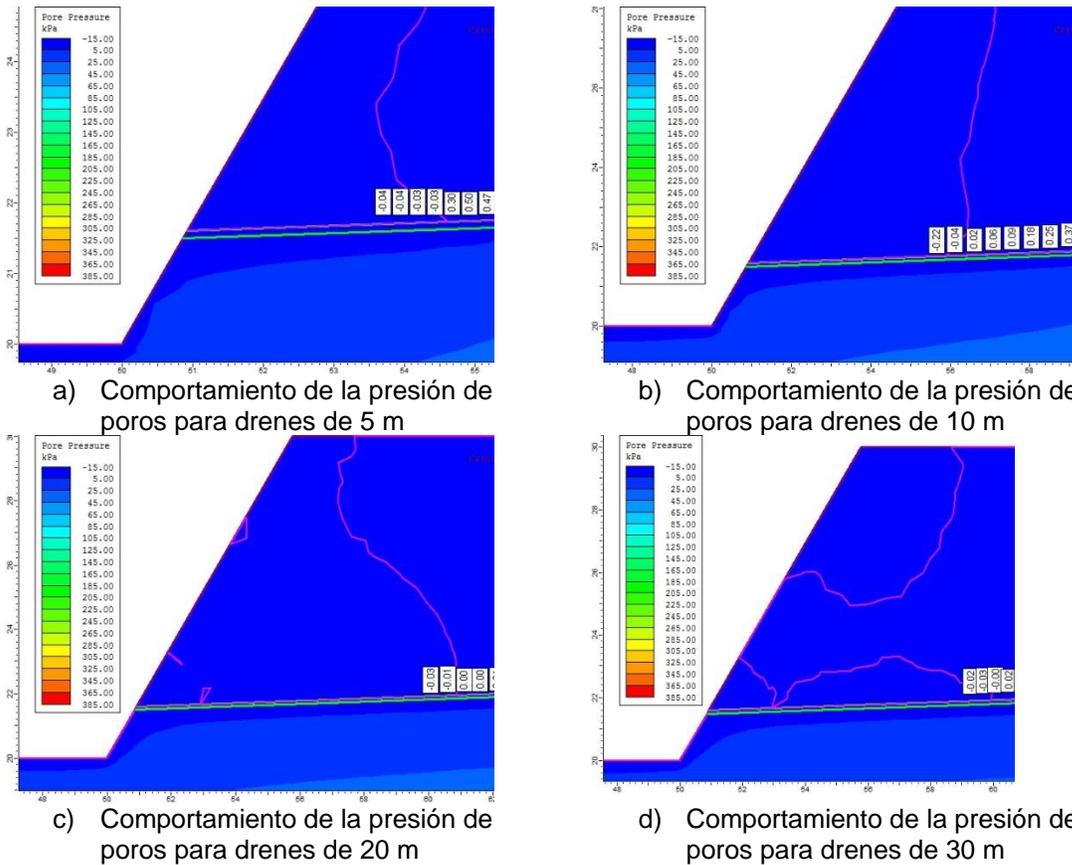
Fuente Propia

En la gráfica 11 observamos el comportamiento que tiene un talud al ser analizado seudo estáticamente con la colocación de drenes horizontales con diferentes inclinaciones y longitudes, donde se observa que el mayor abatimiento generado fue para un dren de 2° de inclinación y una longitud de 20m.

Para la inclinación de 2° el factor de seguridad tiene un comportamiento lineal de 5m a 20m, esto se debe a la disminución de la presión de poros donde se abate el nivel freático, realizando el análisis de presión de poros se encuentra que para 5 metros la presión de poros es de 0.30 kpa, para los 10 metros la presión de poros es de 0.02 kpa, para los 20 metros la presión de poros es de 0.00 kpa y para los 30 metros donde se genera una disminución del factor de seguridad la presión de poros es de 0.02 kpa, estas medidas se tomaron justamente donde se realiza el abatimiento del nivel freático.

En la ilustración 53 se observa como es el comportamiento de la presión de poros con la diferente inclusión de los drenes.

