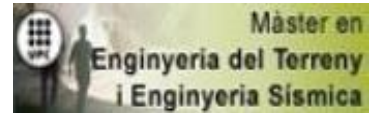


TREBALL FINAL DE MÁSTER



TÍTOL

**ESTABILIZACIÓN DE DESLIZAMIENTOS DE TIERRAS
MEDIANTE PILOTES**

AUTOR

YOHANNY MATEO MARTINEZ

TUTOR

ALBERTO LEDESMA VILLALBA

ESPECIALITAT

INGENIERÍA GEOTÉCNICA

DATA

JUNIO 2016



Dept. d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica
E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



Agradecimientos

Primeramente, quiero darle la gracias al señor todo poderoso, por su amor incondicional hacia mí y por darme fuerza, valor, aliento y esperanza cada vez que la necesito. ¡Padre amado sin ti esto no sería posible!

A mis padres Mariana Martínez y Manuel A. Mateo, por apoyarme siempre, estar pendientes de mí en cada instante y dándome su amor incondicional. A mis hermanos Wilin y Jonathan, gracias mil por apoyarme, cuidarme y estar ahí, aunque sea a distancia, conmigo en este largo camino. Los quiero.

Quiero darle las gracias a mi tutor Alberto Ledesma a quien agradezco infinitamente por estar siempre dispuesto a ayudarme, a contestar mis preguntas, por su apoyo y disponibilidad de tiempo. Al gobierno Dominicano, por implementar el sistema de becas internacionales para que la educación se siga desarrollándose y permitir que yo siga creciendo en el ámbito profesional.

Gracias a mis tíos/as, primos/as y a mi abuela, por sus apoyos, comprensión y cariño que siempre me han dado. Gracias por sus palabras de alientos, motivaciones y afectos. Mil gracias por ayudarme de mil maneras, para que yo pueda alcanzar esta meta. En especial a la tía Mireya Rosario y Josep March por recibirme aquí en Barcelona y estar pendiente de mí siempre.

A TODOS/AS MIS AMIGOS/AS, COMPAÑEROS Y/OS COMPAÑERAS, COLEGAS, CONOCIDOS/AS Y AYEGADOS:

Gracias por aceptarme tal y como soy, por ayudarme, darme aliento, guiarme y apoyarme en este camino. Mucho de ustedes fueron y son una motivación a seguir a delante. GRACIAS.

Resumen

Autor: Yohanny Mateo Martínez

Tutor: Alberto Ledesma Villalba

Palabras clave: Estabilidad de Talud, No drenada, Drenado, Factor de Seguridad, Pantalla de Pilotes, Mohr- Coulomb, Elementos Finitos, Equilibrio Limite, Posición Óptima.

La implementación de elementos estructurales en la estabilización de deslizamientos o como medida de prevención en taludes es una metodología muy antigua, aplicada con éxito y que ha demostrado ser una técnica que proporciona una buena solución en muchos casos. El uso de pilotes de hormigón como elemento estructural estabilizador es bien conocido.

El análisis geotécnico de los taludes con pilotes se puede hacer hoy día mediante programas de cálculo. Sin embargo, a pesar de que estas herramientas de cálculo están hoy día bien establecidas, todavía hay bastante incertidumbre y diferentes alternativas en el diseño de pilotes como elementos de contención en taludes.

En este trabajo se estudia el problema de la estabilización de un talud mediante pilotes, tanto en casos no drenados como en casos drenados, usando para ello dos herramientas: GEOSTUDIO, un programa basado en el equilibrio límite y PLAXIS, un código basado en elementos finitos. El objetivo es comparar un mismo caso analizado por ambos métodos, tanto en lo que se refiere al factor de seguridad como lo referente al diseño del pilote. En todos los casos se usa el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb, para que los cálculos sean más comparables.

Se ha estudiado también cuál debe ser la posición óptima de la pantalla de pilotes en el talud, es decir, dónde se debe colocar para obtener el máximo incremento del factor de seguridad. La posición óptima depende de muchas variables y es difícil establecer un patrón fijo. En general es difícil comparar los resultados de los dos métodos de cálculo, ya que en equilibrio límite el efecto del pilote es únicamente el de una fuerza resistente adicional en la superficie de rotura, mientras que en el cálculo por elementos finitos intervienen más variables: momento flector máximo y esfuerzo axil máximo. En el trabajo se presentan varias comparaciones y se contrastan con algunos resultados publicados en la literatura, extrayendo algunos criterios generales que pueden ser útiles en el diseño de estos sistemas de contención.

Abstract

Author: Yohanny Mateo Martínez

Director: Alberto Ledesma Villalba

Keywords: Slope stability, undrained, drained, Factor of Safety, pile wall, Mohr-Coulomb, Finite Elements, Limit Equilibrium, Optimal location.

Implementing structural elements to stabilize landslides or as a preventive measure in slopes, constitutes a classical approach, successfully used, providing a good solution technique in many cases. Using reinforced concrete piles as structural elements is a well-known technique.

The geotechnical analysis of slopes with piles can be carried out nowadays by means of computer programs. However, despite this calculation tools are well defined, there is still some uncertainty and several alternative designs for pile walls in the context of stabilizing slopes are available.

In this work the problem of stabilizing a slope by means of pile walls is studied, considering undrained and drained conditions. Two computational tools have been used: GEOSTUDIO, a program based on limit equilibrium, and PLAXIS, a finite element code. The objective is to compare a particular case analyzed by using both methods, in terms of factor of safety and the pile design itself. Mohr-Coulomb constitutive law has been used in all cases, in order to compare the calculations.

The optimal location of the pile wall has been analyzed as well, that is, where should be installed the pile wall to get the maximum increment of the safety factor. The optimal location depends on many variables and it is difficult to define a fixed pattern. Generally, it is difficult to compare both methods of analyses, because in limit equilibrium the effect of the pile is just an additional resistant force acting on the failure surface, whereas in the finite element calculation more variables are involved: maximum bending moment and maximum axial force. In this work several comparisons are carried out and a contrast with published results is also performed, so some general criteria are proposed that can be useful when designing this type of solutions against slope instabilities.

INDICE

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
CAPITULO 1	8
DESlizAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES	8
1.1 <i>Introducción</i>	8
1.1.1 <i>Objetivo principal</i>	9
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	9
1.2 <i>Nomenclatura de Talud o ladera</i>	9
1.3 <i>Tipos de deslizamientos de taludes</i>	10
1.3.1 <i>Desprendimientos o caídas</i>	10
1.3.2 <i>Vuelco</i>	10
1.3.3 <i>Deslizamientos</i>	11
1.3.4 <i>Expansión lateral</i>	11
1.3.5 <i>Flujos</i>	11
1.3.6 <i>Deformaciones sin rotura manifiesta o previas a la rotura</i>	12
1.3.7 <i>Movimientos Complejos</i>	12
1.4 <i>Factores que intervienen en la inestabilidad de taludes</i>	13
1.4.1 <i>Factores constantes</i>	13
1.4.2 <i>Factores variables</i>	14
1.5 <i>Técnicas de mitigación de deslizamientos</i>	15
1.6 <i>Pilotes</i>	17
CAPITULO 2	20
MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (PROGRAMA GEOSTUDIO)	20
2.1 <i>Factor de Seguridad</i>	21
2.2 <i>Metodología de análisis</i>	22
2.2.1 <i>caso del talud infinito</i>	22
2.2.2 <i>Método ordinario de dovelas o rebanadas</i>	23
2.2.3 <i>Análisis de bloque deslizante</i>	24
2.2.4 <i>Método simplificado de Bishop</i>	24
2.2.5 <i>Método simplificado de Janbú</i>	26
2.2.6 <i>Método riguroso de Janbú</i>	26
2.2.7 <i>Método de Spencer</i>	26
2.2.8 <i>Método de Morgenstern-Price</i>	27
2.3 PROGRAMA GEOSTUDIO	28

CAPITULO 3	31
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA PLAXIS)	31
3.1 Programa PLAXIS.....	32
3.2 INPUT (Entrada)	32
3.3 Modelos constitutivos del programa.....	33
3.4 TIPOS DE ANALISIS.....	35
3.5 CALCULATE (Cálculo)	35
3.6 OUTPUT (Resultados)	36
3.7 CURVES (Curvas).....	36
3.8 PLANTEAMIENTO DEL MODELO A ESTUDIAR.....	37
3.8.1 Caso1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 68.8 \text{ kN/ m}^2$).....	37
3.8.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$)	38
3.8.3 Caso 3: Drenado ($\phi=30$, $c=10 \text{ kN/ m}^2$)	39
3.8.4 Caso 4: Drenado ($\phi=25$, $c=30 \text{ kN/ m}^2$)	39
CAPITULO 4	40
ANALISIS NO DRENADO (GEOSTUDIO Vs PLAXIS)	40
4.1 Datos generales del talud.....	40
4.2. GEOSTUDIO	40
4.2.1 Caso 1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 68.8 \text{ kN/ m}^2$).....	40
4.2.1.1 Modelización del talud sin pilote.....	40
4.2.1.2 Modelización del talud con pilote	42
4.2.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$)	45
4.2.2.1 Modelización del talud sin pilote.....	46
4.2.2.2 Modelización del talud con pilote	47
4.2.2.3 Efecto del Factor de Seguridad.....	48
4.3 PLAXIS.....	49
4.3.1 Caso 1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 68.8 \text{ kN/ m}^2$).....	49
4.3.1.1 Modelización talud sin pilote	49
4.3.1.2 Modelización talud con pilote	53
4.3.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$)	56
4.3.2.1 Modelización talud sin pilote	56
4.3.2.2 Modelización talud con pilote	57
4.4 Comparación de resultados GEOSTUDIO vs PLAXIS	58
CAPITULO 5	66
ANALISIS DRENADO (GEOSTUDIO Vs PLAXIS)	66
5.1 Datos del talud	66

5.2 Caso 3: Drenado ($\phi=30$, $c=10$ kN/ m ²) y Caso 4: Drenado ($\phi=25$, $c=30$ kN/ m ²).....	66
5.3 GEOSTUDIO 2004	67
5.3.1 Modelización del talud sin pilote.....	67
5.3.2 Modelización del talud con pilote	68
5.4 PLAXIS.....	69
5.4.1 Modelización talud sin pilote	70
5.4.2 Modelización talud con pilote	71
5.5 Comparación de resultados GEOSTUDIO Vs PLAXIS.....	72
CAPITULO 6	75
ANÁLISIS DE LA POSICIÓN ÓPTIMA DEL PILOTE EN UN TALUD.....	75
6.1 Análisis del artículo de Hassiotis et al. (1997).....	75
6.1.1 PLAXIS.....	80
6.1.2 GEOSTUDIO	82
6.2 Análisis y comparación (Hassiotis et al. (1997), PLAXIS y GEOSTUDIO)	85
6.3 Análisis del artículo de Ausilio et al. y otros, 2001.	86
6.3.1 PLAXIS.....	90
6.3.2 GEOSTUDIO	93
6.4 Análisis y comparación de resultados (Ausilio et al. 2001, PLAXIS y GEOSTUDIO)	95
CAPITULO 7	97
CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION.....	97
7.1 Conclusiones	97
7.2 Futuras líneas de investigación	98
REFERENCIAS.....	99
ANEXOS	100

DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES

1.1 Introducción

Los taludes o laderas han sido un objetivo de estudio a través del tiempo con fin de establecer mecanismos de estabilización, control y/o prevención que puedan reducir los daños causados sus roturas, debido la acción de diversos agentes. Hoy en día por los niveles de amenaza y riesgo de rotura, los taludes son obras estructurales que exigen mayor cuidado por parte del profesional en el área. En ingeniería geotécnica se han planteado distintas soluciones para la estabilización de laderas inestables, siendo una de ella la implementación de pantallas de pilotes.

La estabilización mediante pilotes ha sido utilizada con gran éxito en la estabilización de taludes naturales. En la práctica habitual la ingeniería determina el control de un talud en término de un factor de seguridad (FS), adquirido mediante análisis matemáticos.

Existen diversas técnicas de análisis para evaluar la seguridad de una ladera. Durante muchos años se ha utilizado los métodos de equilibrio limite, el cual supone que, en caso de falla, las fuerzas actuantes y resistentes a lo largo de la superficie de falla es equivalente a un factor de seguridad de 1.0. posteriormente se propuso el método de los elementos finitos introducido por Clough y Woodward (1967), el cual esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas, definida por una malla de elementos finitos que dan los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos en los puntos nodales al resolver la ecuación diferencial de equilibrio.

En la actualidad existen programas comerciales basados en estas dos técnicas de análisis. Por ejemplo, GEOSTUDIO teniendo como base el método de equilibrio limite, permite de una forma rápida y sencilla obtener el factor de seguridad de un talud y PLAXIS que es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensional diseñados específicamente para la realización de análisis y estabilidad de problemas geotécnicos. El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal vertical representativa del problema que se quiera evaluar.

El desarrollo de este trabajo está orientado uso de estas herramientas informáticas en el análisis de la estabilidad de laderas, las cuales nos permiten obtener mayor información de cuál será el comportamiento que puede presentar el talud al ser sometido a alguna acción que pueda alterar su estabilidad y llevarlo a rotura implementando pantallas de pilotes, para comparar resultados y establecer condiciones óptimas.

1.1.1 Objetivo principal

El objetivo principal es analizar la estabilidad de taludes utilizando los programas de equilibrio límite (GEOSTUDIO) y elementos finitos (PLAXIS), para elaborar un estudio comparativo con ambos métodos y así obtener los resultados más óptimos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ *Estudiar la geometría, parámetros y condiciones del talud.*
- ✓ *Elaborar un estudio comparativo en la estabilidad de un talud mediante la implementación de pantallas de pilotes usando como herramienta de cálculo los programas PLAXIS y GEOSTUDIO.*
- ✓ *Analizar cuáles son las condiciones más favorables para que el talud permanezca estable y que acciones podrían afectar dicha estabilidad.*
- ✓ *Obtener la posición más óptima de los pilotes y analizar cuál de los programas posee mejor criterio para esto.*

1.2 Nomenclatura de Talud o ladera

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente.

La seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento es lo que se define como estabilidad.

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, no todos le dan la importancia que amerita. Por lo que se puede decir que si se identificarán con anterioridad y se tomaran medidas de control y prevención los niveles de daños y pérdida por deslizamientos se reducirían a un valor insignificante (figura 1.1).



Figura 1.1. Deslizamiento causado por sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001. Tomado de Wikipedia. Autor: USGS.

1.3 Tipos de deslizamientos de taludes

La mayoría de los autores que han estudiado esta área coinciden en clasificar los deslizamientos de taludes en cinco mecanismos principales que son: deslizamientos, vuelcos, caídas, expansiones laterales y flujos, pero Corominas y García Yagüe (1997) proponen una clasificación más amplia tomando en cuenta los movimientos complejos y deformaciones sin rotura o previas a la rotura.

A continuación, se presenta un breve resumen de la clasificación presentado por Corominas y García Yagüe (1997).

1.3.1 Desprendimientos o caídas

Este mecanismo de rotura se produce debido a la separación de una masa de suelo o bloque de la pared del talud a gran velocidad por acción de la gravedad, el cual tiene lugar mediante caída libre y posterior rebote o rodamiento. La masa de suelo al impactar contra la superficie del terreno se va fragmentando en bloques más pequeños. Se distinguen dos tipos de movimientos: desprendimiento y colapso (figura 1.2).

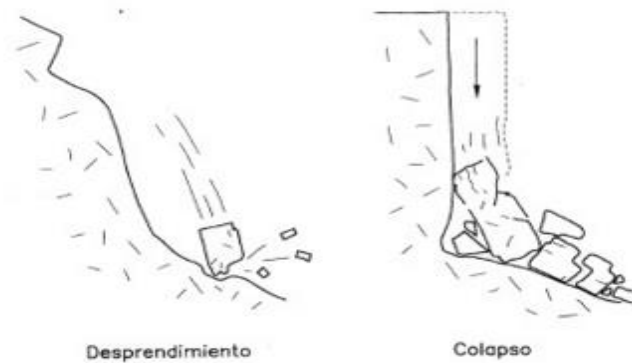


Figura 1.1. Mecanismo de desprendimiento y colapso (Corominas y García Yagüe, 1997)

1.3.2 Vuelco

Se produce en taludes de macizos rocosos donde los estratos presentan buzamientos o giro contrarios a la inclinación del talud y dirección paralela al mismo. La fuerza desestabilizadora es la gravedad y el empuje producido por el terreno adyacente o los fluidos entre las grietas. Se pueden distinguir dos mecanismos los vuelcos por flexión y el desplome (figura 1.3).

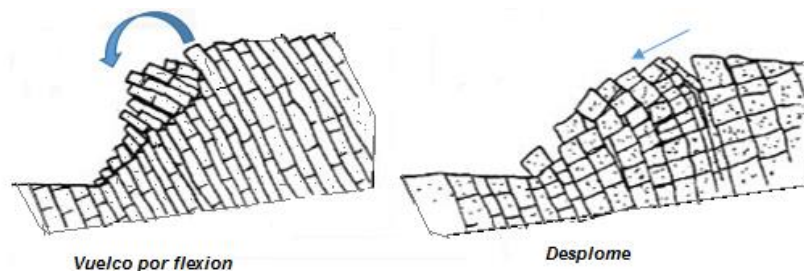


Figura 1.3. Mecanismo de ruptura mediante vuelco.

El desarrollo de un vuelco a gran escala en la ladera puede comportar cambios significativos en la permeabilidad del macizo rocoso tanto en el espacio como en el tiempo. La apertura de grietas puede facilitar el drenaje del macizo y ayudar a la autoestabilización (Girau et al. 1990).

1.3.3 Deslizamientos

Esta rotura se caracteriza por el desplazamiento ladera abajo de una masa de suelo o bloque sobre una o más superficies de cizalla. Este tipo de movimiento tiene la particularidad de que preserva a gran escala la forma de la masa de suelo deslizada y posee superficie de roturas definidas.

Dentro de este movimiento están los deslizamientos rotacional y traslacional que son muy importantes en lo referente al análisis de estabilidad de taludes para su posterior toma de medidas de control y prevención. Frecuentemente son tomados como base para la modelización (figura 1.4).

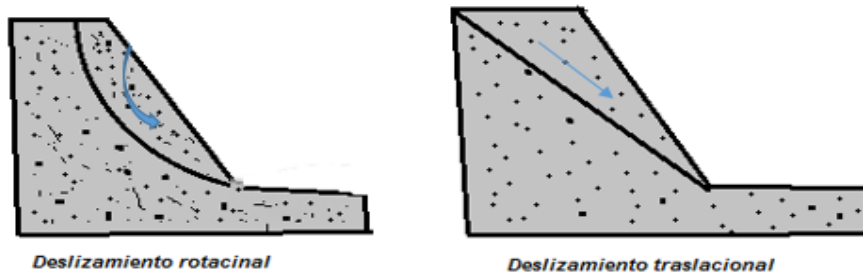


Figura 1.4. Esquemas de mecanismos de rotura por deslizamiento rotacional y traslacional.

1.3.4 Expansión lateral

Es el fenómeno caracterizado por el desplazamiento lateral combinado con la subsidencia de la cima.

1.3.5 Flujos

Un flujo son movimientos esencialmente continuos en los que las superficies de cizalla tienen corta vida y generalmente no se conservan. Las partículas se transportan a diferentes velocidades y se acoplan a la forma de la cuesta donde ocurre el proceso. Se definen varios tipos: reptación, coladas de tierra, coladas de barro, corrientes de derrubios, avalanchas de derrubios y avalanchas rocosas (figura 1.5).

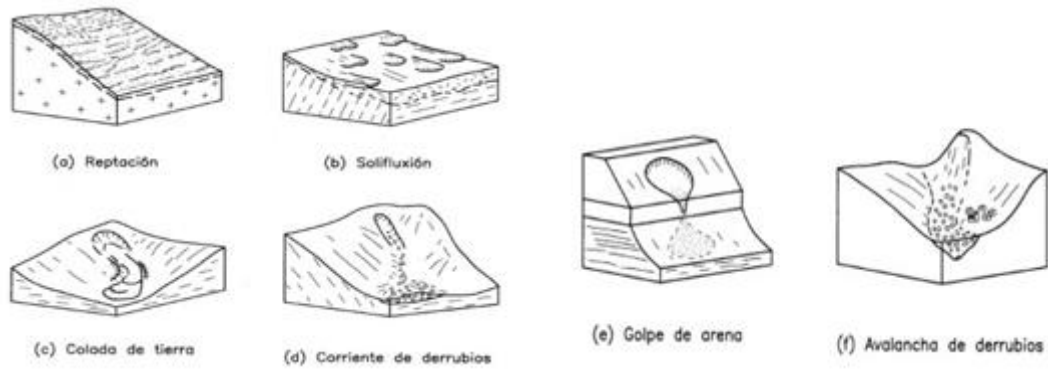


Figura 1.5. Movimientos de flujo (Corominas y Garcías Yagüe, 1997)

1.3.6 Deformaciones sin rotura manifiesta o previas a la rotura

Son deformaciones de cortas prolongación que no presentan superficie de rotura. Éstas pueden reactivarse periódicamente hasta llegar a rotura y provocar movimientos de desplazamientos de volúmenes de masa.

Corominas y García Yagüe (1997) la dividen en las siguientes clases: Cabeceo, Reptación por fluencia, combadura y pandeo en valle, deformaciones gravitatorias profundas o hundimientos de ladera y rotura confinadas (figura 1.6).

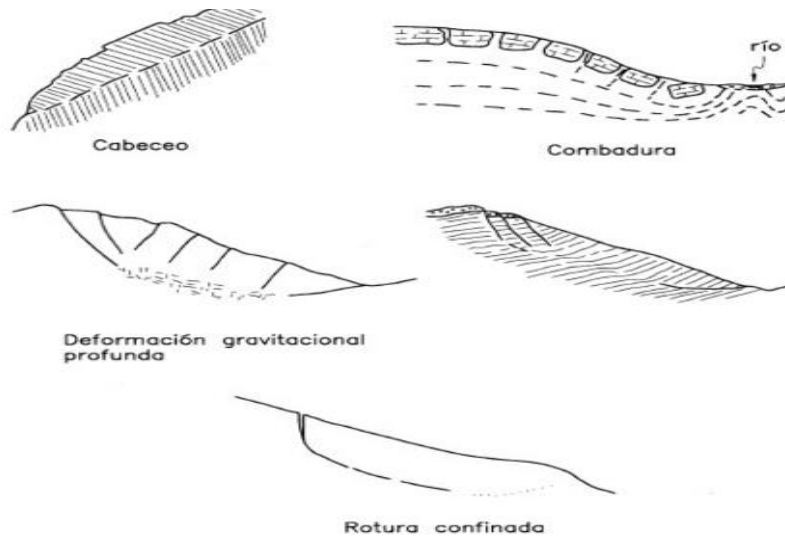


Figura 1.6. Deformaciones sin rotura de la ladera (Corominas y Garcías Yagüe, 1997)

1.3.7 Movimientos Complejos

Flujos deslizantes: Este movimiento se caracteriza por un colapso brusco y masivo a elevada velocidad de la masa.

Habitualmente los movimientos de laderas o taludes no pueden ser definidos mediante un exclusivo mecanismo de rotura. En el presente trabajo de tesina el tipo de movimiento analizado es un deslizamiento rotacional a través de una superficie de rotura curva, normalmente circular. Considerando que el tamaño de las partículas de suelo o roca sea muy pequeño en comparación con el tamaño del talud.

1.4 Factores que intervienen en la inestabilidad de taludes

Para que se produzca rotura o inestabilidad de una ladera intervienen una serie de factores tanto de carácter pasivo que condicionan y formarían la rotura de forma lenta como variables o activos que interfieren sobre los pasivos modificándolos y desencadenando la inestabilidad y posterior rotura del terreno. Muchos de estos factores van evolucionando con el tiempo por lo que es de suma importancia tener en cuenta qué factores y situaciones favorecen a la estabilidad y cuáles son desfavorables a la estabilidad.

Factores constantes

- Naturaleza de los materiales*
- Relación estructura-ladera*
- Pendiente topográfica y morfología de la ladera*
- Vegetación*

Factores variables

- Climatología*
- Meteorización*
- Agua*
- Erosión fluvial y costera*
- Sismicidad de la zona*

1.4.1 Factores constantes

Naturaleza de los materiales

La composición mineralógica, textura, compactación, tamaño, forma, permeabilidad, cementación de las partículas que formen la roca o sedimentos, grado de alteración y los materiales aflorantes son parámetros resistivos que condicionan sus características físico-mecánicas y, por tanto, su estabilidad potencial, por lo que el comportamiento variaría de unos materiales a otros aun cuando actúen sobre ellos con igual intensidad los mismos factores, es decir el estudio de la litología de los materiales de la zona podrían determinar que el movimiento sea profundo o superficial.

Relación estructura-ladera

Esta propiedad es un aspecto de gran interés a analizar frente a la estabilidad de laderas, ya que, si la dirección de la estructura de los materiales con respecto a la del terreno es paralela y dichos materiales tienen una inclinación hacia abajo, se facilita el desencadenamiento de inestabilidad. Por lo que la relación y combinación de la disposición geométrica de los materiales con respecto a la orientación, pendiente y altura, morfología y fallas son características a valorar.

Pendiente topográfica y morfología de la ladera

La pendiente topográfica y la altura de las laderas son factores que condicionan el desarrollo de procesos de deslizamiento por su contribución a la inestabilidad de los materiales; tanto es así que son parámetros utilizados sistemáticamente en la mayoría de los métodos de cálculo de

estabilidad de taludes. También, las características morfológicas de la ladera aumentarán o disminuirán su equilibrio, y ya que estas formas son además el resultado de un proceso evolutivo, nos servirán también como indicadores de inestabilidad. Una topografía abrupta, con valles profundos, grandes diferencias de altura entre vaguadas, alto gradiente hidráulico, relieve escarpado, red de drenaje densa y encajada, formas acarcavadas y laderas con morfología cóncava, es indicativa de zonas con alto potencial de inestabilidad (Martínez J. & Balaguer J., (1998).

Vegetación

La presencia de cobertura vegetal puede tener aportar tanto efectos positivos como negativos en la estabilidad de laderas. En el caso positivo las raíces cohesionan las partículas del suelo y disminuyen la disgregación de los niveles superficiales y en caso negativos, estas raíces al disgregar el suelo suelen provocar fracturas o fisuras en toda el área.

1.4.2 Factores variables

Climatología

La climatología de la zona es un factor que influye de manera variante en la estabilidad de un talud. Este agente provoca la formación de relieves, procesos de expansión, contracción de los poros del terreno, aumento en la magnitud de los movimientos debido a un acenso del grado de saturación debido a su repercusión en los procesos geomorfológicos.

Meteorización

La meteorización provoca alteración de la roca o del sedimento original del talud, haciendo cambios su resistencia y permeabilidad. Los cambios en las composición químicas, mineralógicas y texturales que se generan durante la evolución de este proceso, por la acción de reacciones de disolución, oxidación, hidrólisis, etc., destruyen el empaquetamiento de los materiales, disgregan el conjunto y generan una pérdida de la cohesión, lo que lleva en definitiva a una disminución de su resistencia.

Agua

La infiltración del agua genera cambios mineralógicos, composicionales y texturales, lo que da como resultados a una disminución de sus parámetros resistentes. Por lo que se puede decir que el agua es el factor con más acción en la modificación de las condiciones de estabilidad de una ladera.

Erosión fluvial y costera

Los taludes que se encuentran a la cercanía de río o valles fluviales se ven afectados durante las crecidas de los mismo. Estos modifican las condiciones geométricas y erosivas y pueden cambiar su posición y extensión del cauce actuando entonces como agente modificador y desestabilizador del relieve.

Sismicidad de la zona

Los movimientos sísmicos son factores que pueden acelerar y desencadenar grandes movimientos de masa. Los sismos provocan una sacudida del suelo desplazándolos de su vertical a la componente de peso de una ladera e inducen una mayor tensión tangencial de cizalla en el plano de rotura.

Acciones antrópicas

La deforestación de laderas y barrancos, banqueos (cortes para abrir canteras, construcción de edificios o casas), construcción de edificaciones con materiales pesados sobre terrenos débiles falta de canalización de aguas negras y lluvia son muchas de las actividades humanas que afectan o modifican el equilibrio inicial de suelo originando proceso de inestabilidad.

Bien cabe destacar que las causas humanas originan el 70% del origen de los deslizamientos.

1.5 Técnicas de mitigación de deslizamientos

Luego estudiar y conocer los factores que pueden producir inestabilidad o rotura en una ladera, se debe analizar que técnicas de mitigación o control se debe proponer en la misma. A lo largo de la historia de la ingeniería se han planteado diferentes metodologías para el control o prevención de deslizamientos de masa de suelo que han ayudado a canalizar esta problemática. Estos se pueden resumir en dos actuaciones: reducción de la fuerza actuante o incremento de fuerza resistentes.

Si se reducen las fuerzas actuantes se tiende a lograr el equilibrio de las masas del talud, reduciendo las fuerzas que desestabilizan y producen el movimiento en la ladera, mediante la modificación de la geometría, puede ser haciendo cambio de pendiente, aplicando drenajes, reduciendo el peso o con la protección de la superficie.

El incremento de fuerza resistente se basa en la aplicación de fuerzas en el talud mediante la colocación de obras ingenieriles como pilotes, muros de gravedad y pantallas atirantadas o al incremento de la fuerza resistente interna del suelo con las soluciones que aplican drenaje para bajar el nivel freático o la inyección de sustancias que aumenten su resistencia.

Entonces dependiendo de la condición que presente el talud a estudiar se podría plantear una clasificación en la que se tuviera en cuenta cual es el objetivo de intervención, ya que un sistema de estabilización lo que pretende es actuar sobre una gran masa de terreno inestable que pueda provocar un fenómeno de deslizamiento profundo mediante planos o círculos de rotura.

A continuación, se indican algunas de las técnicas de implementación que buscan reducir o controlar la inestabilidad de un talud o ladera:

Disminución de la pendiente

Al disminuir la pendiente del talud, el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo para el caso de un talud estable, aumentándose en esta forma el factor de seguridad (figura 1.7).

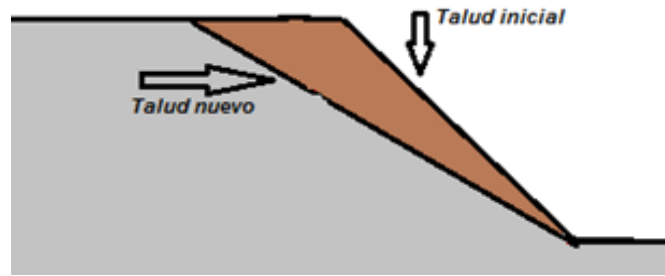


Figura 1.7. Esquema de disminución de la pendiente de un talud.

Excavación

Es una técnica para reducir las fuerzas actuantes dentro de la masa deslizada. Generalmente, se excava en la cabeza del deslizamiento (figura 1.8) debido a que la parte superior del deslizamiento es la que aporta una mayor fuerza actuante sobre la masa inestable.

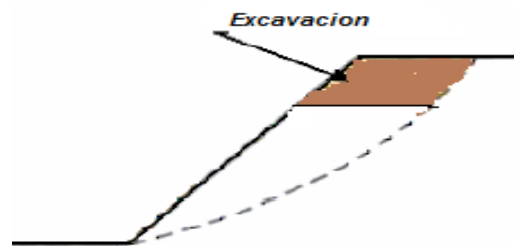


Figura 1.8. Técnica de excavación de un talud.

Empleo de contrapeso al pie del talud

Al colocar carga adicional a la base de un talud con una inestabilidad de deslizamiento de tipo rotacional se genera un momento en dirección contraria al movimiento, el cual conlleva a un aumento del factor de seguridad.

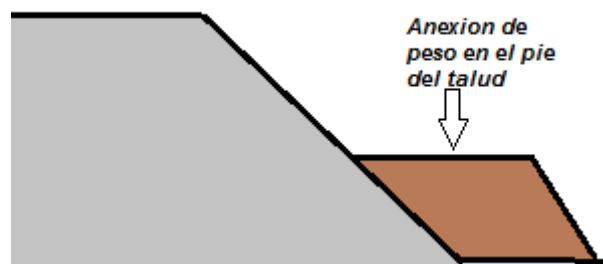


Figura 1.9. Esquema de la técnica de contrapeso al pie de un talud.

Drenaje

El agua es uno de los principales agentes desencadenantes de los problemas de inestabilidad en laderas. Esta medida tiene por finalidad eliminar o disminuir el agua presente en el talud, para así reducir las presiones intersticiales que actúan como factor deslizador en la superficie de rotura y grietas de tracción.

Dentro de los diferentes drenes que se pueden colocar en un talud, dependiendo de la forma de trabajo que se le quiere emplear tenemos, (figura 1.10) drenes superficiales, drenes por bombeo, drenes por gravedad etc.

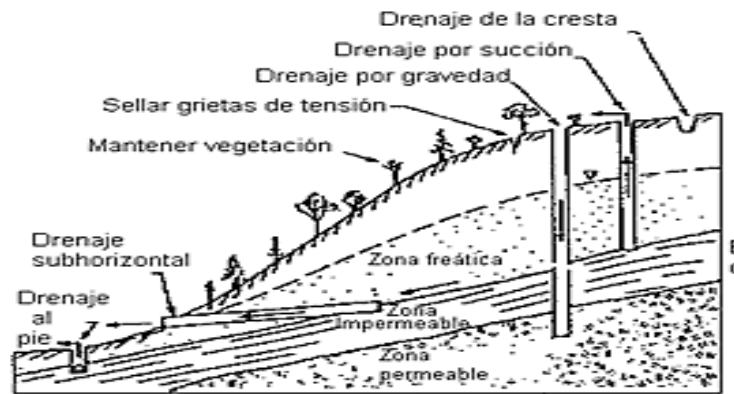


Figura 1.10. Sistema de drenes (Suárez Días,1998)

Colocación de Anclajes

Los anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados desde el talud y cementadas. Estos proporcionan una fuerza contraria al movimiento y producen un aumento de las tensiones normales en la superficie de falla, aumentando así la resistencia del talud.

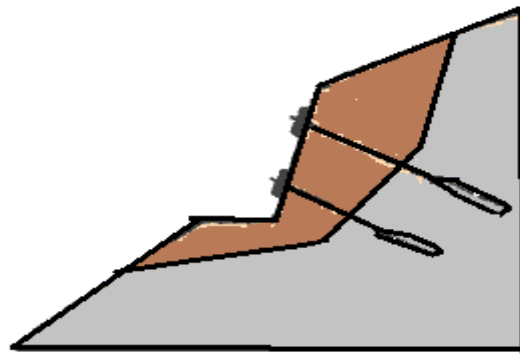


Figura 1.11. Sistema de anclaje en talud.

Estructura de contención (Muros, pantallas, pilotes)

Las estructuras de retención tienen por objetivo la colocación de fuerzas adicionales que resistan el movimiento, aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes, y para que estas estructuras cumplan su objetivo, es necesario que la superficie de falla formada o por formarse, sea contenida por la estructura de retención, si no se aplica este concepto su efecto será nulo.

Existen varios tipos de estructuras de retención en función de su manera de transmitir las cargas, las cuales se pueden clasificar en muros rígidos, muros flexibles y pilotes.

1.6 Pilotes

Los Pilotes son elementos estructurales de cimentación profundas de tipo puntual que desempeñan diferentes funciones como elementos estructurales interactuantes con el terreno buscando siempre el estrato resistente capaz de soportar las cargas transmitidas. Algunas de las funciones que cumple un pilote son:

- Transmitir cargas al terreno
- Servir de contención
- Realizar mejoras geotécnicas
- Ser elementos estructurales columna
- Utilizarse como intercambiador geotérmico

En este trabajo se estudiará el uso de pilotes como elemento de estabilización de taludes y laderas inestables (figura 1.12).

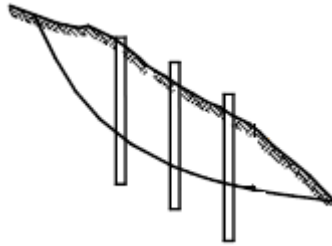


Figura 1.12. Perfil de un talud con sistema de pilotes.

En el campo de las cimentaciones, los pilotes son necesarios cuando la cimentación superficial o semiprofunda no es posible por razones técnicas, de dimensiones o económicas.

Tipología y construcción de pilotes

Los pilotes se pueden clasificar dependiendo de la característica y función que van a desempeñar. A continuación, se resume una clasificación de los pilotes presentada por Núria Martí A. (2008).

1) Por la forma de transmitir la carga al terreno:

Columna: fuerte predominio de la componente de punta (capa resistente bajo suelo blando).

Flotantes o de rozamiento: transmisión a lo del pilote al suelo deformable al que se adhiere por fuste.

2) Por la forma de puesta en obra con respecto al terreno:

Pilote de desplazamiento o hincados: se instala en el terreno desplazando en el terreno un volumen de suelo equivalente. Primero el terreno sube, pero luego solo se comprime.

Pilotes de extracción: se excava previamente el terreno donde se va a instalar el pilote.

De desplazamiento: se excava previamente un volumen de suelo inferior al que ocupara el pilote terminado.

3) Por el lugar de fabricación y la forma de ejecución:

Prefabricado: en este caso se transportan desde una planta de fabricación y se hincan por percusión, por presión o vibración, mediante gatos hidráulicos, roscados al terreno o, se instalan en perforaciones previamente perforadas.

Ejecutadas in situ: consiste en realizar una perforación en el suelo con medidas requeridas a la cual se le colocará un armado en su interior y posteriormente el vertido de hormigón.

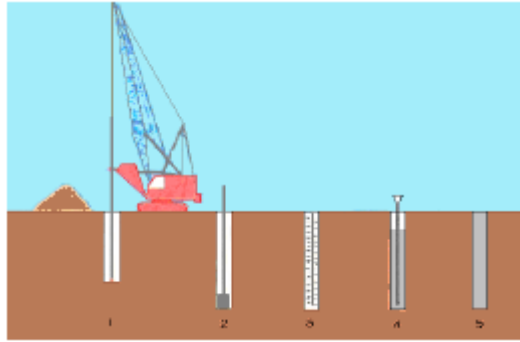


Figura 1.13. Proceso constructivo de pilotes colocado in situ.

4) Según el material

Madera: bajo el agua se conserva bien

Metálicos: aprovechar perfiles laminados. Velocidad de oxidación es lenta.

Hormigón: armado o pretensado.

Mixtos: combinación de perfiles con hormigón.

La implementación de pilotes en la estabilización de taludes o laderas se recomienda para controlar fallas de deslizamientos superficiales, para el cual se debe estudiar antes las condiciones del terreno y la superficie de falla que se produce en este, con el fin de evitar el uso de pilotes muy esbeltos y calcular la resistencia necesaria con que deben ser diseñados para soportar los esfuerzos a los que se verán sometidos. Su uso es a menudo imprescindible para garantizar la seguridad global del talud.

Aunque la estabilización con pilas o pilotes es muy común, no existe un procedimiento de cálculo y diseño universalmente aceptado. Como en otros campos de la ingeniería geotécnica, los métodos de cálculo disponibles han ido evolucionando a medida que se ha dispuesto de herramientas de cálculo cada vez más potentes. Posteriormente, la generalización de los programas informáticos ha llevado al empleo de programas de cálculo de estabilidad de taludes, junto con otros capaces de evaluar esfuerzos en pantallas de pilotes (generalmente basados en modelos tipo Winkler, que sustituyen el terreno por muelles) (L. Ortuño, T. Murillo, 2010).

El desarrollo de los métodos numéricos de equilibrio límite y elementos finitos o diferencia finitas han posibilitado el diseño global de este tipo de aplicaciones, ayudando así a simplificar los cálculos y diseño de elementos estructurales (como pilotes) en la estabilización de taludes.

MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE (PROGRAMA GEOSTUDIO)

Los deslizamientos de laderas son una problemática que durante muchos años ha sido estudiada por diferentes profesionales del área de la ingeniería, haciendo uso de distintas técnicas. Existe una variedad de sistemas analíticos que son de utilidad para el estudio de estabilidad de talud. Hoy en día el modo más difundido para el análisis de la estabilidad de una masa de suelo es el empleo de las técnicas de equilibrio límite. Estos métodos han sido usados por distintos investigadores por varias décadas para estudio de taludes sujetos a fuerzas gravitacionales (Terzaghi 1943, Taylor 1948, Bishop 1955, Morgenstern y Price 1965, Janbú 1973) todo con el fin de llegar a determinar el factor de seguridad que le posibilitará al ingeniero tener un método muy útil para la toma de decisiones.

Los métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad de taludes son los más empleados en la actualidad en la práctica, por su fácil manejo. Se establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie de rotura. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose, así, la rotura del terreno. En el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático. Este sistema ha mejorado con el desarrollo de los métodos numéricos en los últimos años.

Un buen análisis debería representar adecuadamente el mecanismo de falla de un talud. Estos análisis son generalmente simples en concepto. En general se consideran únicamente las condiciones requeridas para la estabilidad, o para ser más precisos, para el equilibrio límite. El término equilibrio límite se aplica a sistemas de fuerza que están justo en el punto de falla.

El sistema de equilibrio límite considera que en el caso de una falla las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en rebanadas y estableciendo el equilibrio global y el de cada una de ellas (figura 2.1).

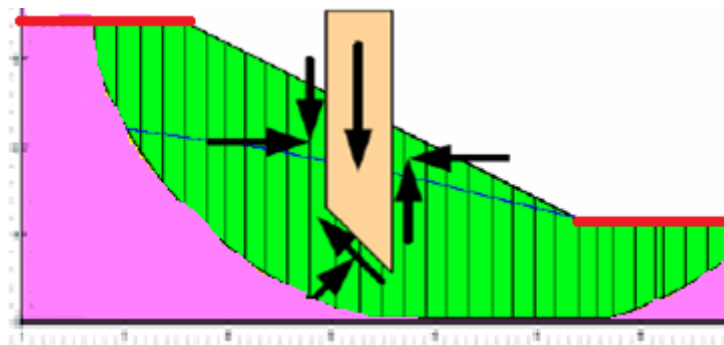


Figura 2.1. Esquema de un talud con la superficie de falla y las fuerza que actúan en cada rebanada.

2.1 Factor de Seguridad

El factor de seguridad (FS) se define como, el valor que cuantifica relación entre las condiciones reales que presenta el talud, y las condiciones que llevan a su rotura. El factor de seguridad es el coeficiente mínimo de todos los coeficientes de seguridad asociados a todas las superficies de deslizamiento posibles (Alonso, (2005)).

La expresión del factor de seguridad viene dada por:

$$FS = \frac{\int \tau_R \cdot ds}{\int \tau \cdot ds} \quad [1]$$

Donde:

τ_R – es la resistencia al corte máximo que se puede movilizar a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

τ – es la resistencia al corte movilizado a lo largo de la superficie potencial de deslizamiento,

ds – es el diferencial de longitud a lo largo de la superficie de deslizamiento.

También se puede definir el factor de seguridad (FS) de otras maneras. Este se puede definir como el cociente entre los momentos que actúan en un talud resistentes al deslizamiento, y los que inducen al deslizamiento.

En los problemas de deslizamiento de taludes, el valor mínimo del coeficiente de seguridad definido de este modo suele hacerse variar entre 1.1 y 1.5, según se especifica en cada caso. El valor más bajo se emplea, en ocasiones, cuando se coloca la instrumentación para observar la obra cuando está en construcción (Jiménez Salas, 1976). El valor de FS=1 corresponde al caso límite.

Para la aplicación de estos métodos se requieren las siguientes etapas de cálculo. Alonso (2005):

1. Se examina un mecanismo de rotura cinemáticamente admisible.

2. A partir de la condición de equilibrio, se establecen relaciones entre las fuerzas presentes en el problema. Diferenciando entre las fuerzas que inducen al desequilibrio (peso, cargas externas...), y las fuerzas internas resistentes. Las ecuaciones necesarias que se deben cumplir en el problema son:

- ✓ Equilibrio de fuerzas, tanto verticales como horizontales
- ✓ Equilibrio de momentos, respecto a un punto arbitrario
- ✓ Se analiza la estabilidad del conjunto a partir del concepto de factor de seguridad.

3. Mediante cálculos repetitivos se halla el menor valor del factor de seguridad, que va asociado a la superficie de deslizamiento más desfavorable.

En general el número de incógnitas supera al de ecuaciones y es necesario hacer hipótesis adicionales para la resolución de los casos. Los métodos basados en las superficies de rotura (equilibrio límite) pueden dividirse en dos grandes grupos según se considere el equilibrio global

o se plantee el equilibrio parcial de una serie de rebanadas en las que se divide a la masa que se moviliza (Lloret, 2011).

2.2 Metodología de análisis

Se presentan a continuación algunos métodos de análisis universalmente más conocidos e utilizados por investigadores para el cálculo del factor de seguridad.

Cada una de las metodologías siguientes se basan en la formulación de equilibrio límite:

- ✓ Método del talud infinito
- ✓ Análisis no friccionante
- ✓ Método ordinario de dovelas
- ✓ Análisis de bloque deslizante
- ✓ Método simplificado de Bishop
- ✓ Método simplificado de Janbú
- ✓ Método riguroso de Janbú
- ✓ Método de Spencer
- ✓ Método de Morgenstern-Price

A través del tiempo han surgido una amplia gama de variedad de métodos de análisis de estabilidad, pero para simplificar y solo presentar detalles relevantes para el análisis, solo se plantearán los conceptos de algunos de los métodos citados antes.

2.2.1 caso del talud infinito

Se habla de talud infinito cuando el espesor del material inestable es pequeño respecto a la altura del talud. La correcta ejecución del método se da en condiciones en las cuales la superficie de deslizamiento es paralela a una profundidad leve y la longitud de falla es larga comparada con su espesor.

De esta manera las irregularidades del terreno serán ignoradas. Las propiedades del suelo y presiones de poro a cualquier profundidad dentro del talud se asumen constantes.

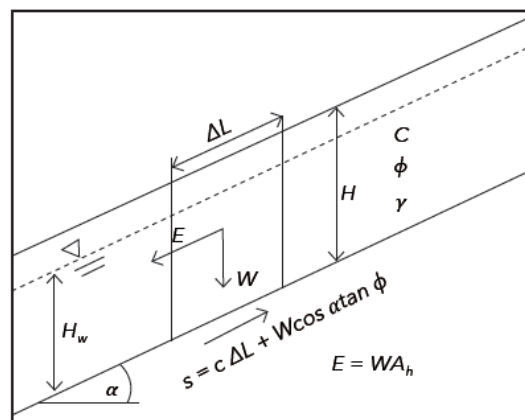


Figura 2.2. Esquema del modelo usado para talud infinito.

$$FSE = \frac{c}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} + \frac{(\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \alpha \tan \phi}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} \quad [2]$$

Donde;

FSE Factor de seguridad estática

H Espesor de la zona de falla (m)

H_w Altura del agua medida desde la superficie de falla (m)

c Cohesión del suelo (kPa)

φ Angulo de fricción interna del suelo

γ Peso unitario del suelo (kN/m³)

γ_w Peso unitario del agua (kN/m³)

α Angulo de inclinación promedio del terreno

2.2.2 Método ordinario de dovelas o rebanadas

Conocido también como método sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes, el equilibrio de cada dovela es considerado por separado y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de los momentos con respecto al centro del círculo producidos por estas fuerzas se obtiene el Factor de Seguridad.

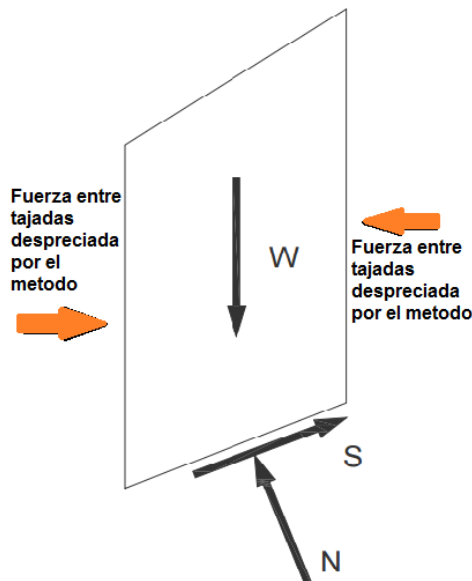


Figura 2.3. Esquema de las fuerzas que actúan en la rebanada en método ordinario de dovelas.

Este método no es muy usado en la actualidad por su dificultad en el manejo de secciones no homogéneas. Sin embargo, la práctica de dividir la masa deslizante en dovelas es usada aún en la actualidad, y forma la base de muchos de los análisis realizados hoy día.

2.2.3 Análisis de bloque deslizante

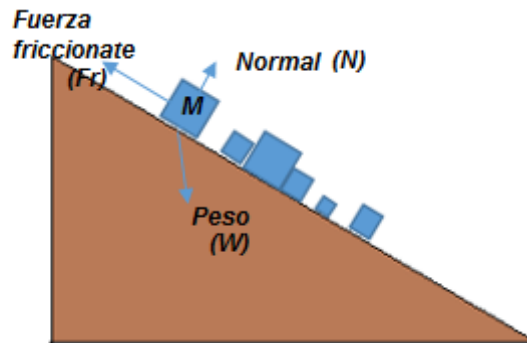


Figura 2.4. Esquema de un deslizamiento por bloques.

El análisis de bloque puede utilizarse cuando existe a una determinada profundidad, una superficie de debilidad relativamente recta y delgada. Consiste en dividir la masa deslizante en dos o más bloques y el equilibrio de cada bloque se considera independiente, utilizando las fuerzas entre los bloques. No considera la deformación de los bloques y es útil cuando existe un manto débil o cuando aparece un manto muy duro sobre el cual se puede presentar el deslizamiento.