Ilustración 53 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° pseudo estático de 2° de inclinación

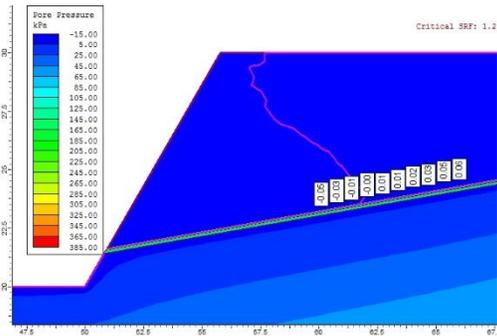


Fuente Propia

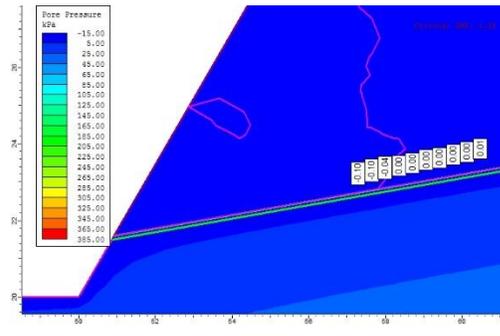
Para los drenes de 10^o se tiene que hay un aumenta del factor de seguridad de los 5 a los 10 metros y de los 10 a los 30 metros el factor de seguridad se mantiene constante, realizando el análisis de la presión de poros se encuentra que para los 5 metros la presión de poros es de 0.34 kpa, para los 10 metros la presión de poros es de 0.06 kpa, para los 20 metros la presión de poros es de 0.02 pa y para los 30 metros la presión de poros es de 0.01 kpa.

En la ilustración 54 se muestra el comportamiento de la presión de poros para los drenes de 20 y 30 metros.

Ilustración 54 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° pseudo estático de 10° de inclinación



a) Comportamiento de la presión de poros para drenes de 20 m



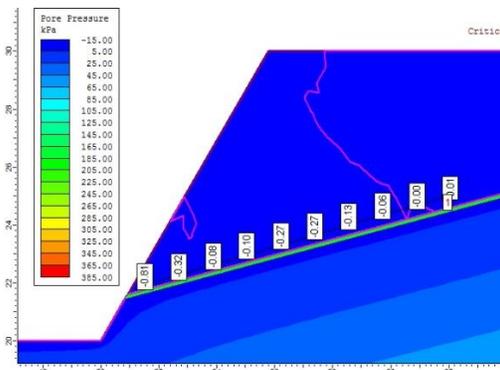
b) Comportamiento de la presión de poros para drenes de 30 m

Fuente Propia

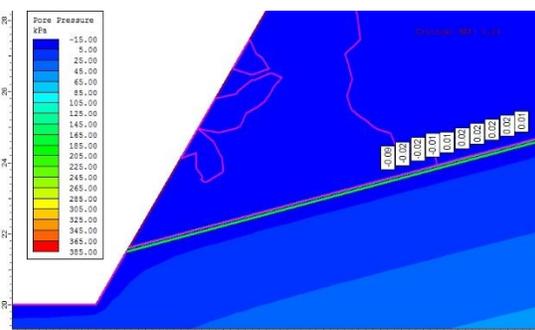
Para los drenes de 15° se tiene que hay un aumenta del factor de seguridad de los 5 a los 10 metros y de los 10 a los 30 metros el factor de seguridad se mantiene constante, realizando el análisis de la presión de poros se encuentra que para los 5 metros la presión de poros es de 0.30 kpa, para los 10 metros la presión de poros es de 0.09 kpa, para los 20 metros la presión de poros es de 0.01 pa y para los 30 metros la presión de poros es de 0.01 kpa.

En la ilustración 55 se muestra el comportamiento de la presión de poros para los drenes de 20 y 30 metros.