El método deberá realizarse por tanteos, suponiendo varias combinaciones de planos constituyendo una superficie de falla, y buscando el mínimo factor de seguridad que, en ningún caso, deberá ser menor de 1.5.

2.2.4 Método simplificado de Bishop

Bishop (1955) ideó un esquema que incluía las fuerzas normales entre dovelas, pero ignorando las fuerzas de cortante. El método simplificado de Bishop solo satisface el equilibrio global de momento. Es de interés e importancia en este método el hecho de que, incluyendo las fuerzas normales entre dovelas, la ecuación del factor de seguridad se volvió no lineal y se requiere de un proceso iterativo para calcularlo.

Este método supone que la superficie de rotura es circular, aunque en la actualidad los programas informáticos permiten optar por diferentes geometrías. Bishop (1954) (en Lloret, 2011), ideó un esquema que incluía las fuerzas normales entre rebanadas, pero ignorando las fuerzas de cortante. El método simplificado de Bishop sólo satisface el equilibrio vertical. Es de interés e importancia en este método el hecho de que, incluyendo las fuerzas normales entre rebanadas, la ecuación del factor de seguridad se vuelve no lineal y se requiere de un proceso iterativo para calcularlo.

El método consiste en dividir el talud en bloques o rebanadas cumpliendo equilibrio entre ellos, y en definir diferentes superficies de rotura e ir obteniendo los distintos factores de seguridad para cada una de las superficies para finalmente quedarse con el más pequeño (figura 2.5).

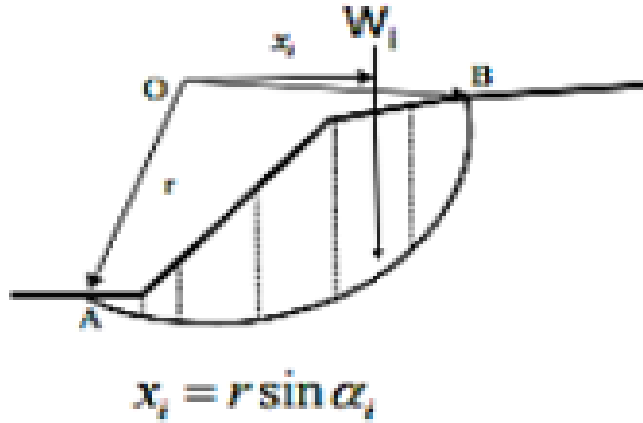


Figura 2.5. Discretización del talud en rebanadas para el análisis del problema (Lloret, 2001).

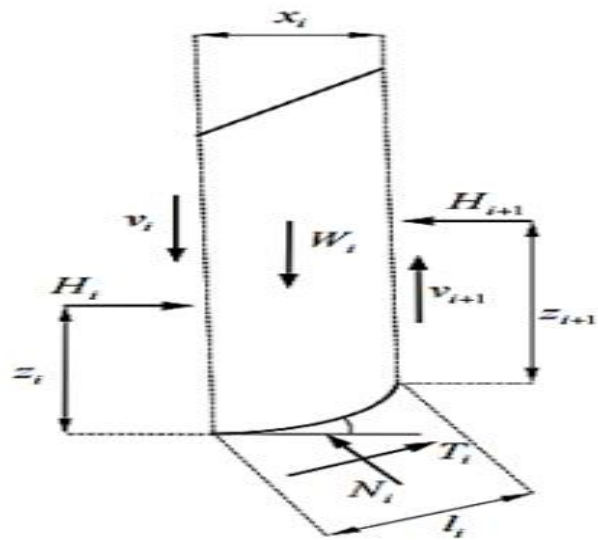


Figura 2.6. Equilibrio en una rebanada según el método de Bishop (Lloret, 2011).

El método de Bishop establece el factor de seguridad como relación entre momentos resistente y volcador. Queda la siguiente expresión implícita, donde hay que realizar iteraciones para encontrar el FS, mencionado anteriormente.

$$FS = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \alpha_i} \sum_{i=1}^{i=n} \{ [c' \Delta x_i + W_i (1 - r_u) \text{tg} \phi'] \} \frac{\sec \alpha_i}{1 + \frac{\text{tg} \alpha_i \text{tg} \phi'}{FS}}$$

$$r_u = \frac{u_i}{\gamma z_i}$$

[3]

Donde:

- W_i = Peso del terreno en la rebanada
- C = cohesión del terreno
- Φ = Angulo de fricción
- γ = peso específico del suelo
- F_s = factor de seguridad

2.2.5 Método simplificado de Janbú

El método simplificado de Janbú es similar al de Bishop ya que considera las fuerzas normales entre dovelas e ignora las fuerzas cortantes. La diferencia entre los dos radica en que el método simplificado de Janbú satisface solo un equilibrio horizontal de fuerzas. El diagrama de fuerzas actuante en una rebanada es el mismo que el diagrama para el caso de Bishop. El método es una de las primeras rutinas para el análisis de superficies de rotura no circulares, suponiendo que las fuerzas entre elementos son nulas; por lo tanto, la expresión obtenida por la fuerza normal a las rebanadas es la misma que para el método de Bishop.

2.2.6 Método riguroso de Janbú

Se diferencia del anterior por la inclusión de la fuerza cortante entre dovelas en el análisis, y por la determinación de puntos en los cuales las fuerzas resultantes entre dovelas interceptan los lados de las dovelas. De esta manera se encuentra una línea de impulso uniendo los puntos de acción de la resultante de las dovelas.

2.2.7 Método de Spencer

Spencer (1967) desarrolló dos ecuaciones de factor de seguridad; uno con respecto al equilibrio del momento y otro con respecto al equilibrio de fuerza horizontal. Él adoptó una relación constante entre el cortante entre las dovelas y las fuerzas normales. Encontrando la proporción cortante-normal que hace los dos factores de seguridad el mismo, significa que momento y equilibrio de fuerza están satisfechos. Spencer asume que las inclinaciones de las fuerzas resultantes entre dovelas son constantes para todas las dovelas.

La figura 2.7 muestra las fuerzas que intervienen en el equilibrio de una rebanada. En dicha figura se tiene:

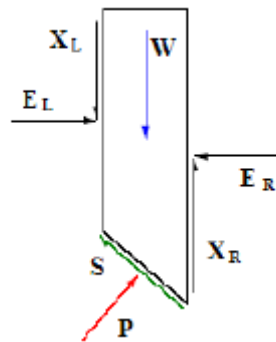


Figura 2.7. Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada considerando el método de Spencer y Morgenstein-Price.

Donde:

W Es la carga vertical externa (incluye el peso)

E_L Y E_R Las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas

X_L Y X_R Fuerzas verticales entre rebanadas a izquierda y derecha

P Y S Son las fuerzas normales y tangencial a la base de la rebanada.

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) (en Lloret (2011)), desarrolla dos ecuaciones de factor de seguridad; uno con respecto al equilibrio del momento y otro con respecto al equilibrio de fuerza horizontal. Puede aplicarse a superficies no circulares siempre que se adopte un centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos. Spencer se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación. La inclinación específica de estas fuerzas entre dovelas es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas ϕ . Para resolver las ecuaciones f_s y ϕ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error. Una vez se obtienen los valores de f_s y ϕ , se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometrías de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Suárez Díaz, 2009)

2.2.8 Método de Morgenstern-Price

A diferencia del método de Spencer, que asume inclinaciones constantes para las fuerzas entre dovela, la solución planteada por Morgenstern – Price (1965) asume que los valores de estas inclinaciones varían sistemáticamente a través de la masa deslizada.

Este método se puede aplicar tanto a superficies de rotura circulares como no circulares. pero en el caso de Morgenstern-Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. Considera que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie, resuelve la componente normal y paralela a la base, para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$\frac{X}{F} = \lambda \cdot f(x) \quad [4]$$

Dónde:

f_x es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, x es la fuerza de cortante entre rebanadas y λ es un valor escala. Para una función dada f_x , los valores de λ y F se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y fuerzas. De esta forma $F = F_m = F_f$ donde F_m es el factor de seguridad de momento y F_f de fuerza (F. Vargas, 2015).

Cada uno de los métodos expuestos anteriormente están orientados a cumplir con el equilibrio básico de la estructura de talud, que son equilibrio de fuerzas y de momentos o alguno de los dos.

2.3 PROGRAMA GEOSTUDIO

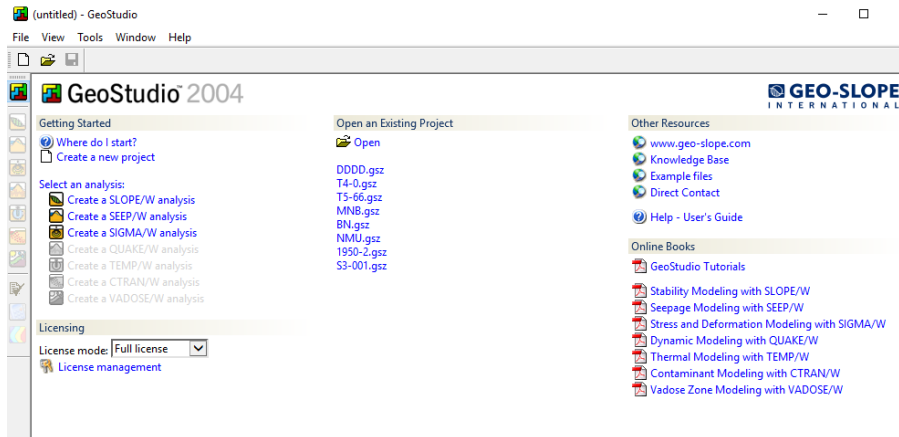


Figura 2.8. Esquema inicial del programa GEOSTUDIO 2004

GEOSTUDIO 2004 es uno de los programas de ordenador, desarrollado por GeoSlope Ltd., para la modelización de problemas geotécnicos. Este posee una versión de estudiante que se puede descargar de forma gratuita desde <http://www.rocsience.com>. consta de siete paquetes, que permiten análisis de estabilidad (SLOPE/W), tensión deformación (SIGMA/W), transporte de contaminantes (CTRAN/W), filtraciones (SEEP/W), geotérmicos (TEM/W) y dinámico para terremotos (QUAKE/W) (figura2.8).

En el presente estudio se ha utilizado el paquete SLOPE/W 2004, que posibilita realizar análisis de estabilidad de taludes mediante equilibrio limite, empleando los criterios de rotura de Mohr-Coulomb. Los parámetros necesarios para el cálculo son el peso específico, el ángulo de fricción y la cohesión, todos ellos son introducidos a través de un cuadro de texto como se muestra en la siguiente figura 2.9.

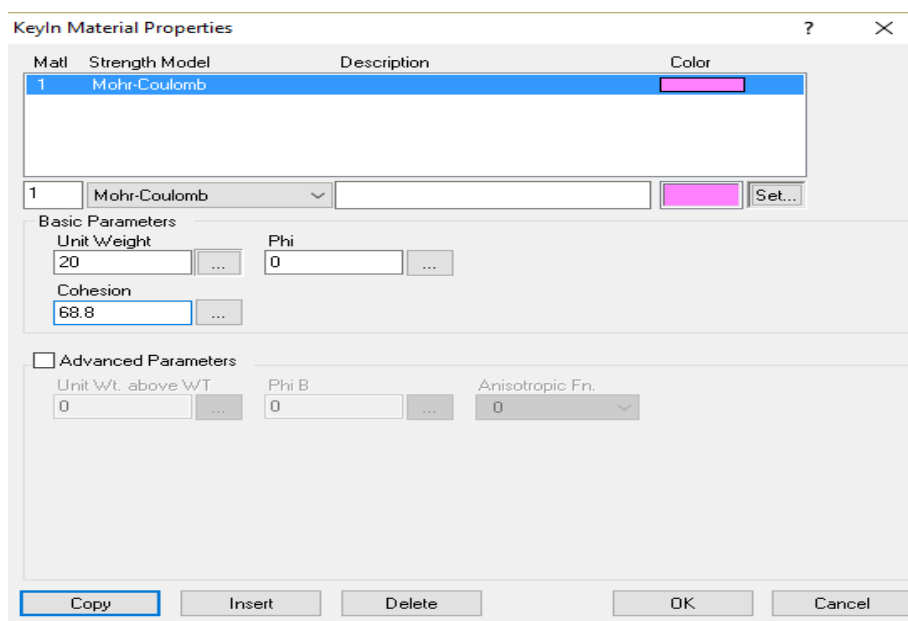


Figura 2.9. Ventana para la propiedad del material en GEOSTUDIO 2004.

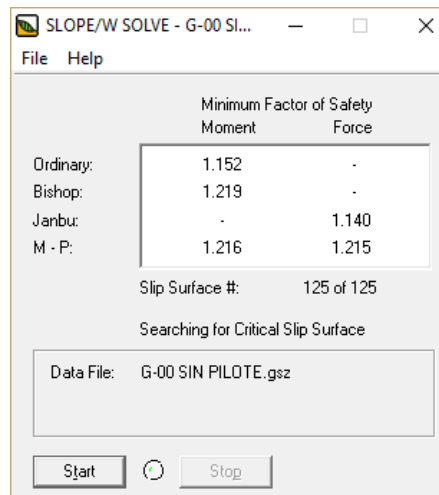


Figura 2.12. Generación del factor de seguridad en GEOSTUDIO 2004.

SLOPE/W 2004 tiene la opción *Reinforcement loads* para la colocación de pilotes donde es necesario introducir la fuerza en (*Shear Force*), separación entre pilotes, la longitud y dirección del mismo, ya que el programa asume que la fuerza que proporciona el pilote es lo que realmente debemos conocer porque esta actúa como una barrera ante la masa de suelo que se desliza aportando así mayor seguridad al talud (figura 2.13).

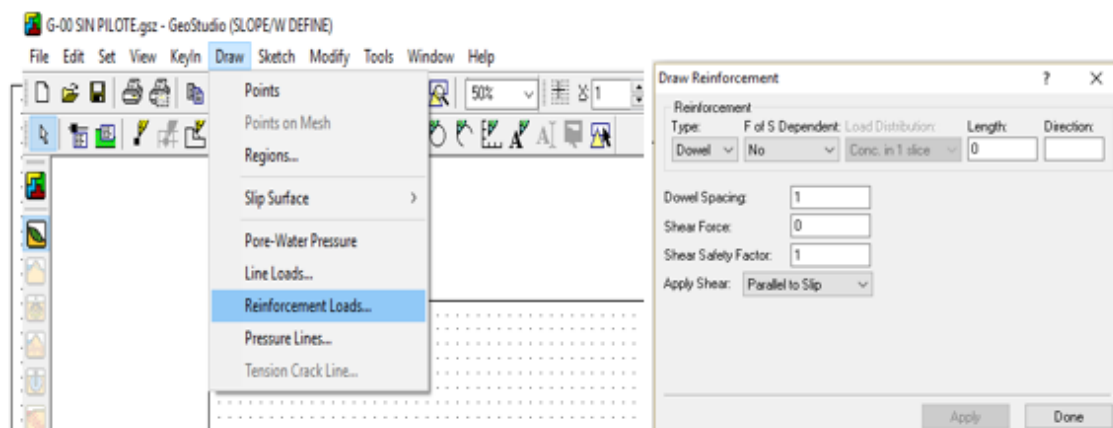


Figura 2.13. Ventana para insertar los datos de un pilote en GEOSTUDIO 2004.

MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (PROGRAMA PLAXIS)

El método de elementos finitos, es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería definido matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero resolver infinidad de problemas. El método de elemento finito requiere ser usado en computadoras.

Este método fue inicialmente propuesto en 1967 por Clough y Woodward. De hecho, el método nació por evolución de aplicaciones a sistemas estructurales. Es un método que parte de las ecuaciones diferenciales de equilibrio, para todos los materiales implicados. Aplica las leyes constitutivas de los materiales y las condiciones de contorno, resultando en un sistema de ecuaciones algebraico.

Los procesos que sigue este método son (Frías Valerio E., 2004):

- ✓ El problema continuo se divide en un número finito de partes, elementos, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- ✓ La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- ✓ Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- ✓ El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

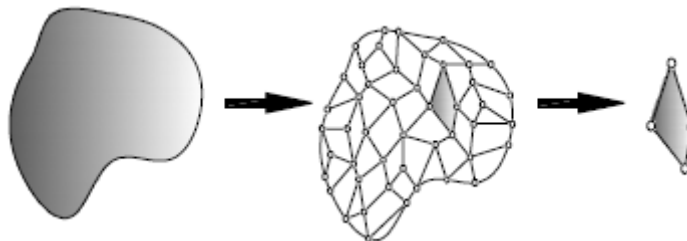


Figura 3.1. Esquema proceso de discretización, Díaz 2008.

Por lo tanto, el método se basa en la transformación de un cuerpo de natural continuo en un modelo discreto constituido por número finito de elementos o formas geométricas sencillas aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo (figura 3.1). El conocimiento de lo que sucede en el interior se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. La interpolación es un elemento clave del método de elemento finito, puesto que es a través de las funciones de forma, o interpolación, que se consigue reducir el problema a la determinación de las incógnitas en nodos.

3.1 Programa PLAXIS

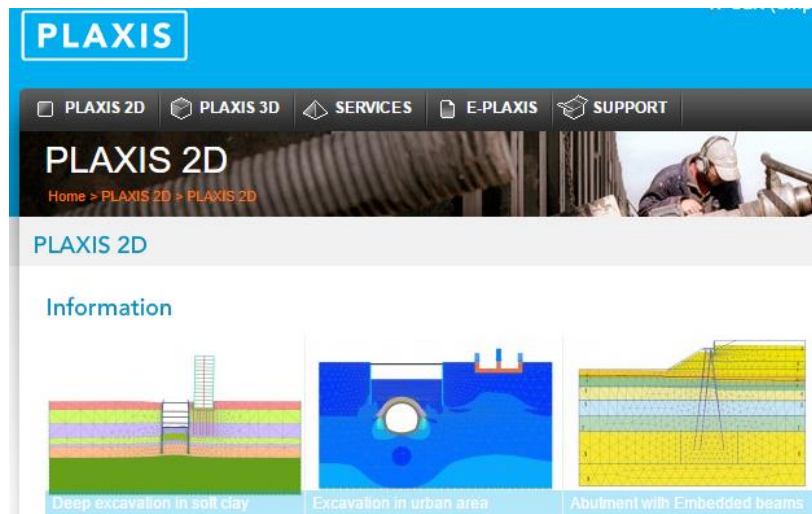


Figura 3.2. Programa PLAXIS.

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos de distinta naturaleza. Existen la versión en 2 y en 3 dimensiones.

El programa PLAXIS ha sido creado en la universidad técnica de Delft, a partir de una iniciativa del Departamento de Trabajo Público y Dirección del Agua, en el año 1987 (Países Bajos). El objetivo inicial fue el desarrollo de un código de fácil uso basado en elemento finitos para el análisis de diques construidos sobre las capas de suelo blando que forman el subsuelo de Holanda. En los años siguientes el programa PLAXIS ha sido ampliado para cubrir la mayor parte de las áreas de la ingeniería geotécnica. Debido al crecimiento continuo de las actividades se formó la compañía PLAXIS BV en el año 1993 (PLAXIS Manual, Versión 7. PLAXIS B.V.- University of Stuttgart, 1998).

El programa utiliza una interfaz gráfica que permite a los usuarios generar rápidamente un modelo geométrico y una malla de elementos finitos basada en una sección transversal representativa del problema que se quiera tratar. Sus aplicaciones van desde modelación de muros de contención, terraplenes, túneles, pilotes, taludes, geomallas, etc.

PLAXIS 2D, Versión 9.0 utilizada para la modelación de este trabajo está constituido por cuatro subprogramas:

- ✓ Input (Entrada)
- ✓ Calculations (Cálculo)
- ✓ Output (Resultados)
- ✓ Curves (Curvas)

3.2 INPUT (Entrada)

En Input (Entrada) es para la configuración general del problema geotécnico que se va a modelizar. Aquí se ingresa la geometría del problema, se establece las condiciones de contorno,

introducir los parámetros y propiedades de los materiales, se genera la malla de elementos finitos y se define las condiciones iniciales del problema (figura 3.3).

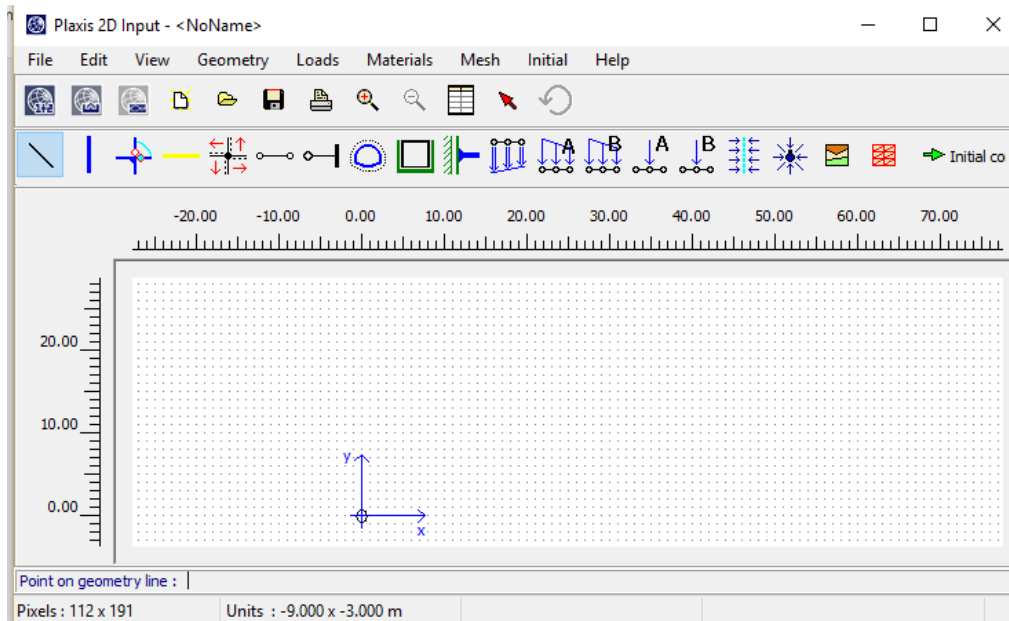


Figura 3.3. Ventana inicial del programa PLAXIS 2D-Version 9.0.

3.3 Modelos constitutivos del programa

A continuación, se cita una breve descripción de algunos modelos disponibles en PLAXIS 2D-Version 9.0 que simulan el comportamiento del material (suelo o estructura) (figura 3.4).

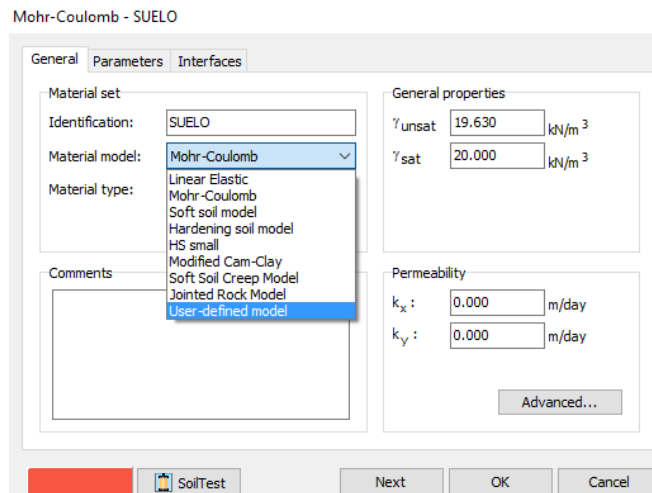


Figura 3.4. Ventana para seleccionar los parámetros iniciales de un modelo en PLAXIS2D-Version9.0.

3.3.1 Lineal Elástico:

Este modelo incluye dos parámetros de rigidez elástica:

- El módulo de Young (E)
- El coeficiente de Poisson (ν)

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Es un modelo sencillo, ya posee muchas limitaciones con relación a la simulación del comportamiento de los suelos, porque tienen una conducta no lineal e irreversible, por lo que no se aconseja su uso si lo que se quiere es estudiar la rotura o deformaciones plásticas. Este modelo se utiliza fundamentalmente en PLAXIS para modelizar materiales rígidos, como el hormigón.

3.3.2 Mohr-Coulomb:

Este modelo se utiliza como una aproximación al comportamiento del suelo en general. El modelo incluye cinco parámetros:

- El módulo de Young (E)
- Coeficiente de Poisson (ν),
- Cohesión (c),
- Angulo de fricción (ϕ),
- Ángulo de dilatancia (ψ).

El modelo Mohr-Coulomb es muy utilizado para simular el comportamiento de un suelo, ya que involucra una función de fluencia que define el límite entre el comportamiento elástico y plástico, cuyos valores dependerán del nivel de tensiones y deformaciones del material estudiado. Este criterio de fluencia es una extensión de la ley de fricción de Coulomb para un estado general de esfuerzos, y es definido a partir de una serie de funciones formuladas en términos de esfuerzos principales.

En la modelación de un suelo granular suelto o fino normalmente consolidado, se debe tener presente que no se reproduce un comportamiento elastoplástico evolutivo, sino que primero es un modelo elástico y luego pasa a ser plástico perfecto. Su formulación implica dos elementos generales: la elasticidad y la plasticidad asociada al desarrollo de deformaciones plásticas o irreversibles.

3.3.3 Soft Soil Model (Modelo de suelo blandos):

Este modelo Puede ser utilizado para simular el comportamiento de suelos blandos, como arcillas normalmente consolidadas y turbas.

3.3.4 Hardening Soil Model (Modelo de suelo con endurecimiento):

Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de arenas y gravas, así como para suelos más blandos, como arcillas y sedimentos. Su estado límite se plantea a partir de:

- Angulo de fricción (ϕ)
- Cohesión (c)
- Ángulo de dilatancia (ψ)

En este modelo, la rigidez del suelo es descrita con mucha más precisión ya que se usan como parámetros de entrada, la rigidez de carga a 50%, la rigidez de descarga del triaxial y la rigidez de carga del edómetro.

3.3.5 HS Small (Modelo de suelo con endurecimiento con deformaciones pequeñas):

Este modelo es una modificación del modelo anterior (Hardening Soil). En este se toma en cuenta el aumento de la rigidez del suelo con pequeñas deformaciones, mostrando un incremento no

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

lineal. Al igual que el modelo *Hardening Soil* no es capaz de reproducir reblandecimiento por dilatación.

3.3.6 Jointed Rock Model (Modelo de rocas con juntas):

Este modelo puede ser utilizado para simular el comportamiento de roca estratificada o fracturada.

3.3.7 User-Defined (Definido por usuario):

Este modelo de suelo es definido por el usuario. Esta opción permite la utilización de otros modelos constitutivos aparte de los modelos estándar de PLAXIS.

3.4 TIPOS DE ANÁLISIS

En el caso de la interacción agua-esqueleto del material PLAXIS 2D-Version 9.0 en *Material type* lo evalúa de tres diferentes maneras:

3.4.1 DRENADO (Drained):

Este tipo de comportamiento drenado, se usa para situaciones donde un suelo granular saturado se somete a carga lenta, o bien, un suelo arcilloso saturado se somete a cargas de largo plazo.

3.4.2 NO DRENADO (Undrained):

El caso no drenado, se usa para situaciones donde un suelo granular saturado se somete a una carga rápida (carga sísmica), o bien, un suelo arcilloso saturado se somete a cargas de corto plazo.

3.4.3 No Porosos (Non-porous):

Para caso de comportamiento no poroso, se aplica en la modelización del comportamiento del hormigón o de las estructuras en general.

3.5 CALCULATE (Cálculo)

Después de crear el modelo geométrico, seleccionar el material y los parámetros correspondientes, generar la malla de elemento finitos y establecer las condiciones de contorno, todo está listo para pasar el siguiente nivel el "calculate" (cálculo) (figura 3.5).

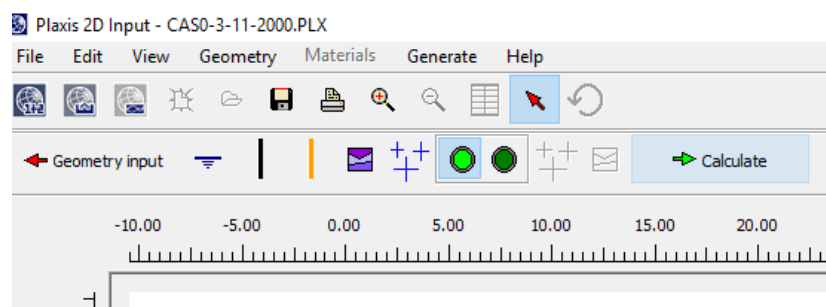


Figura 3.5. Ventana generada para el cálculo, PLAXIS2D-Version 9.0.

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Al seleccionar “calculate” (cálculo) se abre una nueva ventana, donde se puede elegir el tipo de cálculo que se quiere implementar (figura 3.6) tales como:

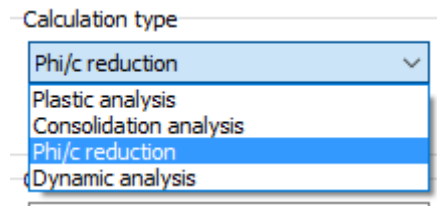


Figura 3.6. Tipos de cálculos que realiza PLAXIS2D-Version 9.0

3.5.1 Plastic analysis (Análisis Plástico):

Opción aplicada en la mayoría de las problemáticas prácticas de la geotecnia. Al seleccionar esta alternativa se efectúa un análisis de deformación elástico-plástica en el que no sea necesario tener en cuenta la disipación de los excesos de presión intersticial con el tiempo.

3.5.2 Consolidation (Consolidación):

Este análisis se selecciona cuando es necesario conocer el comportamiento o desarrollo en función del tiempo de las presiones intersticiales en un suelo saturado.

3.5.3 Phi/c reduction:

Si se quiere calcular el factor de seguridad global del modelo o situación que se está modelando, se debe seleccionar esta opción. El análisis de seguridad se ejecuta después de cada etapa de construcción (fase) o tipo de cálculo individual seleccionado.

3.6 OUTPUT (Resultados)

Esta etapa cuenta con distintos dispositivos para la presentación de los resultados analizados. Se pueden visualizar los desplazamientos, las deformaciones de la malla y/o otros elementos y los estados de tensiones activando la pestaña “Deformations” y “Stresses”.

En general ésta contiene una amplia gama de alternativas que representan el comportamiento de cada elemento del modelo al cual se le aplicó el análisis, tales como: tablas, gráficas, imágenes, etc.

3.7 CURVES (Curvas)

Una vez realizados los cálculos y generados los resultados del problema respectivo, se tiene la opción de activar el subprograma CURVES con el cual se puede obtener diversos tipos de curvas que permiten una mejor interpretación de los resultados.

En esta tesina se usa el modelo Mohr-Coulomb, así como también se realizará un análisis tanto para el caso drenado y no drenado de un mismo modelo para luego comparar los resultados con el programa GEOSTUDIO.

3.8 PLANTEAMIENTO DEL MODELO A ESTUDIAR

Con el fin de comparar los dos programas de cálculos escogidos (GEOSTUDIO y PLAXIS) se define una geometría de un talud considerando como modelo o caso base. Esta geometría coincide con la usada por F. Vargas (2015) en tesina de especialidad.

El problema a estudiar concierne en un talud, que posee un ángulo de inclinación $i = 30^\circ$, factor de profundidad hasta el manto de suelo duro $D=2$, altura del talud $H=10$ metros, y un peso específico natural del suelo de 20 kN/m^3 (figura 3.7)

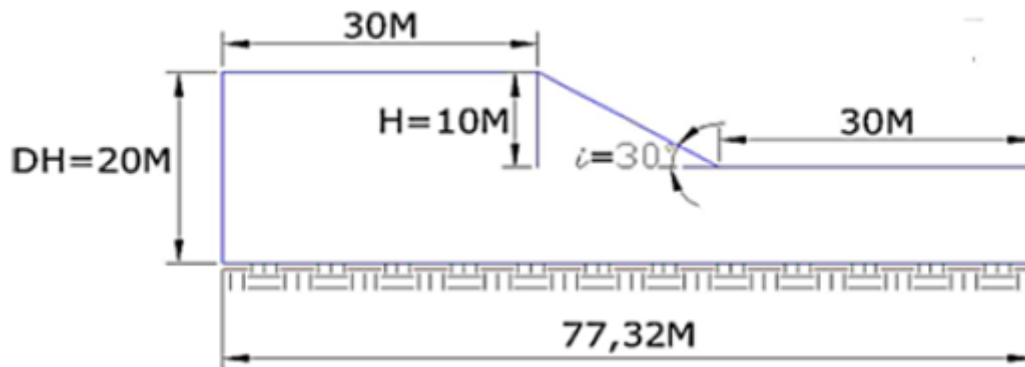


Figura 3.7. Esquema del modelo geométrico del talud a analizar.

Se elaborará un cálculo de estabilidad para 4 casos distintos. Dichos casos se describen a continuación:

3.8.1 Caso1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u = 68.8 \text{ kN/m}^2$)

Para la primera etapa del análisis se asignan las propiedades del talud considerándolo no drenado con $c=C_u$, $\phi=0$, con rotura circular, utilizando los ábacos de Taylor (figura 3.8), el cual se utiliza para calcular el factor de seguridad de taludes a corto plazo suponiendo valores de C (resistencia al corte) constantes. En sus gráficos, Taylor proporciona el factor de estabilidad $C_d/\gamma H$ en función del ángulo de talud, i , y de la profundidad de una capa rígida. C_d es la resistencia al corte movilizada: $C_d = C_u/F_s$. Por ello estos gráficos pueden usarse para calcular uno de los factores determinantes de la estabilidad (F_s , C_u , H , i) en función de los demás. (Alonso, 2005)

Suponiendo un factor de seguridad de 2 ($F_s=2$) y obteniendo $C_d/\gamma H$ del grafico de Taylor, se procede a calcular la resistencia al corte movilizada.

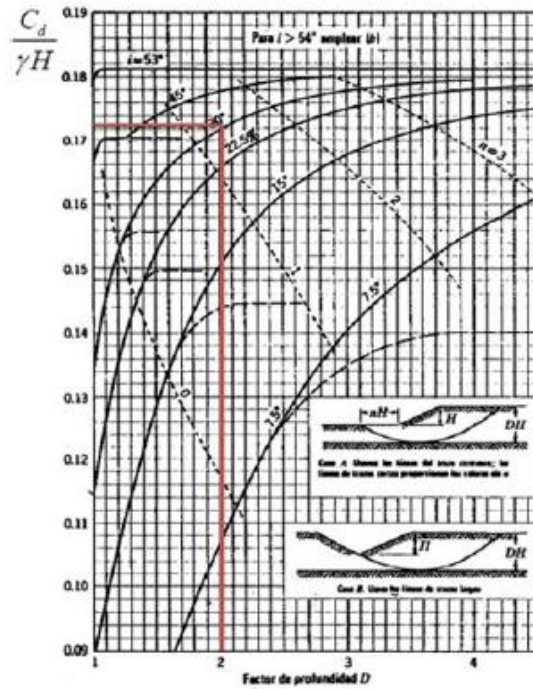


Figura 3.8. Abaco de Taylor (Alonso, 2005)

Resistencia al corte movilizada

$$C_d/\gamma H = 0.172$$

Por lo que despejando C_d se obtiene:

$$C_d = 34.4 \text{ kN/m}^2$$

Sustituyendo este valor en la ecuación $C_d = C_u / F_s$ y despejando la resistencia no drenada obtenemos que:

$$C_u = 68.8 \text{ kN/m}^2$$

Es decir, en el talud de la figura 3.7, si $C_u = 68.8 \text{ kN/m}^2$, el factor de seguridad será de 2.

3.8.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u = 34.4 \text{ kN/m}^2$)

En este caso se reducirá el valor de la resistencia no drenada inicial $C_u = 68.8 \text{ kN/m}^2$, asumiendo un factor de seguridad igual a la unidad ($F_s=1$).

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$C_u = 34.4 \text{ kN/m}^2$$

3.8.3 Caso 3: Drenado ($\phi=30$, $c=10 \text{ kN/m}^2$)

Para la misma geometría se elaborará un análisis drenado sin agua con $\phi=30$ y $c=10 \text{ kN/m}^2$ y con los mismos parámetros de las etapas anteriores para observar cual será el comportamiento del talud al variarle estas propiedades.

3.8.4 Caso 4: Drenado ($\phi=25$, $c=30 \text{ kN/m}^2$)

Esta etapa posee la misma finalidad que el anterior, pero con $\phi=25$ y $c=30 \text{ kN/m}^2$.

En cada una de los casos se elaborará un análisis del talud solo, es decir sin pilote tanto con el programa GEOSTUDIO como con PLAXIS para comparar ambos resultados y conocer cuál es la similitud de estos programas en el estudio de taludes o laderas.

Luego para cada caso se colocarán pilotes variando las posiciones desde el pie del talud y aplicando distintas fuerzas hasta obtener un factor de seguridad parecido en ambos programas y también se estudiará cual es la posición óptima de la posición de la pantalla de pilote.

A los pilotes con longitud que tocan el fondo, es decir con coordenadas verticales nula, los llamaremos pilotes largos y los posicionados a $d=L/5$ pilotes cortos. La posición de localización del pilote (S o X_f) es a partir del pie del talud. La figura 3.9 y la tabla 3.1 muestra la geometría de estos casos.

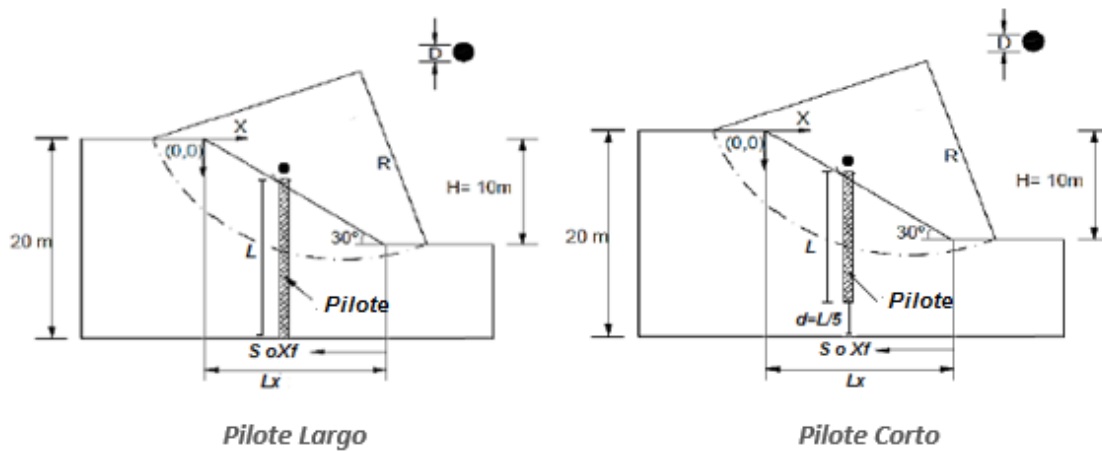


Figura 3.9. Diseño geométrico del talud con la posición del pilote largo y corto.

S o Xf (m)	Posición pilote largo (x, y)		Posición pilote corto (x, y)	
	cabeza	punta	cabeza	punta
27	(20,20)	(20,0)	(20,20)	(20,4)
15	(32,19)	(32,0)	(32,19)	(32,3.8)
11	(36,16)	(36,0)	(36,16)	(36,3.2)
5	(42,13)	(42,0)	(42,13)	(42,2.6)
0	(47,10)	(47,0)	(47,10)	(47,2)
-3	(50,10)	(50,0)	(50,10)	(50,2)

Tabla 3.1. Coordenada de las posiciones de los pilotes (en metro).

ANÁLISIS NO DRENADO (GEOSTUDIO Vs PLAXIS)

4.1 Datos generales del talud

Para poder estudiar si existe similitud al modelizar un talud, tanto por GEOSTUDIO como con PLAXIS, la geometría, condiciones iniciales y parámetros del suelo tienen que ser iguales e equivalentes al ser introducidos en ambos programas.

En este caso la modelización se elaborará utilizando como base la geometría del talud descrita en el apartado anterior 3.8, las condiciones iniciales para el análisis son sin agua, en condiciones no drenadas, con un peso específico del suelo $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, peso específico saturado de $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$. Se asumirá un valor del módulo de Young de $E = 2.00\text{E}+05 \text{ kN/m}^2$.

4.2. GEOSTUDIO

El cálculo y análisis mediante la metodología de equilibrio límite en este trabajo es utilizando el paquete SLOPE/W 2004, el cual permite realizar análisis de estabilidad de taludes, tanto en rocas como suelos utilizando los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y el método de las rebanadas.

El diseño del programa ha sido descrito en el capítulo 2.

4.2.1 Caso 1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u = 68.8 \text{ kN/m}^2$)

Este análisis parte del apartado 3.8.1, donde lo que se quiere es comprobar que se obtiene un factor de seguridad igual o similar a 2 ($FS=2$) en la modelación con los programas, ya que es el FS teórico obtenido con el ábaco de Taylor.

4.2.1.1 Modelización del talud sin pilote

Al abrir el programa hay que seleccionar una nueva creación y análisis por SLOPE/W, luego se debe establecer el método de análisis a utilizar en "Analysis Type". Para este proyecto se optó por la opción Morgenstern-Price. Luego se comienza a dibujar la geometría en la opción Sketch-Lines hasta obtener la geometría deseada y, así proceder con el menú desplegable en "Draw" a dibujar las regiones.

Las propiedades del terreno del talud son definidas en el apartado "KeyIn- Material Properties" que no son más que las características del suelo como el peso específico, la cohesión y el tipo de modelo. En este análisis se usa el modelo de Mohr-Coulomb, $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ para el peso específico,

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

un ángulo de fricción de $\phi=0$ y una resistencia al corte de $C_u= 68.8 \text{ kN/ m}^2$ en condiciones no drenadas (figura 4.1).

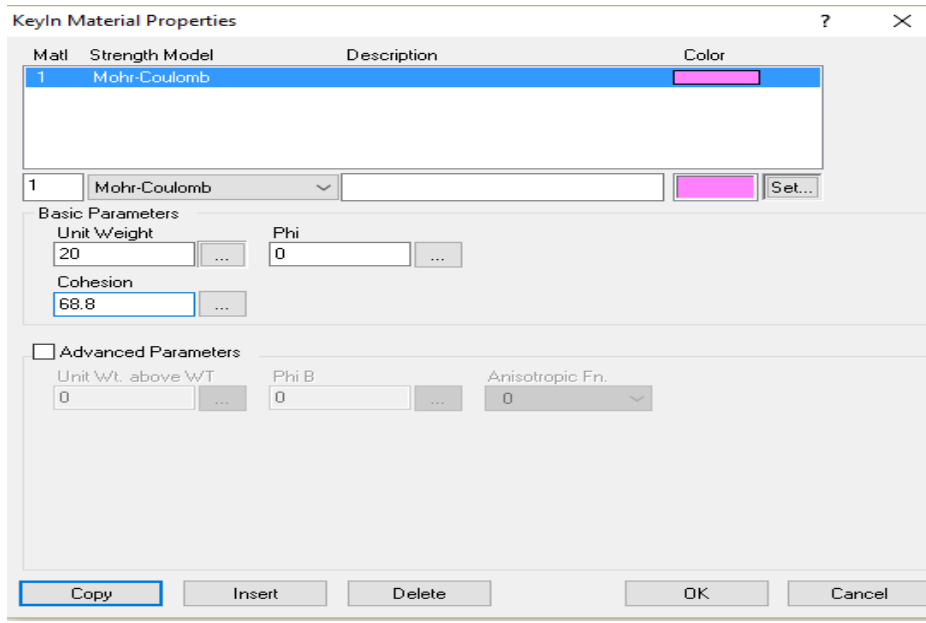


Figura 4.1. Propiedades del material GEOSTUDIO 2004.

Al aplicar el material el siguiente nivel es especificar los límites de deslizamiento. En la opción "Draw" elegimos "Slip Surface- Entry and Exit Range" para marcar los límites o puntos de la superficie de deslizamiento de entrará y saldrá del modelo.

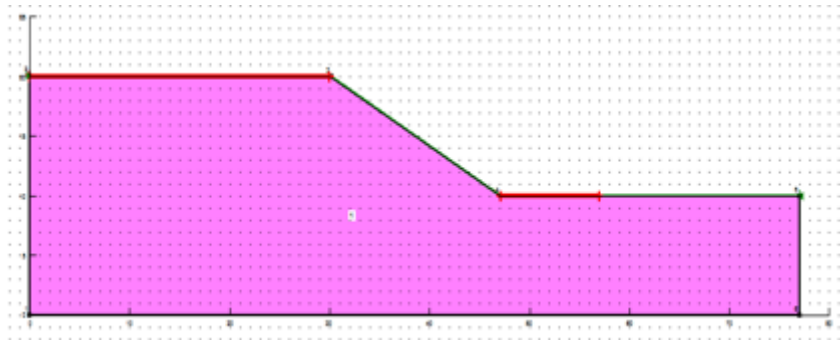


Figura 4.2. Modelo del talud dibujado en SLOPE/W 2004.

Después de haber definido la geometría, las propiedades del suelo y los límites de la superficie de deslizamiento, entonces se procede al cálculo del talud eligiendo la herramienta "SOLVE" para obtener el factor de seguridad (figura 4.3) y marcando en el icono "Contour" obtenemos la representación gráfica de la falla de deslizamiento del talud (figura 4.4).

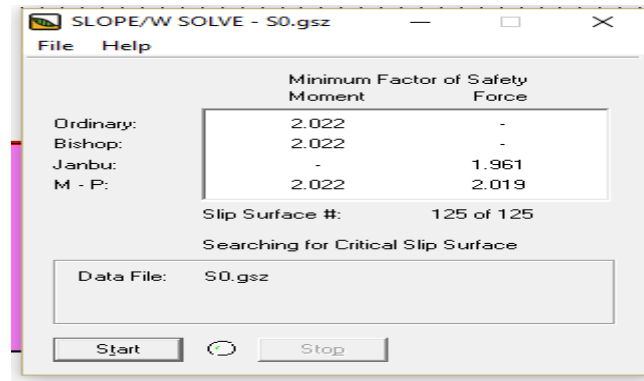


Figura 4.3. Factor de seguridad, Talud sin pilote.

Se puede observar que el valor de seguridad arrojado por SLOPE/W 2004 es similar o igual a 2 (FS=2) por todos los métodos (Ordinary, Bishop, Janbú y Morgenstern-Price), lo que corresponde al valor inicial tomado y calculado mediante la utilización del ábaco de Taylor (apartado 3.8).

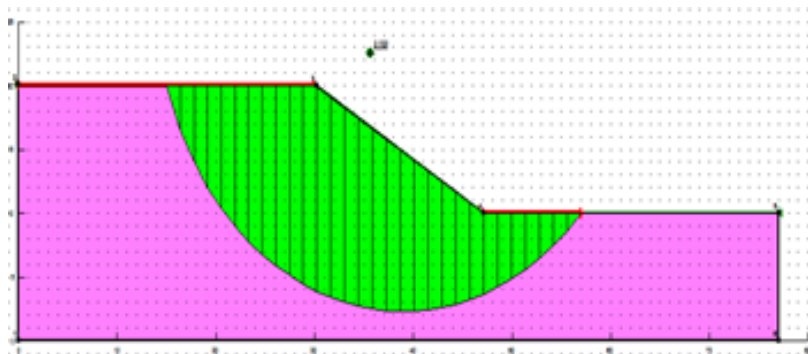


Figura 4.4. Superficie de deslizamiento en GEOSTUDIO 2004.

4.2.1.2 Modelización del talud con pilote

Para esta etapa del análisis se conservó las propiedades y geometría del talud del apartado anterior, pero se implementó la instalación de un elemento estructural (pilotes) en distintas posiciones del talud para estudiar el efecto que causa y que posición es la más óptima en esta circunstancia.

En la tesina de F. Varga (2015) se ha elaborado un análisis con pilote en GEOSTUDIO con una fuerza de 1085 kN/m por lo que a continuación se presenta un análisis para la mitad (542.5 kN/m) y el doble (2170 kN/m) de las fuerzas descritas antes, colocando el pilote a diferentes posiciones (S o X_p) y a longitudes diferentes (tabla 3.1), para así estudiar el efecto que causaría la posición y la fuerza aplicada por el elemento en el comportamiento del talud.

SLOPE/W 2004 tiene la asignación de pilotes en la herramienta "Draw Reinforcement", donde se selecciona "Dowel" para este elemento estructural y se establecen algunos datos del mismo, como el espaciamiento entre pilotes (Dowel Spacing) que es 1 m, la fuerza o esfuerzo cortante (Shear Force) que como se ha mencionado antes se considerara la mitad y el doble de 1085 kN/m o hasta obtener un valor del factor de seguridad comparable con PLAXIS, la longitud del pilote (Length) que dependerá de la posición de este y la dirección (Direction) del mismo (figura 4.5).