Ilustración 55 Comportamiento de la presión de poros en un talud de 60° pseudo estático de 15° de inclinación



a) Comportamiento de la presión de poros para drenes de 20 m



b) Comportamiento de la presión de poros para drenes de 30 m

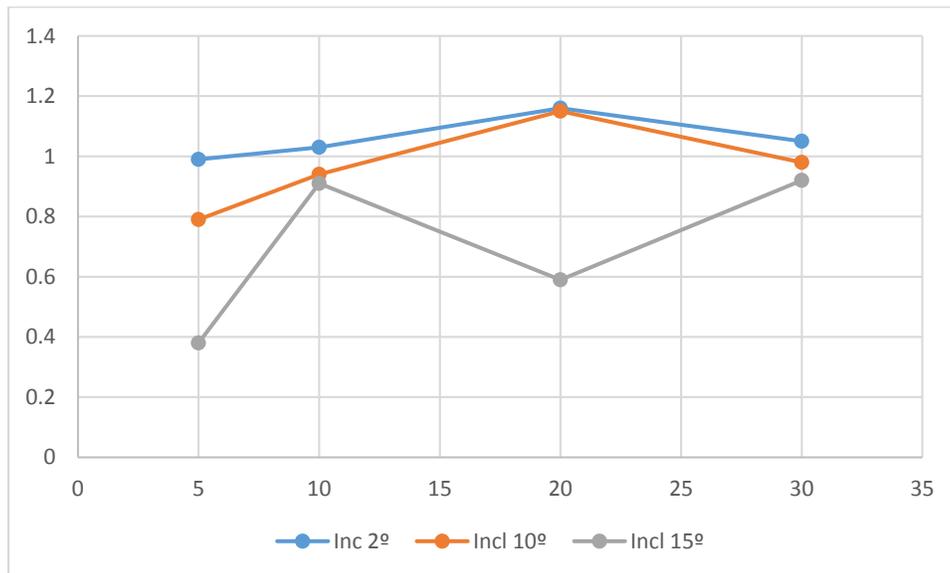
Fuente Propia

7.2.2.4. Arenas estáticas

Las modelaciones de las arenas solo se realizaron con los taludes de inclinación de 40° porque en los de 50° y 60° el talud falla por su ángulo en reposo, no se realizaron los modelos de las arenas seudo estáticas debido a que los valores dan por debajo de 1.00

7.2.2.4.1. Taludes de 40° de inclinación

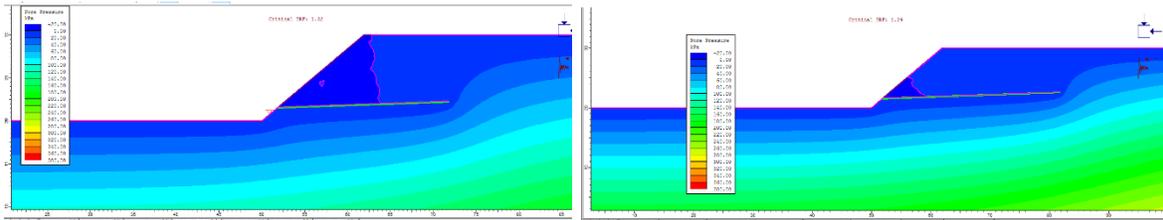
Gráfica 12 Factor de seguridad vs longitud del dren “Talud de 40°-Arena-Estática”



Fuente: Propia

Como lo podemos ver en la Grafica 12 al hacer un análisis estático para un talud de 40° de inclinación y altura de 10 m con inclusión de drenes de longitudes desde 5m a 30m, observamos que la longitud de mejor comportamiento es la de 20m de longitud con una inclinación de 2° ya que al tener una longitud de 30m de dren el factor de seguridad disminuye considerablemente. En la ilustración 56 observamos el comportamiento que presenta el nivel freático mediante un análisis seudo estático con el abatimiento del nivel freático.