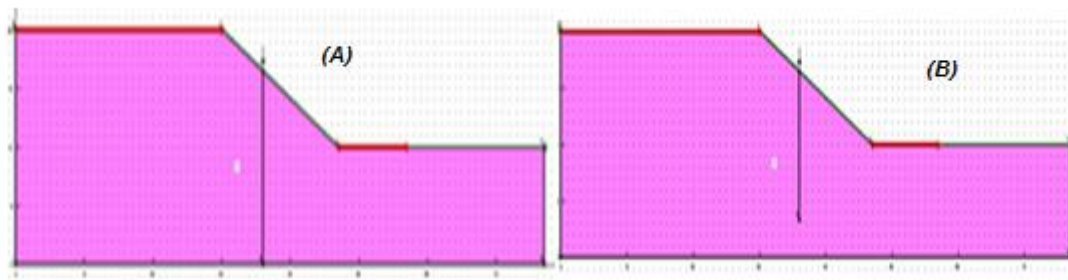


Figura 4.5. Representación del talud con pilote de $F=1085 \text{ kN/m}$, (A) Pilote largo y (B) Pilote corto en GEOSTUDIO 2004.

El procedimiento de dibujo del pilote en la geometría es simple. Se asignan las propiedades (hormigón) para cada posición y para cada fuerza modelizada. El próximo paso es el cálculo del factor de seguridad explicado en apartados anteriores. En el análisis de la fuerza de 1085 kN/m con posición $s=11\text{m}$ y coordenadas $(36,0)$ $(36,16)$ para el caso de pilotes largos se observó que se obtiene un factor de $FS=4.921$ (figura 4.6(A)) produciendo un aumento al doble de la resistencia del talud sin pilotes, mientras que para el caso de pilotes cortos su resistencia no tiene ninguna variación debido a que el pilote queda por arriba de la superficie de falla (figura 4.7 (B)).

Recuérdese que “S” o “ X_f ” es la distancia del pilote al pie del talud.

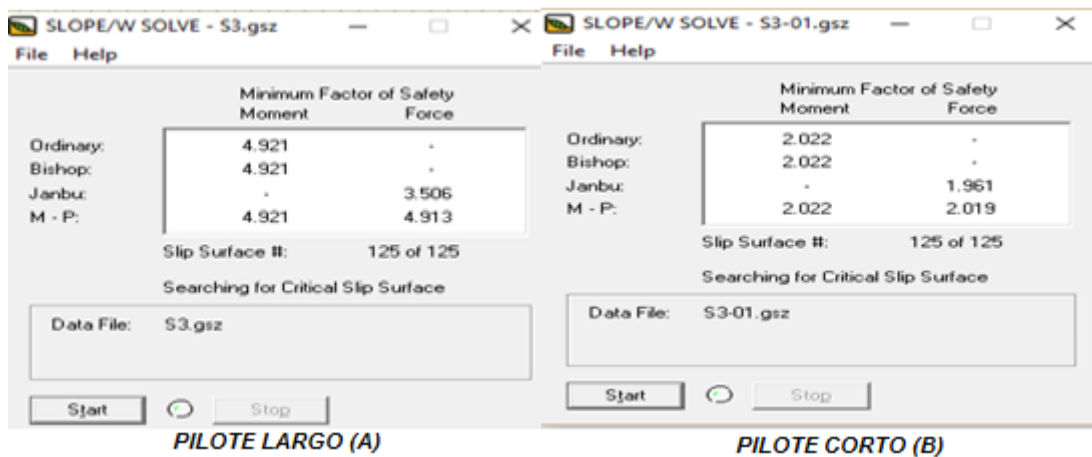


Figura 4.6. Factor de seguridad GEOSTUDIO 2004.

La figura 4.7 muestra la superficie de deslizamiento en ambos casos.

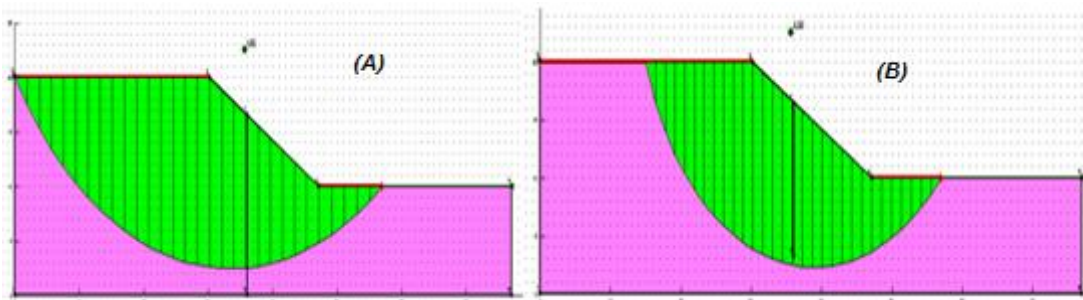


Figura 4.7. Presentación de la superficie de deslizamiento, pilote largo (A) Y pilote corto (b) en GEOSTUDIO 2004.

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

El factor de seguridad en general en los casos de pilote largo, iba aumentando a medida que se aumentaba la fuerza del pilote.

En la posición ($s=27$ m, tabla 4.1) el talud rompe por el suelo, aunque se aumente la fuerza del pilote este no aporta gran resistencia. A medida que se aumenta la fuerza de los pilotes ubicados sobre la pendiente (posiciones $s=5$, $s=11$, $s=15$ m, tabla 4.2) el factor de seguridad va aumentando. Para el doble de la fuerza $F=2170$ kN/m el análisis no fue posible, debido a que el programa arrojaba error E993 (ilustración 4.8), por lo que se redujo está a 1500 kN/m para obtener valores con que comparar los demás casos.

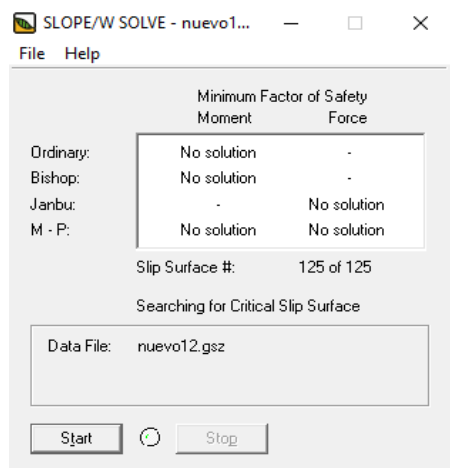


Figura 4.8. Error E993, arrojado por fuerza muy grande GEOSTUDIO 2004.

La modelación con la fuerza cortante de 2170 kN/m, no fue posible, ya que el programa mostraba el siguiente mensaje "no hay solución". El Manual indica que esto ocurre cuando el proceso de iteración que se requiere para calcular un factor de seguridad no converge a una solución o cuando una superficie de deslizamiento especificada no se cruza con la pendiente adecuada. El "Error E993" es debido a que la superficie de deslizamiento está a menor profundidad que la profundidad mínima definida. En este caso puede producirse porque la superficie de falla es tan pequeña que no considera que habrá rotura.

En los casos para pilotes cortos el talud rompe por el suelo, aunque se aumente la fuerza del pilote este no aporta gran resistencia, (observar tabla 4.2). Esto se debe a que la superficie de rotura queda muy por debajo del pilote.

Las tablas 4.1 y 4.2 presentan un resumen de la obtención del factor de seguridad obtenido para las fuerzas de 542.5 kN/m, 1085 kN/m y 1500 kN/m en el caso de la colocación de pilotes largos (tabla 4.1) y para pilotes cortos (tabla 4.2) en las distintas posiciones de las pendientes del talud modelizado.

GEOSTUDIO 2004			
PILOTES LARGOS			
	F=542.5 kN/m	F=1085 kN/m	F=1500 kN/m
S (m)	FS	FS	FS
27	2.185	2.185	2.185
15	2.914	4.921	9.119
11	2.914	4.921	9.119
5	2.914	4.921	9.119
0	2.223	2.223	2.223
-3	2.148	2.148	2.148

Tabla 4.1. Factor de seguridad en el caso de pilotes largo para las fuerzas de 542.5 kN/m, 1085kN/m y 1500 kN/m en las diferentes posiciones del talud en Geoslope 2004.

GEOSTUDIO 2004			
PILOTES CORTOS			
	F=542.5 kN/m	F=1085 kN/m	F=1500 kN/m
S (m)	FS	FS	FS
27	2.185	2.185	2.185
15	2.022	2.022	2.022
11	2.022	2.022	2.022
5	2.022	2.022	2.022
0	2.223	2.223	2.223
-3	2.148	2.148	2.148

Tabla 4.2. Factor de seguridad en el caso de pilotes cortos para las fuerzas de 542.5 kN/m, 1085kN/m y 1500 kN/m en las diferentes posiciones en GEOSTUDIO 2004

GEOSTUDIO representa el efecto del pilote como una fuerza horizontal que ayuda al equilibrio y en consecuencia al aumento de la resistencia del talud, dependiendo de dicha fuerza. El programa es sencillo de manejar, pero solo nos proporciona un factor de seguridad y la superficie de rotura próxima cuando se coloca el pilote solo a partir de esta fuerza.

4.2.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$)

Este análisis parte del apartado 3.8.2, donde lo que se quiere es obtener un factor de seguridad igual o similar a 1 ($FS=1$) en la modelación con los programas y observar cual será el comportamiento de dicho talud con los parámetros de un suelo con ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$) en condiciones no drenada.

Aquí se ha reducido el valor de C_u del caso 1 a la mitad para ver si el talud seguirá teniendo el mismo comportamiento presentado anteriormente.

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Implementando los mismos procedimientos explicados en el apartado 4.2.1.1 se analizará este caso 2 del problema geométrico planteado. La variación solo será introducida en la ventana de propiedad del material, donde se colocará el nuevo valor de la resistencia al corte de 34.4 kN/m^2 (figura 4.9).

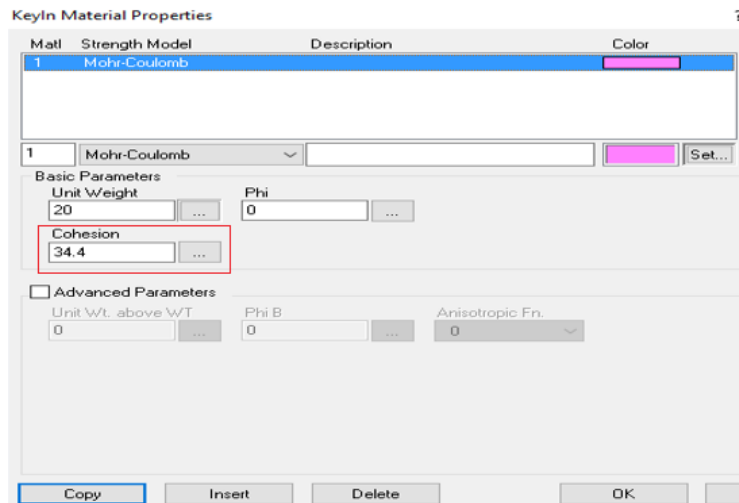


Figura 4.9. Ventana para la propiedad del material, caso con cohesión de 34.4 kN/m^2 en GEOSTUDIO 2004.

4.2.2.1 Modelización del talud sin pilote

El comportamiento del modelo geométrico para esta segunda etapa es prácticamente el mismo que el modelado en el primer caso con cohesión de 68.8 kN/m^2 , lo que ha ocurrido es que, al reducir dicho valor, también el valor del factor de seguridad se ha reducido a la mitad como se observa en la figura 4.10. La figura 4.11 muestra la superficie de deslizamiento.

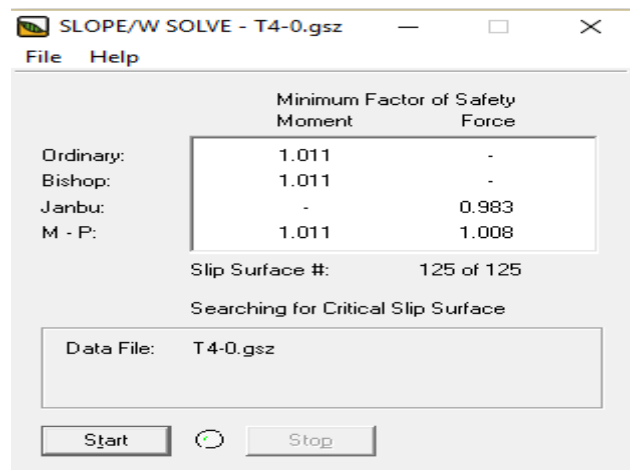


Figura 4.10. Factor de seguridad para la cohesión de 34.4 kN/m^2 en GEOSTUDIO 2004.



Figura 4.11. Representación de la superficie de deslizamiento para la cohesión de 34.4 kN/m^2 en GEOSTUDIO 2004.

4.2.2.2 Modelización del talud con pilote

Como la utilización de pilotes cortos no es muy favorable, ya que estos quedan por encima de la superficie de falla y al ocurrir esto su implementación no aporta resistencia al talud, solo se modeló en esta etapa el empleo de pilotes que toquen o se apoyen en el suelo firme, es decir, pilotes largos.

El análisis primero se hizo con la fuerza de 1085 kN/m , pero con esta los factores de seguridad obtenidos eran muy altos, por lo que se fue reduciendo dicha fuerza hasta obtener un valor en GEOSTUDIO comparable con el programa PLAXIS.

Posición del pilote	GEOSTUDIO					
	Factor de seguridad para las distintas fuerzas					
S (m)	F=300 kN/m	F=370 kN/m	F=400 kN/m	F=500 kN/m	F=600 kN/m	F=1085 kN/m
27	1.093	1.093	1.093	1.093	1.093	1.093
15	1.217	1.278	1.306	1.408	1.528	2.460
11	1.217	1.278	1.306	1.408	1.528	2.460
5	1.217	1.278	1.306	1.408	1.528	2.460
0	1.111	1.111	1.111	1.111	1.111	1.111
-3	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074	1.074

Tabla 4.3. Variación del factor de seguridad según la fuerza usando GEOSTUDIO.

Al observar la tabla (4.3) en la columna del factor de seguridad de la fuerza de 1085 kN/m y retrocediendo al cálculo del caso 1 con la resistencia al corte de 68.8 kN/m^2 (apartado 4.2.1.2, tabla 4.3), se nota que dichos valores se han reducido a la mitad derivado de disminuir en esta misma proporción la resistencia no drenada del suelo.

La figura 4.12 muestra de forma gráfica los resultados indicados en la tabla 4.3.

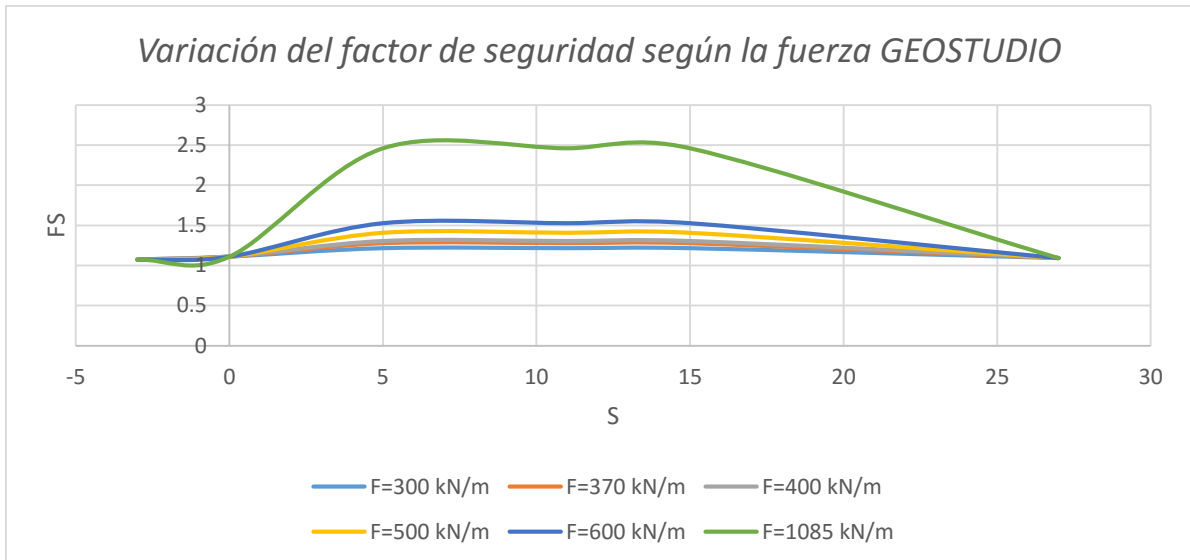


Figura 4.12. Factor de seguridad Vs. Posición del pilote (pilote largo) en GEOSTUDIO 2004.

4.2.2.3 Efecto del Factor de Seguridad

Al asumir un factor de seguridad con el ábaco de Taylor de $FS=2.00$ y obtener con este, una resistencia al corte de $C_u=68.8 \text{ kN/m}^2$, el talud romperá si la resistencia es la mitad ($C_u/2$).

Para comprobarlo se realizó un análisis con este nuevo valor de la resistencia al corte de 34.4 kN/m^2 en condiciones no drenadas y se obtuvo un factor de seguridad de $FS=1.011$, observándose que dicho factor se redujo exactamente a la mitad del que se obtuvo con la resistencia al corte de 68.8 kN/m^2 .

En el caso de la colocación de pilotes, para conocer el efecto que causará la reducción de la fuerza cortante en el factor de seguridad y estabilidad del talud, también se realizó el mismo procedimiento, para obtener la fuerza con la cual el talud rompería. Como con la implementación del pilote en la posición $s=11\text{m}$ se obtuvo un factor de seguridad de ($FS=4.921$) para la resistencia de 68.8 kN/m^2 y una fuerza cortante del pilote de 1085 kN/m (tabla 4.4), se partió de allí para calcular y obtener la fuerza con que el factor de seguridad sería igual a 1 ($FS=1$).

En la tabla 4.4 se observa que en ningunos de los dos casos (ni con la resistencia al corte de $C_u=68.8 \text{ kN/m}^2$ o con $C_u=34.4 \text{ kN/m}^2$), se obtiene dicho valor. La fuerza del talud por mínima que sea aporta resistencia al talud. Concluyendo que el efecto del factor de seguridad depende principalmente de la resistencia al corte de suelo y este valor aumentara dependiendo de la fuerza cortante del pilote.

Resistencia al corte sin drenaje Cu= 68.8 kN/m²		Resistencia al corte sin drenaje Cu= 34.4 kN/m²	
Sin Pilote 2.022		Sin Pilote 1.011	
Posición del Pilote s=11 m		Posición del Pilote s=11 m	
FS	Fuerza Cortante kN/m	FS	Fuerza Cortante kN/m
4.921	1085	2.460	1085
2.690	440	1.154	220
2.308	220	1.132	190
2.143	100	1.098	140
2.081	50	1.071	100
2.057	30	1.040	50
2.045	20	1.022	20

Tabla 4.4. Factor de Seguridad vs. La Fuerza Cortante para la resistencia al corte de 68.8 kN/m² y 34.4 kN/m². Buscando la fuerza cortante del pilote donde romperá el talud.

4.3 PLAXIS

En PLAXIS la cantidad de parámetros a introducir en el análisis dependerá del modelo constitutivo que se va a utilizar. En este caso se utiliza el modelo Mohr-Coulomb por lo que es necesario especificar propiedades del suelo como el módulo de Young y el coeficiente de Poisson.

4.3.1 Caso 1: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 68.8 \text{ kN/m}^2$)

En esta parte se realizará la modelización con la metodología de elemento finitos utilizando el programa PLAXIS descrito en el capítulo 3 de este trabajo, utilizando la geometría y las propiedades del talud planteado en el apartado 3.8.

4.3.1.1 Modelización talud sin pilote

Al abrir el programa PLAXIS el primer paso es ajustar algunos parámetros en el apartado "General Setting", tales como unidades, tipo de modelo que para este proyecto será ("Plane Strain"), o sea, deformación plana porque se considerará una geometría en 2D y el tipo de elemento a utilizar que será 15 nodos debido a que este proporciona doce puntos de evolución de tensiones (puntos de Gauss). Esto proporciona una gran exactitud en los resultados en los problemas geotécnicos complejos.

La creación de la geometría del talud se inicia pulsando en el icono "Geometry line", donde se dibujará un polígono cerrado que constituirá un dominio (cluster) al que se le pueden asignar

cualquier conjunto de datos de diferentes suelos y así analizar de forma independiente según se quiera (figura 4.13).

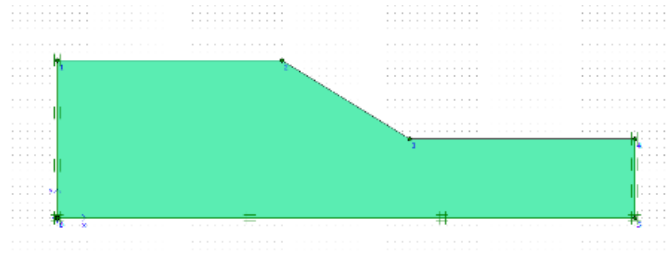


Figura 4.13. Modelo geométrico del talud en PLAXIS 2D-Version 9.0

La propiedad de los materiales es el siguiente paso a dar, el cual se introduce en el apartado "Materials" (materiales)- Soil & interfaces (suelo e interfaces). Aquí se introduce el modelo del material (Mohr-Coulomb), tipo de modelo "Undrained" (No drenado) y las propiedades y parámetros generales como: peso específico del suelo, peso específico saturado, módulo de Young, coeficiente de Poisson, cohesión y ángulo de fricción (figura 4.14).

Figura 4.14. Especificación de las propiedades y parámetros del suelo, PLAXIS.

Definido el modelo geométrico y las propiedades y parámetros del suelo en todos los dominios, se debe generar la malla que no es más que la división de la geometría en elementos finitos con el fin de realizar el cálculo. PLAXIS 2D-Version 9.0 tiene varios niveles de mallado, en este caso se seleccionó una malla de grado medio (figura 4.15).

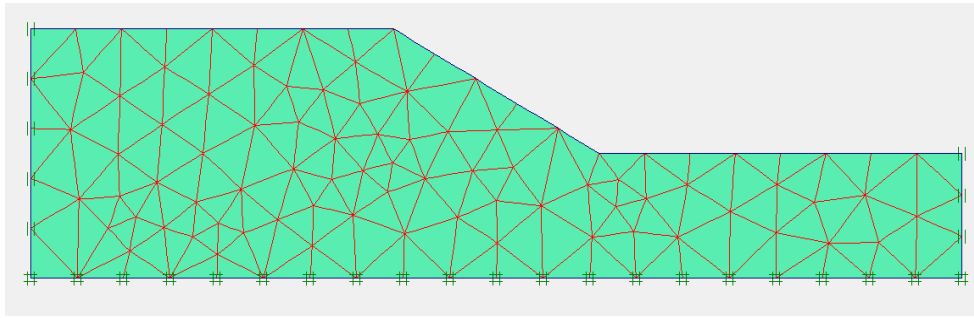


Figura 4.15. Representación de la malla caso sin pilote, PLAXIS.

Una vez generado la malla de elemento finitos de debe asignar las condiciones iniciales del talud. Aquí se especifica las presiones iniciales del agua y las tensiones iniciales del problema. Para el modelo, debido a que no se contempla la presencia de agua, las condiciones iniciales referentes al flujo son obviadas.

El cálculo para el modelo se elaboró simulando dos fases (figura 4.16):

1. Fase 1: Plastic analysis (análisis plástico, simulación del peso propio)
2. Fase2: Phic/c- reduction (para obtener el factor de seguridad global del problema). PLAXIS reduce progresivamente la resistencia (la divide por el factor de seguridad) hasta que el cálculo no converge y se tiene rotura.

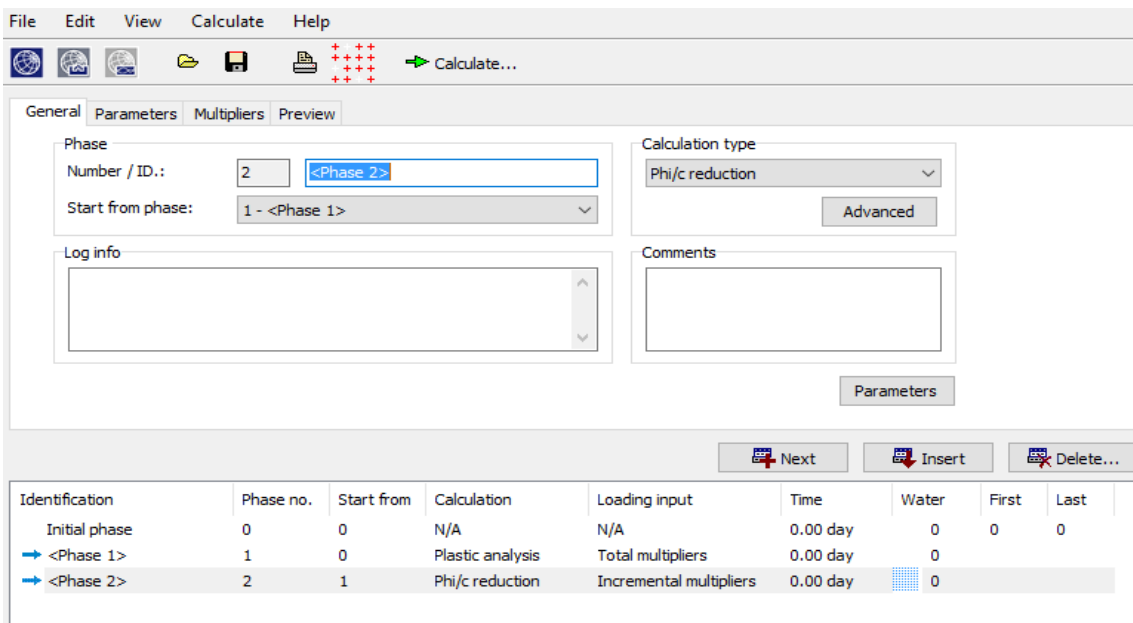


Figura 4.16. Configuración de las fases de cálculo del talud, PLAXIS.

Especificado esto y pulsando en “Calculate” se procede a calcular y se abrirá otra ventana, donde se puede visualizar los resultados correspondientes para cada fase de cálculo seleccionada. PLAXIS output como se ha descrito en el capítulo 3 posee varias herramientas para visualizar y analizar los resultados obtenidos del problema modelado.

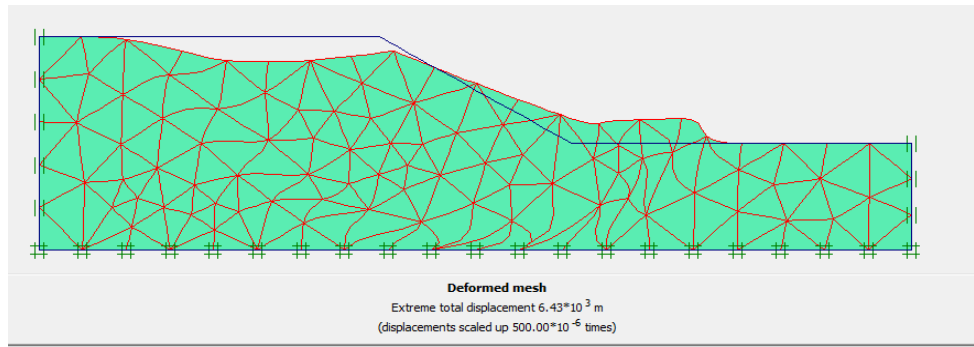


Figura 4.17. Deformación de la malla, talud sin pilote en PLAXIS.

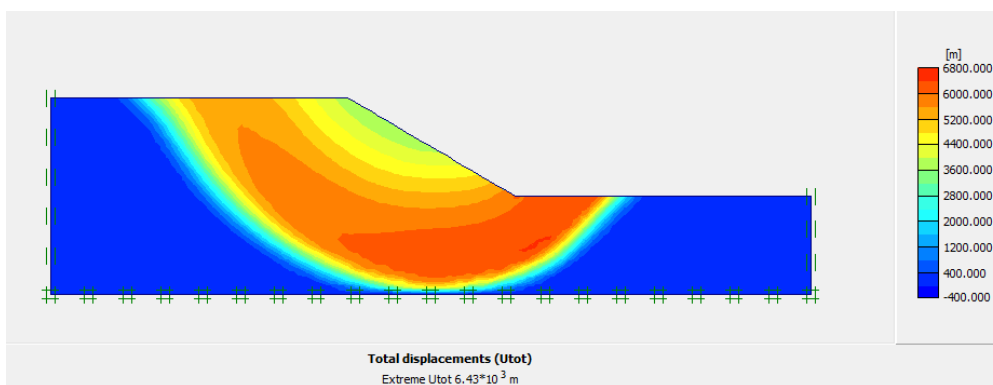


Figura 4.18. Representación de los desplazamientos totales, talud sin pilote en PLAXIS.

En la figura 4.17 nos muestra cual es la deformación que sufrió la malla de elementos finitos para un talud sin pilote con las características y parámetros introducidos. El valor arrojado del desplazamiento total 6.43×10^{-3} m es muy alto debido a que corresponde a un cálculo donde se produce la rotura y ya no hay equilibrio en el talud. No es por tanto un valor realista, sino un resultado numérico de un análisis donde no hay convergencia. En la figura 4.18 se puede observar los desplazamientos totales generados, donde por las condiciones del talud este llega a rotura y que el mayor desplazamiento se produce cerca del pie del talud.

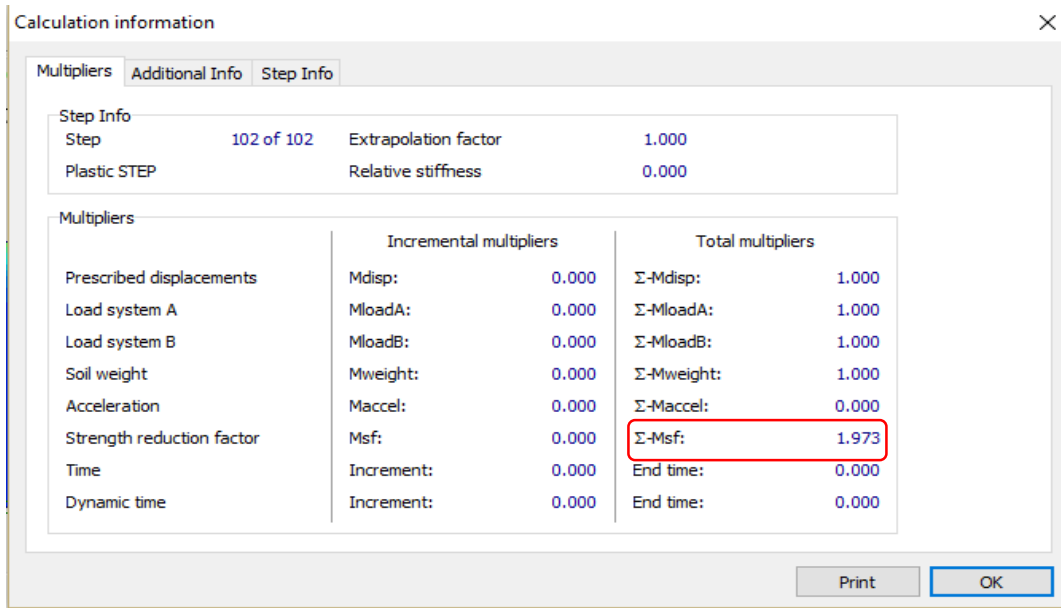


Figura 4.19. Factor de seguridad, talud sin pilote en PLAXIS.

El factor de seguridad para el talud sin pilote es $FS=1.973$ (figura 4.19) muy próximo al calculado con el ábaco de Taylor (2), esa pequeña variación puede deberse a un mínimo margen de error numérico en el cálculo.

4.3.1.2 Modelización talud con pilote

Para la modelación con elementos estructurales como pilotes en PLAXIS se requiere del conocimiento o especificación de una serie de parámetros como: la rigidez axial (EA), la rigidez a flexión (EI), espesor equivalente (d), peso (W), relación de Poisson (ν), momento máximo (M_p) y el axial máximo (N_p). A continuación, se presenta la tabla 2.4 especificando estos datos, los cuales son asumidos de valores estándar de una pantalla de pilotes de hormigón de 1 m de diámetro y tangentes entre sí.

El análisis se hizo utilizando el modelo constitutivo del pilote "Elastoplástico" aplicando valores para el momento flector (M_p -kNm/m) y el axil máximo (N_p -kN/m) del pilote iguales, variando dichas propiedades desde 1000, 2000 y 4000 hasta obtener un valor del factor de seguridad en las distintas posiciones igual o parecido al arrojado en el análisis por GEOSTUDIO. La geometría, las propiedades y parámetros del terreno del problema se conservaron iguales.

PILOTE			
TIPO DE COMPORTAMIENTO	PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
RIGIDEZ NORMAL	EA	1.96E+07	kN/m
RIGIDEZ A FLEXION	EI	1.23E+06	kN/m ²
ESPESOR EQUIVALENTE	d	0.87	m
PESO	W	21.65	kN/m
RELACION DE POISSON	V	0.2	

Tabla 4.5. Características principales del pilote.

La herramienta "Plate" (placa)(figura4.20) es el icono utilizado para simular el pilote con PLAXIS, estos elementos son utilizados para modelizar estructuras esbeltas en el terreno. La elaboración de placas en el modelo geométrico es similar a la creación de líneas geométricas (figura 4.20 y 4.21).

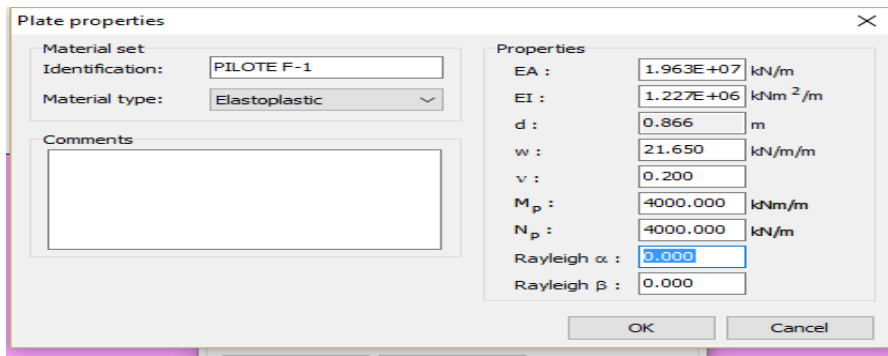


Figura 4.20. Ventana para las propiedades del pilote en PLAXIS.

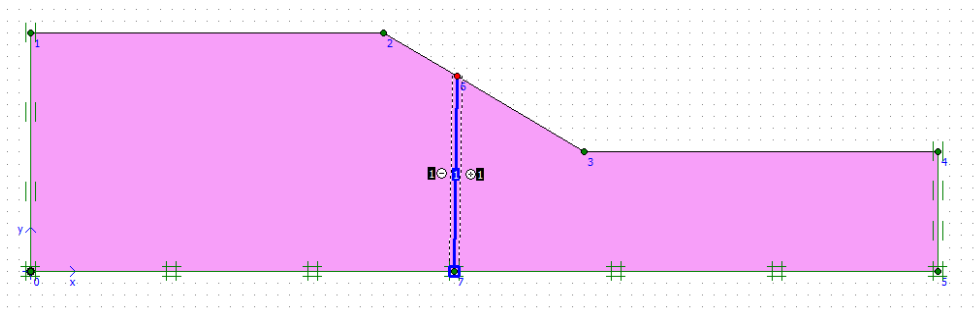


Figura 4.21. Representación del talud con pilote (posición s=11m) en PLAXIS.

El cálculo del factor de seguridad obtenido para el caso de colocación del pilote en la posición s=11m es de FS= 2.220 en pilote largo y FS= 1.939 para el pilote corto, se produce un ligero aumento de la resistencia global del talud con la opción (A) del pilote figura 4.22.

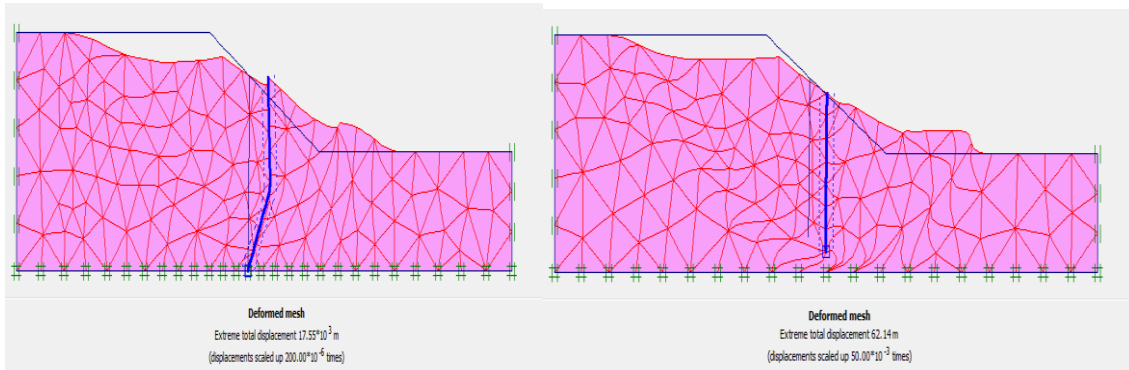


Figura 4.22. Deformada de la malla del talud con el pilote en la posición $s=1m1$ ((A) pilote largo y (B) pilote corto), en PLAXIS.

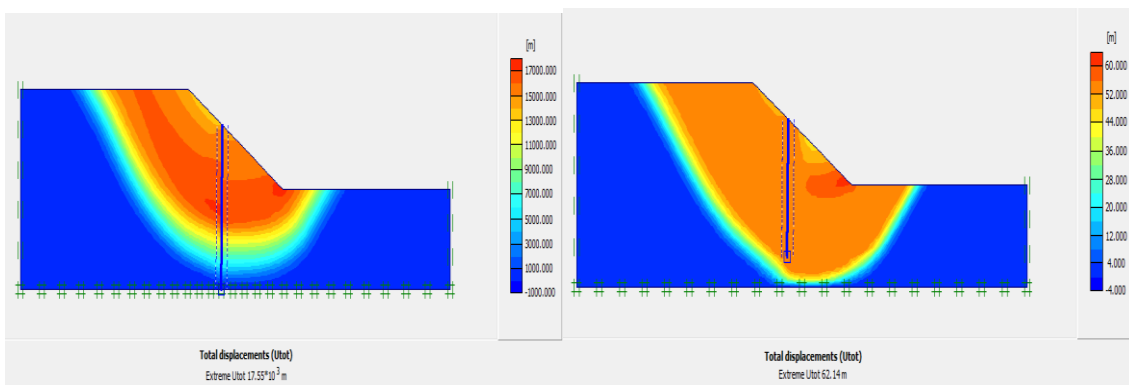


Figura 4.23. Representación de los desplazamientos totales, con el pilote en la posición $s=11m$ ((A) pilote largo y (B) pilote corto) en PLAXIS.

Aunque el factor de seguridad ha aumentado colocando el pilote en la posición $s=11m$, se puede observar en la (figura 4.23) que el talud sigue estando en rotura en ambos casos, pero con mucho menos movimientos o desplazamiento que el talud sin pilote, aunque los movimientos no son reales, porque corresponden a un cálculo donde no hay equilibrio.

En las tablas (4.6 y 4.7) se observa que tanto para pilotes largos como para pilotes cortos el factor de seguridad va aumentando a medida que se va aumentando el valor del momento flector y el axial máximo del pilote para las distintas posiciones analizadas.

PLAXIS			
<i>PILOTES LARGOS</i>			
<i>S (m)</i>	<i>Np, Mp = 1000</i>	<i>Np, Mp = 2000</i>	<i>Np, Mp = 4000</i>
27	1.877	2.093	2.068
15	2.012	2.145	2.206
11	2.040	2.220	2.367
5	2.124	2.197	2.305
0	2.090	2.138	2.194
-3	2.082	2.080	2.082

Tabla 4.6. Factor de seguridad obtenido en PLAXIS para pilotes largos. (Np es en kN/m y Mp en $kN m/m$).

PLAXIS			
PILOTES CORTOS			
S (m)	Np, Mp =1000	Np, Mp =2000	Np, Mp =4000
27	1.856	1.857	1.859
15	1.862	1.881	1.891
11	1.894	1.895	1.939
5	1.960	1.960	1.965
0	2.002	2.002	2.010
-3	2.051	2.051	2.051

Tabla 4.7. Factor de seguridad obtenido en PLAXIS para pilotes cortos. (Np es en kN/m y Mp en kN m/m).

En la colocación del pilote corto, se ve que este no influye mucho y el talud rompe por el suelo. El factor de seguridad tiene un ligero aumento a medida que se va aumentando el Mp y Np del pilote, pero no es conveniente ya que el pilote queda por encima de la superficie de rotura.

4.3.2 Caso 2: No Drenado ($\phi=0$, $C_u= 34.4 \text{ kN/ m}^2$)

4.3.2.1 Modelización talud sin pilote

Aplicando los anteriores procedimientos del programa PLAXIS paso a paso, ahora se modelo la del caso 2 del problema.

El factor de seguridad del modelo geométrico sin pilote para la cohesión de 34.4 kN/ m^2 obtenido es de 0.983 (FS=0.980), prácticamente igual al asumido (1). Al reducir el valor de la resistencia al corte sin drenaje del suelo, el factor de seguridad del talud también ha disminuido.

La figura 4.24 muestra los desplazamientos calculados. Los valores numéricos no son realistas, pero sí que se ve la zona de la superficie de rotura, por el cambio de color.

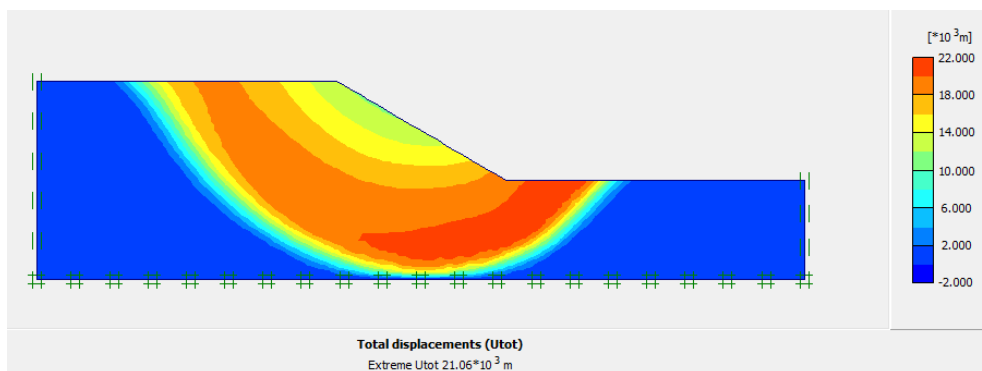


Figura 4.24. Representación de la superficie de deslizamiento de matices con la resistencia al corte de 34.4 kN/ m^2 en PLAXIS.

4.3.2.2 Modelización talud con pilote

En la modelación con pilotes para el caso 2, solo se elaboró el análisis para los casos de pilotes largos, con las mismas características del caso 1, pero con momento máximo (M_p) y axial máximo (N_p) igual a 4000 (N_p en kN/m y M_p en $kN\ m/m$) para ver si los resultados se acercaban más los que se obtuvieron con GEOSTUDIO.

Se ha seleccionado el tipo de interfaz con se quiere trabajar: Rígida o Manual. En la manual se introdujo el valor del factor de reducción de resistencia inter (R_{inter}) de 0.67, valor típico que supone una interfaz con una rugosidad intermedia. Este valor indica que la resistencia a corte de las interfaces pantalla-suelo es un 67% de la resistencia al corte. La rígida corresponde a un valor de un 100% de esta relación, por lo que se analizó ambos casos y los resultados obtenidos del factor de seguridad no mostraron diferencias notables.

Los resultados obtenidos para el momento máximo (M_p), axial máximo (N_p) de 4000 y resistencia al corte sin drenaje de $34.4\ kN/m^2$ muestran que la colocación de los pilotes en las posiciones ($s=15$, $s=11$ y $s=5$ m) aporta mejor resistencia a la estabilidad del talud (figuras 4.25 y 4.26).

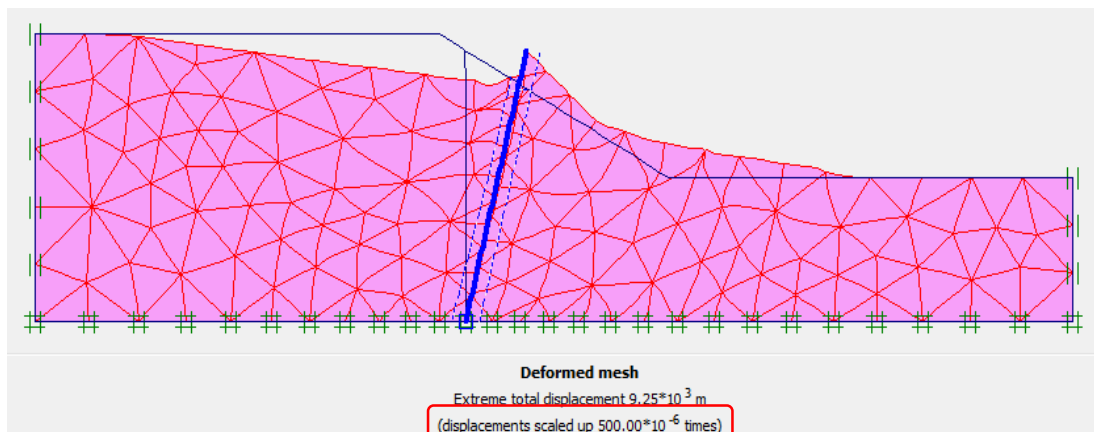


Figura 4.25. Deformación de la malla con el pilote en la posición $s=15$ m, para la resistencia al corte de $34.4\ kN/m^2$ PLAXIS.

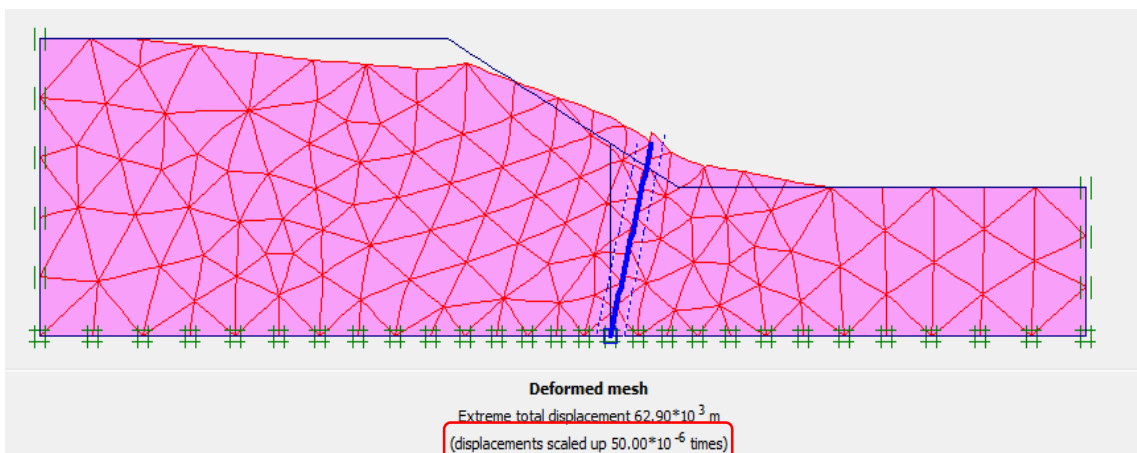


Figura 4.26. Deformación de la malla con el pilote en la posición $s=5$ m, para la resistencia al corte de $34.4\ kN/m^2$ PLAXIS.

El desplazamiento máximo sufrido para la colocación del pilote en la posición $s=15m$ (Figura 4.24) es de $9.25 \times 10^3 m$ y el factor de seguridad arrojado es de 1.279 ($FS=1.279$), mientras que para $s=5m$ el desplazamiento es de $62.90 \times 10^3 m$ con $FS= 1.255$ (figura 2.26). Como se ha indicado antes, los desplazamientos en rotura no son realistas, pero el patrón de desplazamiento es útil cualitativamente. Como se muestra en ambas figuras, los desplazamientos totales más importante se producen en la zona de la corona del talud.

4.4 Comparación de resultados GEOSTUDIO vs PLAXIS

Una vez culminado los cálculos y el estudio del modelo planteado, es preciso realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con los programas GEOSTUDIO Y PLAXIS.

Para los casos 1 y 2 del análisis del modelo geométrico presentado, se puede concluir diciendo que en el análisis del talud sin pilote el factor de seguridad obtenido en ambos programas (GEOSTUDIO y PLAXIS) es igual al asumido con el ábaco de Taylor, con un margen de diferencia de 0.049 en el caso 1 y 0.031 en el caso 2. Esto puede ocurrir debido a los parámetros de entrada del suelo, ya que el programa PLAXIS requiere de más propiedades intrínseca del suelo de lo que usa GEOSTUDIO, por lo es más preciso.

Factor de seguridad		
Sistema utilizado	Caso 1	Caso 2
Asumido (Abaco Taylor)	2.000	1.000
GEOSTUDIO	2.022	1.011
PLAXIS	1.973	0.980

Tabla 4.8. Factores de seguridad obtenidos sin pilote en el talud, casos 1 y 2 en GEOSTUDIO Y PLAXIS.

En los casos con pilotes se puede decir que tanto para pilotes largos como para pilotes cortos los factores de seguridad arrojados por GEOSTUDIO Y PLAXIS son muy distintos, no existe similitud en estos. Este comportamiento ocurre debido a que el análisis de elementos estructurares en ambos programas se elabora de maneras distintas. GEOSTUDIO para analizar la colocación de pilotes solo considera el espaciamiento entre estos y la fuerza cortante, mientras que PLAXIS utiliza el diámetro equivalente, peso, las rigideces normales y a flexión, así como el momento flector y el axial máximo del pilote (figura 4.27).