Ilustración 56 Abatimiento del nivel freático para drenes de 2° de inclinación en un talud de “Arena 40°-estático”



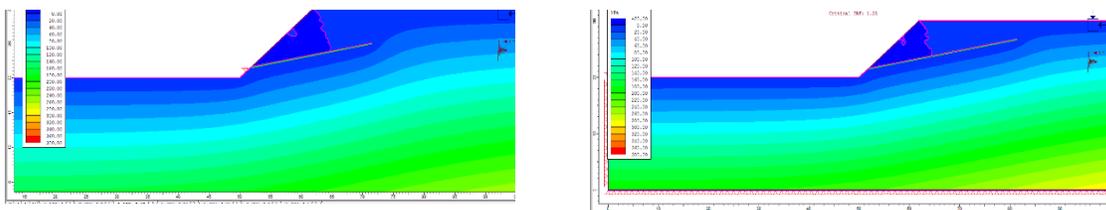
c) Abatimiento del nivel freático con Dren de 20m seudo estático con d) Abatimiento del nivel freático con Dren de 30m seudo estático

Fuente: Propia

Donde podemos evidenciar que para una inclusión de dren de 20m de longitud el abatimiento es mayor, generando un factor de seguridad más alto que el que se generó con la profundidad de 30m al generarse menor presión de poros y aumentando el esfuerzo efectivo.

Para la inclinación de 10° del dren observamos que el comportamiento es igual al generado por la inclusión del dren con 2° con valores de factores de seguridad menores, pero con un comportamiento igual, observando que para una longitud de 20m se tiene el valor mayor de factor de seguridad y a partir de la longitud de 21m hasta los 30m de longitud del dren el valor disminuye considerablemente. Haciendo el análisis que se hizo para la inclinación de 2° se hace un análisis observando la ilustración 57 donde se analiza el comportamiento generado por el dren en un análisis estático, para longitudes de dren de 20m y 30m.

Ilustración 57 Abatimiento del nivel freático para drenes de 10° de inclinación en un talud de “Arena 40°-Seudo estático”



c) Abatimiento del nivel freático con drenes de 20 m d) Abatimiento del nivel freático con drenes de 30 m

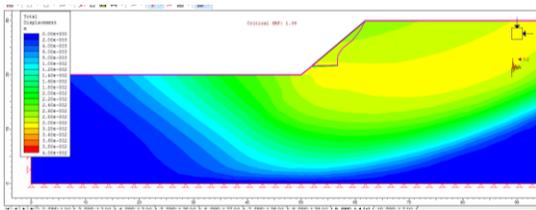
Fuente Propia

Donde encontramos que la diferencia que existe entre el dren de 20m y 30m es que la cantidad de agua desalojada por el dren de 20m es mayor a la de 30m encontrando así de esta manera que el factor de seguridad por ende para 20m es mayor porque se han mejorados los esfuerzos efectivos del tramo abatido al disminuir la presión de poros.

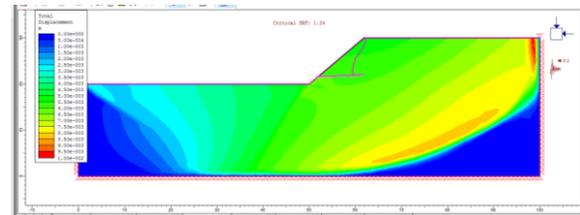
Para la inclinación de 15° la cual es la que menores factores de seguridad presenta para la geometría descrita, encontramos que los valores de factor de seguridad que se encuentran entre 20m y 30m de longitud del dren están comportándose linealmente, lo que nos indica que se tiene una longitud efectiva de 20m de dren, pero se hace innecesario hacer el análisis ya que como lo pudimos ver en los análisis anteriores el mejor comportamiento es para la inclinación de 2° y longitud de 20m de profundidad.

Como podemos observar en la ilustración 58, viendo las superficies de falla que afectan esta geometría de 40° de inclinación de talud y 10m de altura, podemos ver que para las superficies de falla en análisis seudo estatico son muy representativas y sobrepasan el rango de análisis para la altura que se tienen.

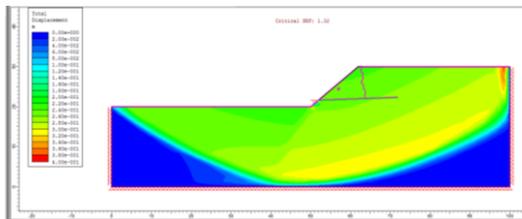
Ilustración 58 Superficie de falla para un talud de “Arena 40°- estática”



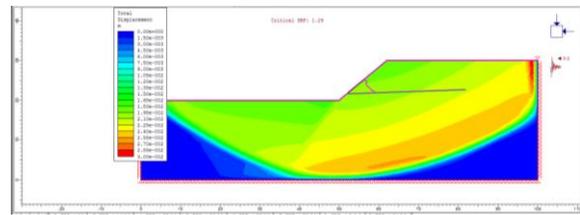
e) Dren de 5 metros con inclinación 2°



f) Dren de 10 metros con inclinación 2°



g) Dren de 20 metros con inclinación 2°



h) Dren de 30 metros con inclinación 2°

Fuente Propia

7.3. COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS POR ELEMENTOS FINITOS VERSUS EQUILIBRIO LIMITE.

El trabajo presentado por Aportan Andrés Mateo Olgúin y Andrés Leonardo Leudo¹⁹ se obtuvieron las siguientes conclusiones.

“Se analizaron los resultados producto de las modelaciones realizadas de lo cual se concluyó que, en cuanto al abatimiento del nivel freático, a mayor longitud de dren el abatimiento es mayor, obteniendo valores dependiendo del lugar de medición, mayores a los 10 metros medidos desde la posición inicial (sin drenes) del nivel freático”²⁰

En cuanto a la conclusión anterior se encontró que no hay un abatimiento del nivel freático que se pueda medir debido a que en cada análisis realizado varia el abatimiento del nivel freático y en algunos casos lo que sucede es que el nivel freático ingrese en la superficie de falla.

Otra de las conclusiones presentadas es la siguiente.

“Para la mayoría de los taludes modelados en cualquier de los tres (3) materiales utilizados, el factor de seguridad presenta un aumento con relación al factor de seguridad inicial, es decir el obtenido en las modelaciones sin drenes, de valores cercanos al 50% en los aumentos máximos, aunque también se debe aclarar que en algunos casos el dren genero un efecto contrario al esperado ya que el nivel freático supero el nivel inicial en cerca de 1 metro”²¹

Para los taludes modelados con material de arcilla estáticos de 40° de inclinación se genera un aumento del 27% respecto al factor de seguridad inicial, para los taludes de 50° el aumento es del 6% y para el talud de 60° el aumento es del 2%. Las arcillas pseudoestáticas presentan los siguientes aumentos con respecto al factor de seguridad inicial, para un talud de 40° el aumento es de 7%, para el de 50° el aumento de seguridad es de 8% y para los de 60° el aumento es de 12%.

Los taludes modelados el material de limo estático se encuentra que para un talud de 40° el aumento es del 25%, para el de 50° el aumento es de 13% y para el talud de 60° el aumento es de 10%. Para los taludes con material limo-pseudoestáticos se generan los siguientes aumentos para un talud de 40° el aumento es de 76%, para los de 50° el aumento es de 4% y para los de 60° el aumento es del 5%.

Con la arena – estática se generó un aumento para los de 40° del 38%, para los taludes de 50° el aumento fue de 27% y para los taludes de 60° el aumento es de

¹⁹ OLGUIN, Andres. LEUDO, Leonardo. TESIS, influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes. En: Universidad la Gran Colombia, Bogota Colombia, 2015.

²⁰ *Ibíd.*, p 81

²¹ *Ibíd.*, p 81

14%. Para las arenas se realizaron los modelos, pero todos los valores obtenidos fueron menores a 1 por lo que no se tienen en cuenta ya que no se logra estabilizar el talud.

“Se generaron una serie de ábacos con base en las modelaciones realizadas, de las cuales se concluyó que los primeros ábacos los cuales fueron realizados en cuanto a la longitud del dren comparado con el factor de seguridad, el comportamiento del factor de seguridad es directamente proporcional al aumento de la longitud del dren y a partir de esta comparación se pueden establecer longitudes efectivas de uso de dren para la estabilización de un talud.”²²

Realizando el análisis del ábaco factor de seguridad versus longitud del dren se encuentra que efectivamente se puede determinar una longitud de dren efectiva pero es necesario realizar un análisis de cómo se comporta el nivel freático en la superficie de falla, en cuanto a la afirmación de que la longitud del dren es directamente proporcional al factor de seguridad se difiere, debido a que en los análisis realizados se encontró que en algunos casos lo que se logra con el aumento de la longitud del dren es reducir el factor de seguridad debido al aumento de la presión de poros en la zona de abatimiento del nivel freático.