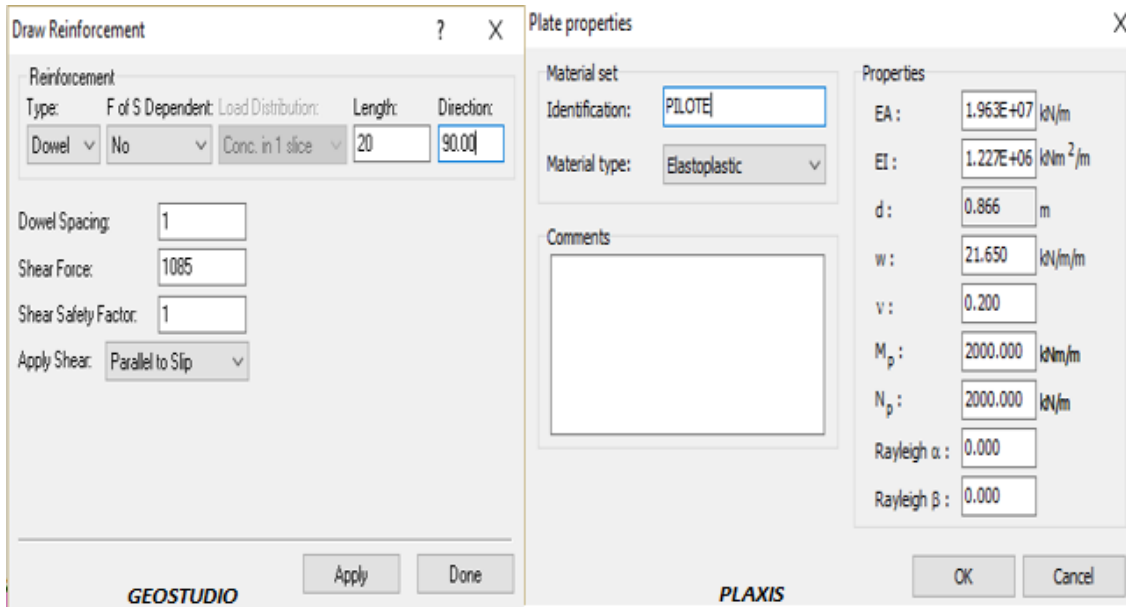


Figura 4.27. Entrada de datos para el pilote, GEOSTUDIO Vs PLAXIS.

En el caso 1 de la modelización con pilotes largos la superficie de rotura atraviesa el pilote. En pilotes largos, la superficie de rotura pasa por el pilote, o sea que este rompe. A medida que se aumenta en PLAXIS el valor del momento flector (M_p) y el axial máximo (N_p), y en GEOSTUDIO la fuerza cortante el factor de seguridad aumenta. Pero los resultados no son comparables en ninguno de los casos.

GEOSTUDIO arroja los mismos valores siempre para las posiciones ($s=15$, $s=11$ y $s=5$ m), es decir que están pilotes sobre la pendiente, por lo que con este programa no sería posible obtener el punto o la posición más óptima de colocar el pilote. También de las tres fuerzas cortantes aplicadas la menor de ellas ($F=542.5$ kN/m) es la que ofrece resultado un poco parecido a lo que se obtuvo en PLAXIS con el análisis del momento flector y axial máximo más grande (M_p , $N_p=4000$) (M_p -kNm/m y N_p - kN/m) y aun así este quedó por abajo (figuras 4.28 y 4.29).

Caso 1				Pilotes Largos			
PLAXIS				GEOSTUDIO			
S (m)	N_p, M_p = 1000	N_p, M_p =2000	N_p, M_p =4000	S (m)	$F=542.5$ kN/m	$F=1085$ kN/m	$F=1500$ kN/m
27	1.877	2.093	2.068	27	2.185	2.185	2.185
15	2.012	2.145	2.206	15	2.914	4.921	9.119
11	2.040	2.220	2.367	11	2.914	4.921	9.119
5	2.124	2.197	2.305	5	2.914	4.921	9.119
0	2.090	2.138	2.194	0	2.223	2.223	2.223
-3	2.082	2.080	2.082	-3	2.148	2.148	2.148

Tabla 4.9. Factor de seguridad para caso 1 y pilotes largos en las diferentes posiciones, (Pilotes largos) PLAXIS Vs. GEOSTUDIO. (N_p - kN/m y M_p - kN m/m).

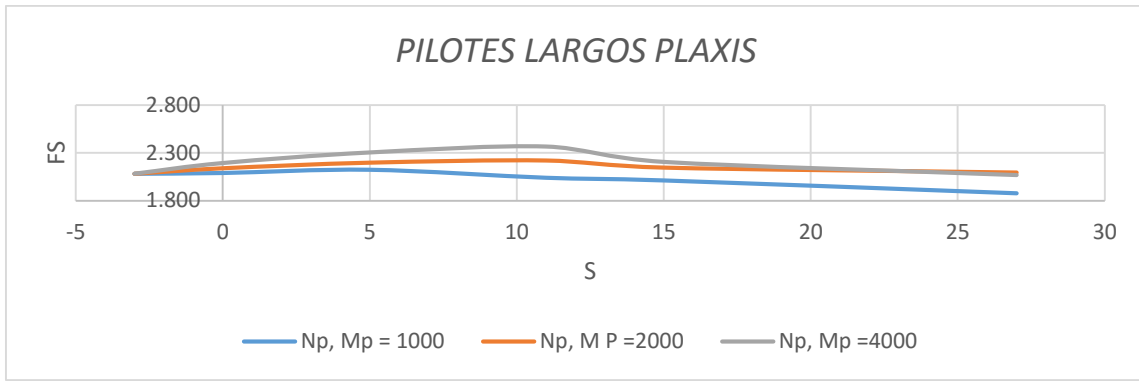


Figura 4.28. Factor de seguridad vs Posición del pilote (pilote largo) en PLAXIS. (N_p -kN/m y M_p - kN m/m).

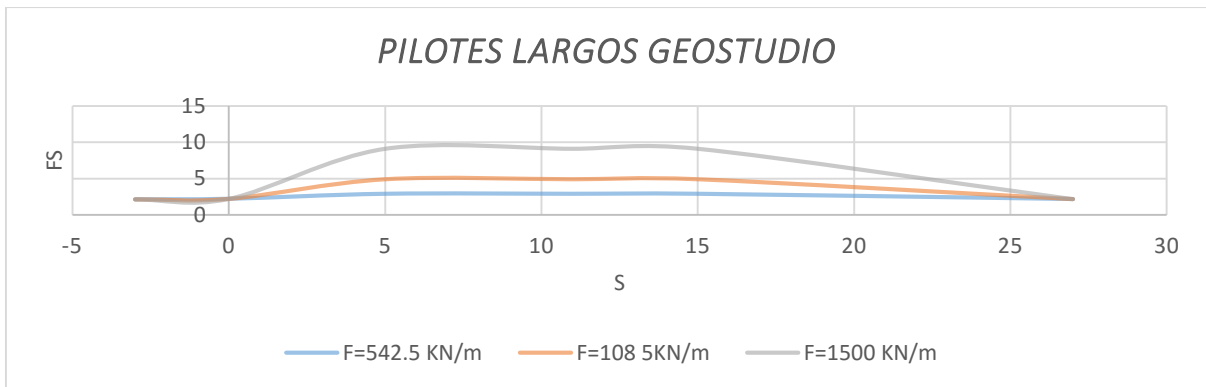


Figura 4.29. Factor de seguridad Vs. Posición del pilote (pilote largo) en GEOSTUDIO.

En el caso de la implementación de los pilotes cortos en ambos programas el talud rompe en general por el suelo, debido a que en la mayoría de las posiciones este quedaba por encima de la superficie de deslizamiento. Para las tres (3) fuerzas cortantes asignadas en GEOSTUDIO, este proporciona el mismo valor del factor de seguridad de 2.022 ($FS=2.022$) (tabla 4.10) de manera que, aunque se aumente la fuerza el pilote no causa ningún efecto. Mientras que en PLAXIS, aunque el talud sigue estando en rotura, a medida que se mejora las condiciones del pilote el factor de seguridad aumenta, pero muy poco, ya que la superficie de rotura pasa por debajo del pilote (figuras 4.30 y 4.31).

Caso 1				Pilotes Cortos			
PLAXIS				GEOSTUDIO			
S (m)	$N_p, M_p = 1000$	$N_p, M_p = 2000$	$N_p, M_p = 4000$	S (m)	F=542.5 kN/m	F=1085 kN/m	F=1500 kN/m
27	1.856	1.857	1.859	27	2.185	2.185	2.185
15	1.862	1.881	1.891	15	2.022	2.022	2.022
11	1.894	1.895	1.939	11	2.022	2.022	2.022
5	1.960	1.960	1.965	5	2.022	2.022	2.022
0	2.002	2.002	2.010	0	2.223	2.223	2.223
-3	2.051	2.051	2.051	-3	2.148	2.148	2.148

Tabla 4.10. Factor de seguridad, caso 2 (Pilotes cortos) GEOSTUDIO Vs. PLAXIS. (N_p - kN/m y M_p - kN m/m).

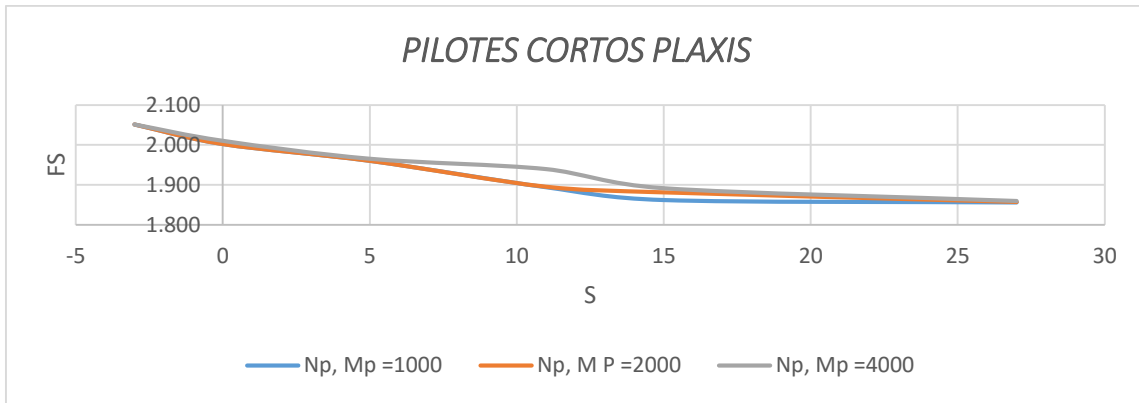


Figura 4.30. Factor de seguridad Vs. Posición del pilote (pilote corto) en PLAXIS. (Np- kN/m y Mp- kN m/m).

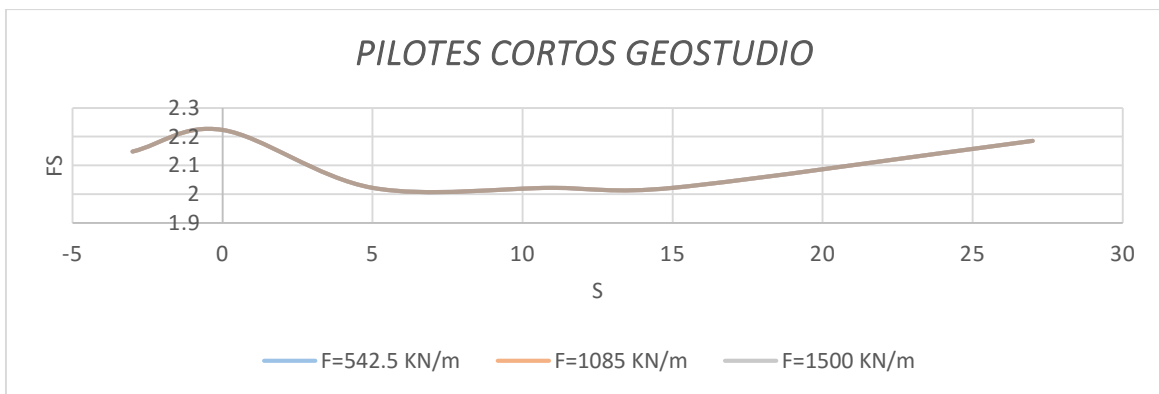


Figura 4.31. Factor de seguridad Vs. Posición del pilote (pilote corto) en GEOSTUDIO 2004.

Que el caso 2 del análisis, los resultados de los de pilotes cortos no fueron muy satisfactorios solo se planteó los casos para los pilotes a gran profundidad (pilotes largos).

Como en GEOSTUDIO para la fuerza cortante de 1085 kN/m y 1500 kN/m los factores de seguridad están muy por encima de los obtenidos en PLAXIS, se consideró bajar dicha fuerza para ver si se obtenían valores similares. Con el objetivo de obtener una relación entre las dos fuerzas máximas y el momento flector máximo, se tanteo el valor de la fuerza cortante que se debía aplicar en el programa GEOSTUDIO después de visualizar la que obtuvo con PLAXIS. Pulsando en la pantalla de PLAXIS sobre el pilote, este programa nos da la opción de poder ver los desplazamientos totales, el momento flector, la fuerza axial y la fuerza còrtate que se producen en este elemento (figura 4.32).

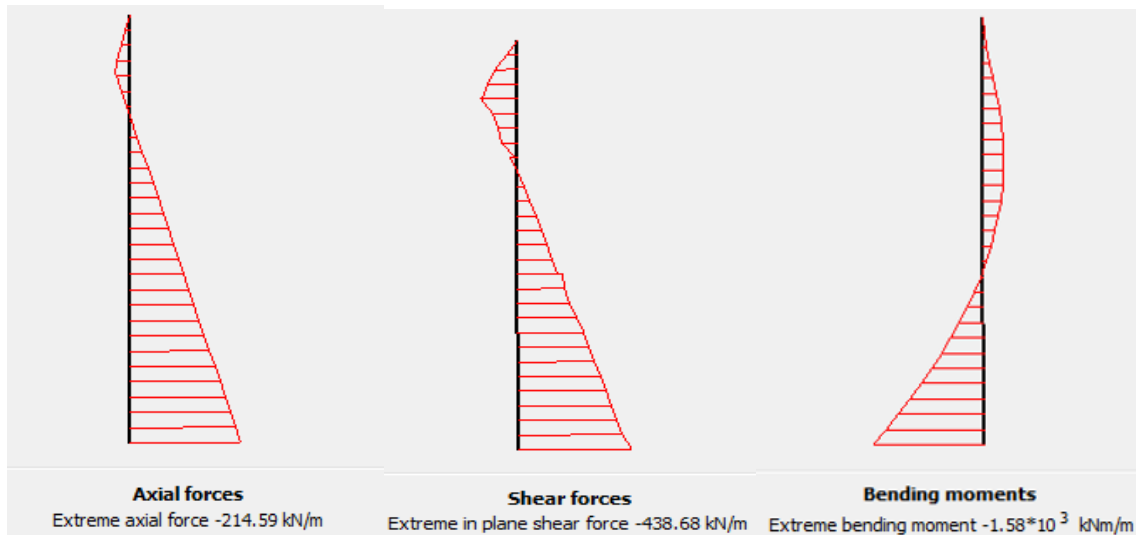


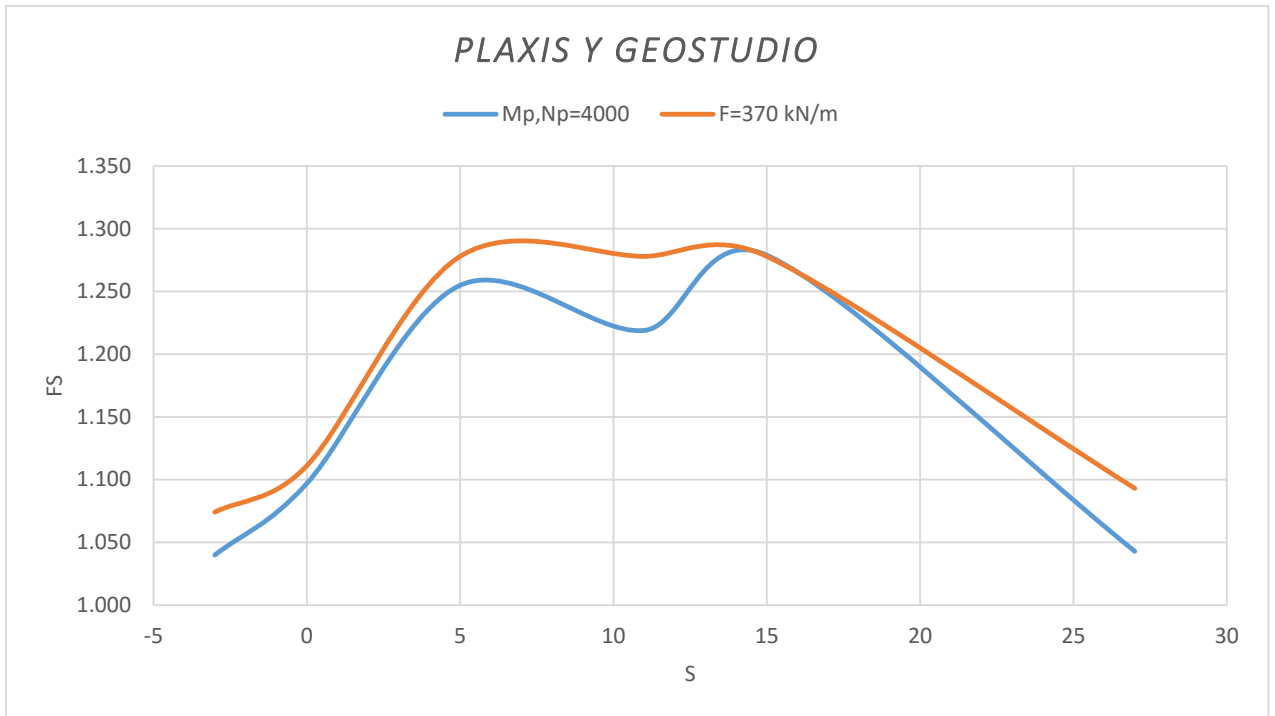
Figura 4.32. Fuerza axial, Fuerza cortante y momento flector para el pilote en $S=5\text{m}$ con M_p y $N_p=4000$ (N_p - kN/m y M_p - kN m/m), PLAXIS.

El proceso de reducción de la fuerza cortante y análisis en GEOSTUDIO, no fue coherente con la fuerza cortante "Shear forces" obtenidos en los cálculos de PLAXIS en ningunos de los casos. La fuerza que más se acercaba a los resultados fue con 370 kN/m ($F=370$ kN/m). La siguiente tabla 4.11 contiene un resumen de los factores de seguridad adquirido para dicha fuerza en GEOSTUDIO y las diferentes fuerzas cortantes que se obtuvieron para el momento flector y axial máximo de 4000 (M_p , $N_p=4000$) (N_p - kN/m y M_p - kN m/m) en PLAXIS para el caso 2 de la modelización del talud.

Caso 2		PLAXIS	GEOSTUDIO
S (m)	Shear forces (plaxis) kN/m	FS para M_p , $N_p=4000$	FS para $F=370$ kN/m
27	263.04	1.043	1.093
15	596.65	1.279	1.278
11	623.93	1.219	1.278
5	634.64	1.255	1.278
0	507.66	1.097	1.111
-3	434.30	1.040	1.074

Tabla 4.11. Fuerza cortante y factor de seguridad para el caso 2, PLAXIS Vs. GEOSTUDIO. (N_p - kN/m y M_p - kN m/m)

Al observar las fuerzas de cizallamiento (fuerza cortante) arrojada en PLAXIS, se notó que son casi todas más grandes que la fuerza aplicada en GEOSTUDIO. Pero aun con esta incongruencia, los factores de seguridad son casi semejantes. Esto se debe a que en el programa PLAXIS prefija primero el tipo de comportamiento que tendría el elemento estructural con las rigideces normales y a flexión (EA y EI), diámetro equivalente (d), peso (w) generando un caso más real. En cambio, GEOSTUDIO solo considera el espaciamiento del pilote, la fuerza cortante y la aplicación de la fuerza siendo algo conservador. Las dos metodologías de análisis son por tanto muy difíciles de comparar.



Grafica 4.33. Variación del factor de seguridad con las posiciones de los pilotes PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, caso 2. (N_p -kN/m y M_p -kN m/m).

En la figura 4.33 se puede observar que para una $F=370$ kN/m los factores de seguridad arrojados tienen un comportamiento similar para las distintas posiciones de los pilotes tanto en PLAXIS como en GEOSTUDIO. Cabe destacar que por lo que se observa la mejor posición en estos casos para la colocación de los pilotes es cercana al pie del talud ($S=5$ m).

Aun si resulta difícil la comparación entre los programas por la diferencia de los factores empleado. Ya que el comportamiento de las fallas depende de las magnitudes que se colocan a los parámetros máximos de los pilotes.

Hay que tener en consideración que estamos trabajando con una estructura que se comporta de forma elastoplástica, que tiene la posibilidad de adoptar un comportamiento elástico lineal hasta un valor de esfuerzo llamado tensión de proporcionalidad y a partir de allí comportarse de modo plástico hasta alcanzar la tensión de rotura. Debido a esto, PLAXIS agrega el momento plástico máximo (M_p) del pilote y la fuerza axial máxima (N_p) del mismo. Consideración que el programa GEOSTUDIO no menciona.

Las figuras 4.34- 4.39 muestra la comparación de las superficies de falla GEOSTUDIO Vs. PLAXIS, para las seis (6) posiciones de análisis de los pilotes, en este caso 2, con resistencia al corte sin drenaje de $c=34.4$ kN/ m², fuerza cortante en GEOSTUDIO de 370 kN/m, momento flector (M_p -kNm/m) y axial máximo (N_p -kN/m) de 4000 en PLAXIS.



Figura 4.34. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=27m$.

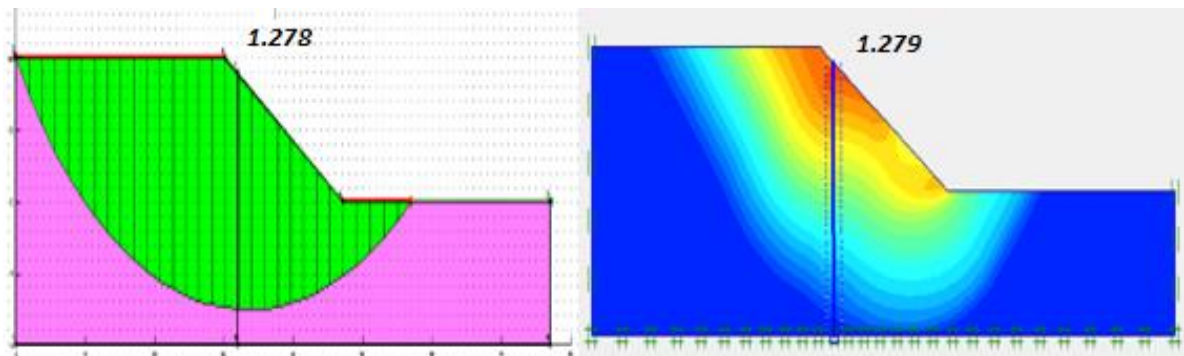


Figura 4.35. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=15m$.

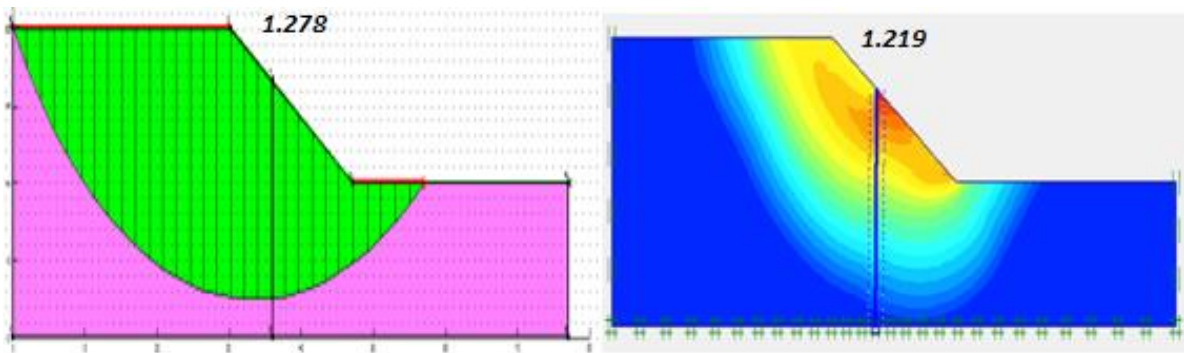


Figura 4.36. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=11m$.