En cuanto al análisis para determinar una inclinación efectiva que permitiera generar unos ábacos de reconocimiento del factor de seguridad, se encuentra que no hay una inclinación efectiva debido a que para los taludes de 40° y 50° la inclinación óptima es de 2°, mientras que en los taludes de 60° de inclinación los mejores resultados están dados por una inclinación de 10° por lo que no se pueden generar unos ábacos que determinan el comportamiento según la inclinación del talud.

²² *Ibíd.*, p 81

8. CONCLUSIONES

Para los diferentes modelos analizados se muestra un aumento considerable del factor de seguridad cuando se realiza la inclusión del dren horizontal respecto a al factor de seguridad calculado inicialmente, mostrando que a partir de cierta longitud no es recomendable instalar el dren pues se va a generar un aumento en la presión de poros disminuyendo el factor de seguridad en algunos casos.

Los parámetros geotécnicos a utilizar en los modelos (Arcillas, Limos y Arenas) se definieron a partir de la información recopilada en la primera fase del presente trabajo de grado, tomados del estudio presentado por INGEOMINAS en compañía del DAGMA “Estudio de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali”. Los parámetros geométricos de los taludes y de la inclusión de los drenes se tomaron del proyecto “influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes”.

Realizando el análisis del ábaco factor de seguridad versus longitud del dren se encuentra que efectivamente se puede determinar una longitud de dren efectiva pero es necesario realizar una análisis de cómo se comporta el nivel freático en la superficie de falla con el fin de determinar si en el análisis se esta teniendo en cuenta el comportamiento en la superficie de falla, en cuanto a la afirmación de que la longitud del dren es directamente proporcional al factor de seguridad se difiere, debido a que en los análisis realizados se encontró que en algunos casos lo que se logra con el aumento de la longitud del dren es reducir el factor de seguridad debido al aumento de la presión de poros en la zona de abatimiento del nivel freático.

En cuanto al análisis para determinar una inclinación efectiva que permitiera generar uno ábacos de reconocimiento del factor de seguridad, se encuentra que no hay una inclinación efectiva debido a que para los taludes de 40° y 50° la inclinación optima es de 2° , mientras que en los taludes de 60° de inclinación los mejores resultados están dados por una inclinación de 10° por lo que no se pueden generar unos ábacos que determinen el comportamiento de factor de seguridad según la inclinación del talud.

Realizando la comparación de los resultados obtenidos con el trabajo de grado “influencia del abatimiento del nivel freático en el cálculo del factor de seguridad para la estabilidad de taludes” se encuentra que los factores de seguridad aumentan solo un 27% respecto al factor de seguridad inicial. La longitud optima de instalación según los resultados obtenidos es de 10 a 20 metros, a los 30 metros lo que se genera es una disminución del factor de seguridad. La inclinación optima no puede ser la de 0° grados debido a que no funcionaría el dren ya que trabaja por gravedad por lo que según especificaciones constructivas el mínimo ángulo de instalación es de 2° y para los modelos de 40° y 50° de inclinación funciona muy bien en cambio para los taludes de 60° a inclinación de dren que genera los mejores resultados es la de 10° .

Se hicieron las modelaciones mediante 2 Softwar de elementos finitos uno fue Plaxis y el otro que fue en phase8, para poder verificar de alguna manera los datos que nos estaban presentando. Para el programa Plaxis nos fue necesario resolver los flujos mediante Slide, y trasladar las coordenadas de los niveles freáticos a la plataforma del Plaxis para poder hacer los análisis pertinentes por ende se nos dio la necesidad de corroborar los datos mediante el programa Phase8 donde sí se pudieron analizar los flujos ya que su plataforma si se tenían los complementos necesarios. Analizando los datos encontrados por los dos programas, observamos que los valores que se obtuvieron en el Plaxis son mayores que los obtenidos en Phase8, pero los comportamientos en cuanto a las formas y geometrías que tomaron las curvas al momento de hacer las gráficas son los mismos, esto lo vemos relacionado a que al no poder resolver los flujos directamente desde la plataforma del trabajo del Plaxis, el programa no asumió como deberían ser las disminuciones o aumentos de las presiones de poros haciendo así que los factores de seguridad sean mayores a los encontrados por Phase8 el cual si permitió hacer el análisis del flujo

9. RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones se exponen las diversas limitaciones existentes en cuanto a parámetros geométricos de los drenes y taludes, parámetros geo mecánicos utilizados en las modelaciones y los métodos empleados para observar el comportamiento del flujo en el suelo y el cálculo del factor de seguridad.

9.1. RECOMENDACIONES RESPECTO A PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS TALUDES.

Para los parámetros geométricos de los taludes modelados, se especifica que el modelo que sujeto a correcciones realizadas en futuras investigaciones, ya que se tiene claro que existen taludes de menor y mayor altura que los que se trabajaron en el trabajo de grado que se presenta, también es importante decir y conocer que los taludes luego de inclinaciones mayores a 60° no presentan fallas de profundidad lo cual dificulta tener una clara evidencia de la influencia de los drenes.

9.2. RECOMENDACIONES RESPECTO A PARÁMETROS GEO MECÁNICOS UTILIZADOS

Los parámetros geo mecánicos utilizados en las modelaciones realizadas para el trabajo de grado, fueron tomados de diversos estudios realizados en la ciudad de Santiago de Cali, por lo cual se recomienda para futuras investigaciones que se pueden realizar con base en el presente trabajo de grado, lograr emplear parámetros geo mecánicos y de permeabilidad diferentes a los aquí utilizados y lejos del lugar mencionado (Santiago de Cali) ya que se presentaron problemas de una inestabilidad muy amplia con las arenas, al no tener factores de seguridad en el proceso de inclusión del sismos menores a la unidad, lo que nos da a entender que la falla es inmediata y que para este tipo de suelo no es adecuado hacer un drenaje porque genera una falla inminente.

9.3. RECOMENDACIONES RESPECTO AL ANÁLISIS DEL FLUJO

Para próximas investigaciones se recomienda realizar un estudio del comportamiento del nivel freático en campo con el fin de que el modelo sea lo más similar a lo que sucede en sitio.

10. BIBLIOGRAFIA

DAS, Braja M. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. International Thomson editores S.A. 2001. 585. P.

HUACHO RAMOS, Miguel. Factores que influyen en la estabilidad de taludes. [Citado 29, Abril, 2015]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/190822254/Factores-Que-Influyen-en-La-Estabilidad-de-Taludes#scribd>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, ICONTEC .Servicios [En línea]. <http://www.icontec.org/index.php/es/inicio/comites-tecnicos-de-normalizacion> . [Consultado el 07 de Agosto de 2014].

GONZALES Carlos, DUSSAN Edgar, Modelación del flujo en taludes para drenes horizontales, Bogotá, 2011, 5p, Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Civil), Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de ingeniería 102. p.

GONZALES DE VALLEJO, Luis, FERRER Mercedes, ORTUÑO Luis, OTEO Carlos, Ingeniería Geológica, Madrid, España, 2004, 715.p.

MINISTERIO DE TRANSPORTE DE COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de drenaje para carreteras, Bogotá D.C., Colombia, Consorcio ALFA, 2009,

NTC 32 – 2002. Tejido de alambre y tamices para propósitos de ensayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. P. 4.

SUAREZ, Jaime. Deslizamientos. Análisis Geotécnico Vol. 1. Bucaramanga. U.I.S. Escuela de filosofía, 2009. 588. p.

SUAREZ, J. (2009). Deslizamientos Técnicas de Remediación. Capítulo 12. Bucaramanga. U.I.S. Escuela de filosofía, 2009. 413 p.