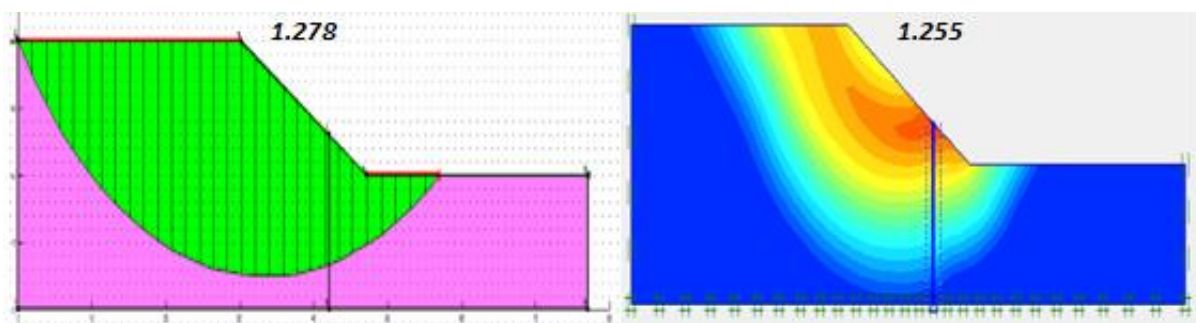


Figura 4.37. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=5m$.

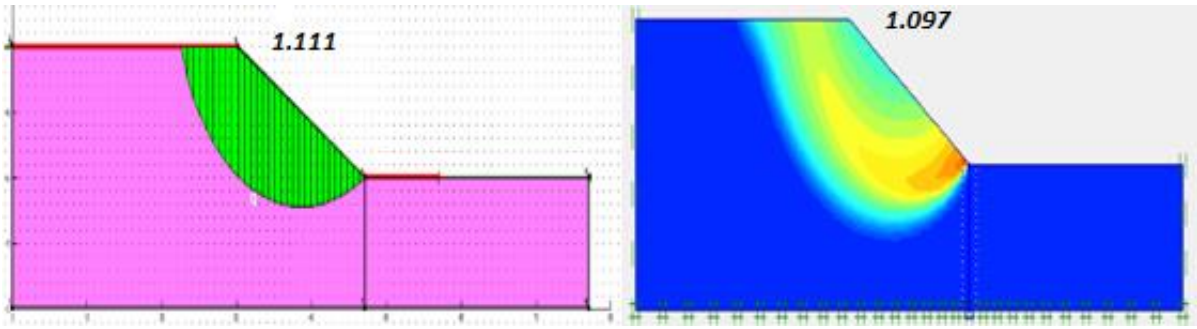


Figura 4.38. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=0m$.

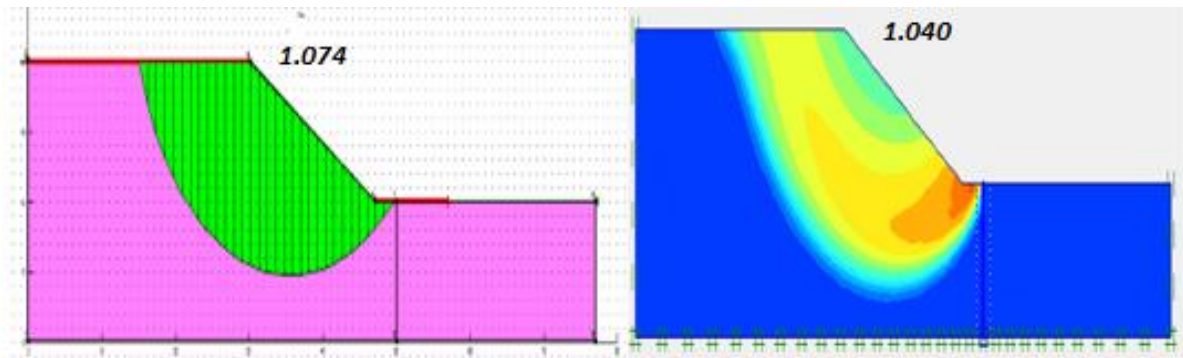


Figura 4.39. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, posición del pilote $s=-3m$.

En la mayoría de los casos el arco de la superficie de falla en cada posición de colocación de los pilotes es muy parecido en ambos programas, a pesar de que trabajan con metodología y técnicas diferentes. Aun así, se ha visto que la comparación entre los programas es difícil. GEOSTUDIO es aplicable si no se tienen muchos datos geotécnicos del suelo y las especificaciones del pilote y se quiere obtener una idea de cómo será la superficie de falla o si se requiere de un análisis rápido de la situación, pero por el contrario si se tienen todos los datos, se quiere ser más preciso y elaborar un estudio muy detallado del problema, PLAXIS es la opción recomendable.

ANÁLISIS DRENADO (GEOSTUDIO Vs PLAXIS)

5.1 Datos del talud

En este apartado se estudiará el efecto de la rotura en condiciones drenada en la estabilidad del talud con o sin pilotes.

En esta sección se analizarán el modelo geométrico planeado en el apartado 3.8, para una situación donde la presión intersticial se disipa durante el proceso de rotura, o sea, en el caso drenado. La línea del agua estará colocada en las coordenadas ((0,0) y (0,77.32)) por lo que el análisis se realizará sin el fluido en el interior del talud como se muestra en la figura 5.1.

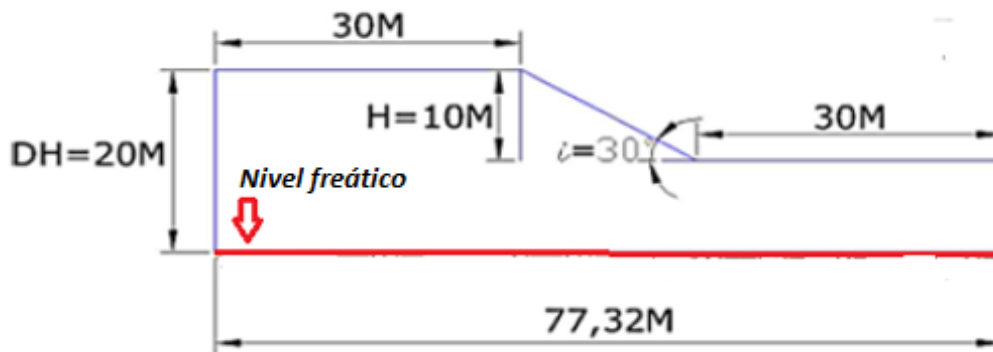


Figura 5.1 Modelo geométrico para el caso drenado.

5.2 Caso 3: Drenado ($\phi=30$, $c=10 \text{ kN/m}^2$) y Caso 4: Drenado ($\phi=25$, $c=30 \text{ kN/m}^2$)

El análisis conservará casi todas las propiedades con lo que se modeló el problema en el capítulo 4 para los casos 1 y 2 en condición no drenada. Los parámetros del terreno para los casos 3 y 4 como la resistencia al corte y el ángulo de fricción, serán los únicos datos modificados, para así observar el comportamiento del talud estando en condiciones drenadas sin agua para dos situaciones distintas.

Las características detalladas de los casos 3 y 4 están descritas en el apartado 3.8.

5.3 GEOSTUDIO 2004

GEOSTUDIO no posee una herramienta en particular para el cálculo de condición no drenada o drenada, sino que tiene la opción de dibujar las líneas piezométricas en el talud. Con la opción "Draw Piezometric Lines" se puede dibujar por donde pasan la línea de presión de agua en cualquier problema, si es que se conoce dicho dato (figura 5.2). en el caso drenado se usa la resistencia al corte drena (c' , ϕ') y en el caso no drenado se usa la resistencia al corte sin drenaje (C_u).

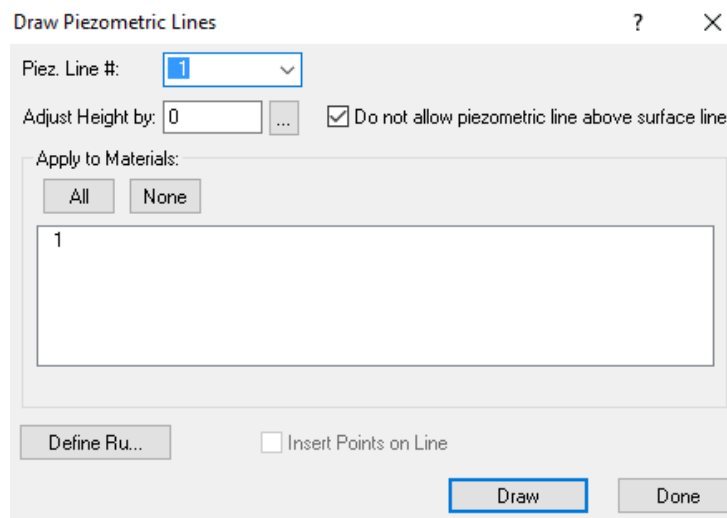


Figura 5.2 Ventana para dibujar las líneas piezométricas en GEOSTUDIO.

Tras haber dibujado el talud y asignarle los parámetros del suelo se procede a crear la línea de nivel freático, que en esta ocasión está al fondo del modelo como se indica en la figura 5.1.

5.3.1 Modelización del talud sin pilote

En condiciones drenadas la modelación del talud sin pilote para el caso 3 ($\phi=30$, $c=10$ kN/ m²) proporcionó un factor de seguridad de 1.722 ($FS= 1.722$) mostrando una superficie de deslizamiento pequeña (figura 5.3 izquierda), mientras que para el caso 4 ($\phi=25$, $c=30$ kN/ m²) el factor de seguridad obtenido fue de 2.367 ($FS=2.367$) con una superficie profunda que en el caso 3 (figura 5.3 derecha).

El factor de seguridad aumenta a medida que va aumentando el ángulo de fricción y la resistencia al corte del suelo.

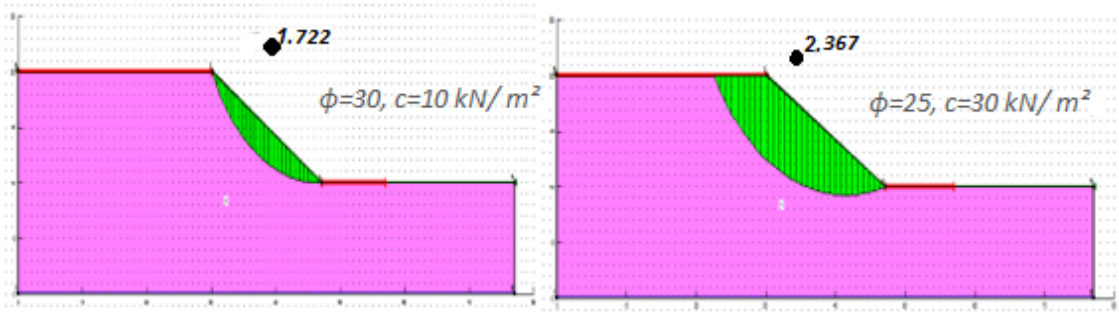


Figura 5.3. Superficie de falla para los casos 3 y 4 del modelo sin pilote en GEOSTUDIO. El punto indica el centro del círculo de rotura y se indica al lado el valor del factor de seguridad.

5.3.2 Modelización del talud con pilote

En la implementación de pilotes para la condición drenada (largo plazo) en los casos 3 y 4 solo se ha utilizado pilotes largos con la fuerza cortante de 370 kN/m, ya que estos aportaban mayor resistencia en la estabilidad del talud y se asemejaba más a los resultados obtenidos con PLAXIS. Se ha seguido las pautas descritas en los apartados anteriores sobre la modelación de taludes con este elemento estructural.

De las seis (6) posiciones analizadas, tres (3) de ellas fueron la que arrojaron los valores más altos del factor de seguridad. Estos valores se obtuvieron al colocar los pilotes en las posiciones $s=15$, $s=11$ y $s=5$ m sobre la pendiente, tanto para el caso 3 como para el 4. Este valor iba aumentando a medida que nos acercábamos al pie del talud.

Las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 muestran a la derecha el caso 3 con ($\phi=30$, $c=10$ kN/m²) y a la izquierda el caso 4 con ($\phi=25$, $c=30$ kN/m²) para las posiciones de los pilotes ($s=15$, $s=11$ y $s=5$ m), donde se observa que el factor de seguridad en la posición $s=5$ m cercana al pie del talud es el de mejor resultado.

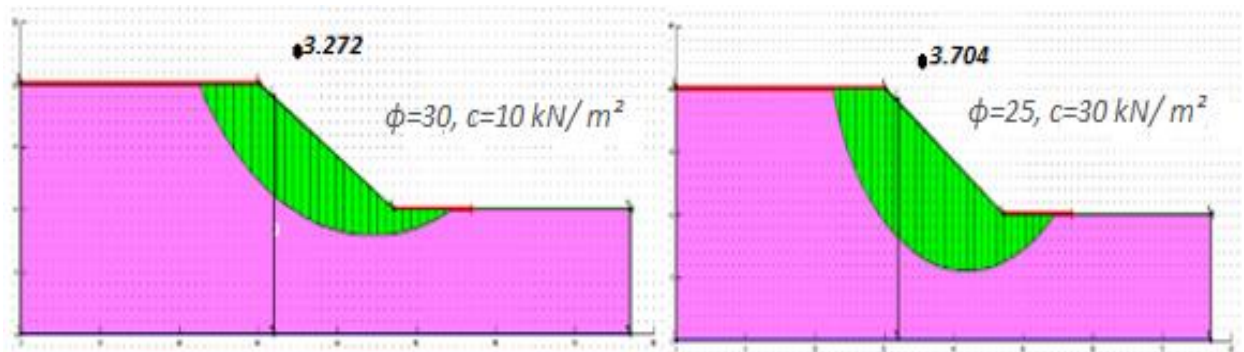


Figura 5.4. Superficie de falla para los casos 3 y 4, con el pilote en la posición $s=15$ m GEOSTUDIO. El punto marca el centro del círculo de rotura y el factor de seguridad.

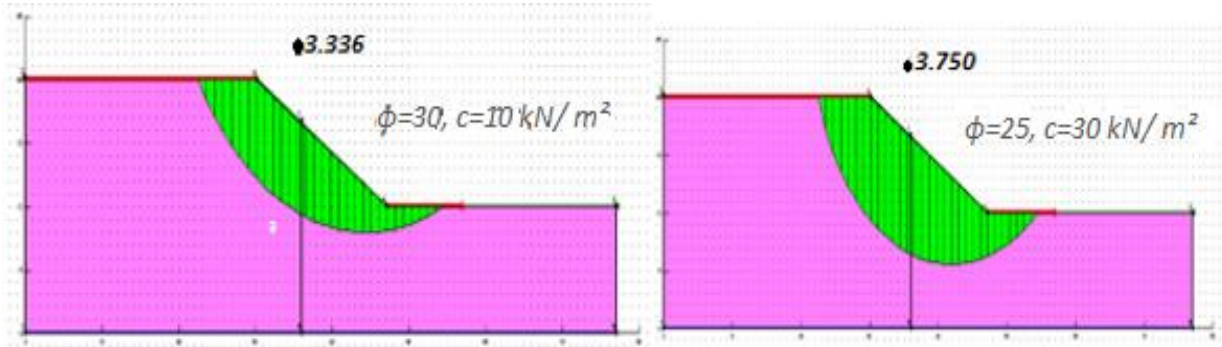


Figura 5.5. Superficie de falla para los casos 3 y 4, con el pilote en la posición $s=11\text{m}$ GEOSTUDIO. El punto marca el centro del círculo de rotura y el factor de seguridad.

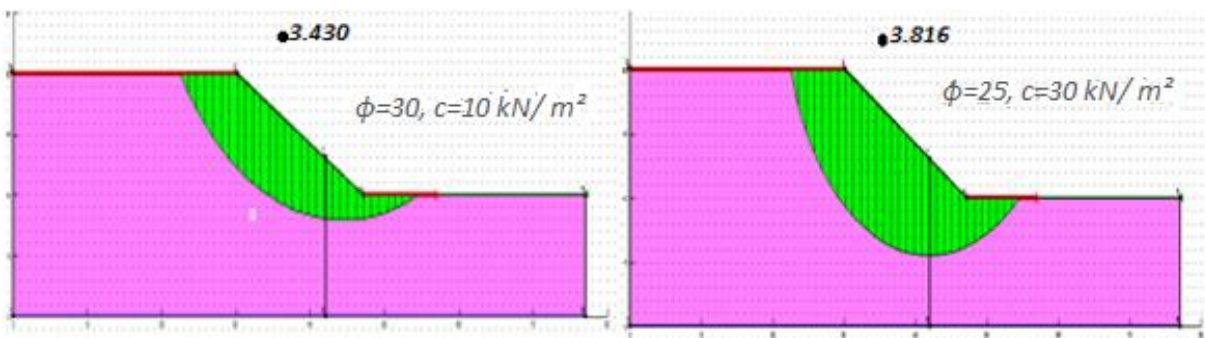


Figura 5.6. Superficie de falla para los casos 3 y 4, con el pilote en la posición $s=5\text{m}$ GEOSTUDIO. El punto marca el centro del círculo de rotura y el factor de seguridad.

5.4 PLAXIS

Como se ha expuesto anteriormente el programa PLAXIS posee la opción para el análisis de un modelo en condiciones drenada. Al colocar las características del suelo y sus interfaces, en material type se debe seleccionar la condición del modelo, que en este caso se ha indicado "Drained" (drenado) (figura5.7).

Se ha de colocar las modificaciones en las propiedades y parámetros del suelo para el análisis de los casos 3 y 4 del modelo, colocando los nuevos valores de la cohesión y del ángulo de fricción del suelo y conservando los demás datos introducidos en el estudio de los casos 1 y 2 en condiciones no drenadas resuelta en el capítulo 4.

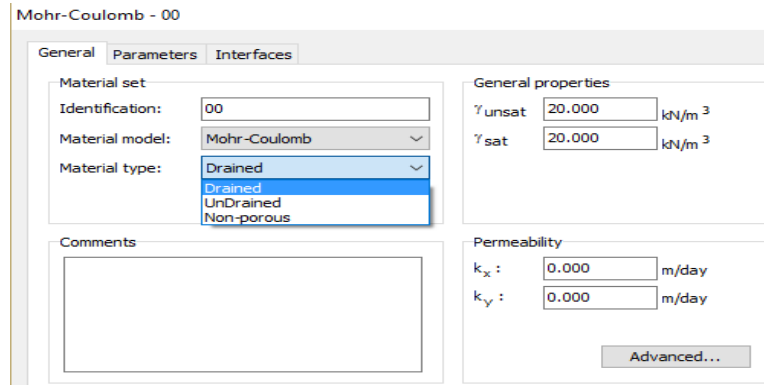


Figura 5.7. Ventana para asignar el tipo de modelo al calcular PLAXIS.

Después de la generación del mallado, se ha de aplicar las condiciones iniciales al modelo que en estas etapas de la modelación se ha indicado que el nivel freático está ubicado en la base del talud como ve en la figura 5.8.

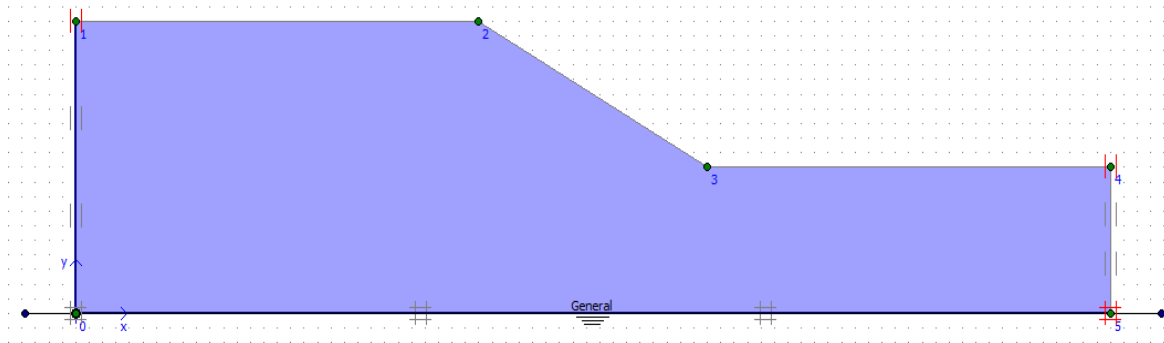


Figura 5.8. Vista del nivel freático indicado en el modelo PLAXIS.

5.4.1 Modelización talud sin pilote

Ya completado todos los pasos del cálculo, los resultados obtenidos en los casos 3 y 4 para el talud sin pilotes en condiciones drenada fue de un factor de seguridad de 1.716 ($FS=1.716$) (figura 5.9 izquierda), de 2.273 ($FS=2.273$) (figura 5.9 derecha).

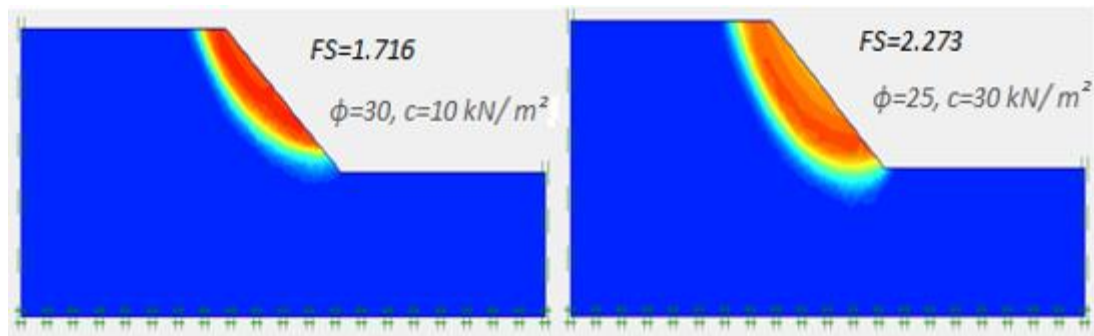


Figura 5.9. Representación de la superficie de falla, para los casos 3 y 4 del talud sin pilote, PLAXIS.

5.4.2 Modelización talud con pilote

El análisis con pilotes en PLAXIS ya ha sido explicado en capítulos anteriores, por lo que se procedió a seguir cada paso utilizando las nuevas condiciones del talud para estudiar y conocer cuál sería el comportamiento de la ladera con estas propiedades.

Como en GEOSTUDIO, solo se ha utilizado pilotes largos en la modelación del talud para ambos casos. Se utilizó un momento máximo (M_p - kNm/m) y un axial máximo (N_p -kN/m) de 4000, ya que con este valor se obtuvo mejor resultado en el caso no drenado del capítulo 4. Las demás propiedades del pilote se conservaron iguales, especificadas en el apartado anterior.

Las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 muestran los resultados obtenidos.

Para el caso 3 ($\phi=30$, $c=10$ kN/m²) la mejor posición fue para $s=11$ m con un factor de seguridad de 2.076 (FS=2.076) (figura 5.11 izquierda), mientras que para el caso 4 ($\phi=25$, $c=30$ kN/m²) fue para la posición de $s= 5$ m más cercana al pie con un valor del factor de seguridad de 2.749 (FS=2.749) (figura 5.12 derecha).

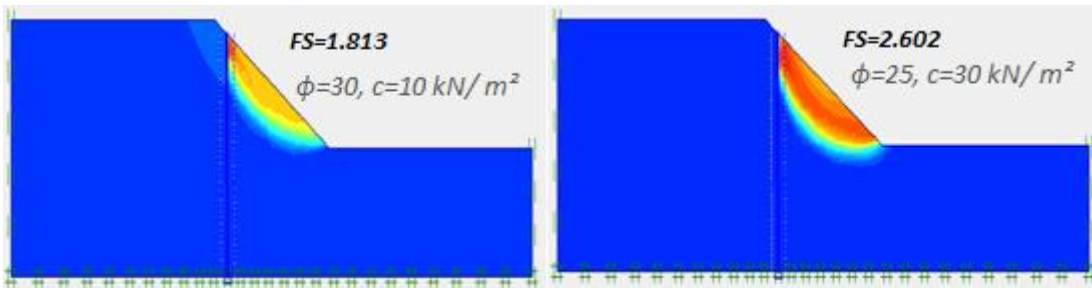


Figura 5.10. Representación de la superficie de falla para los casos 3 y 4 con pilotes en la posición $s=15$ m, PLAXIS.

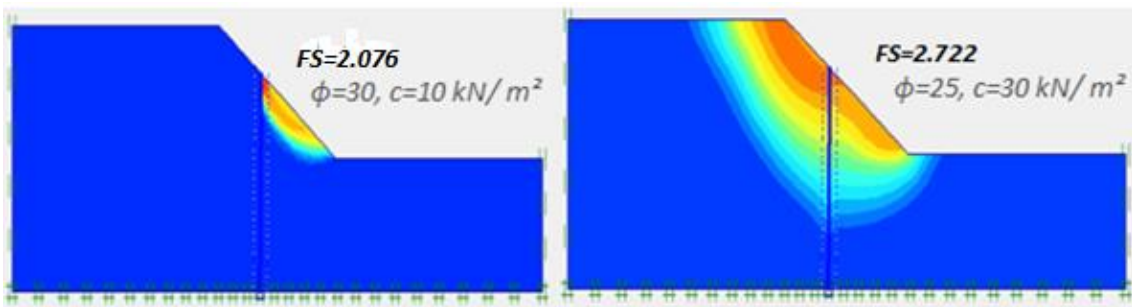


Figura 5.11. Representación de la superficie de falla para los casos 3 y 4 con pilotes en la posición $s=11$ m, PLAXIS.

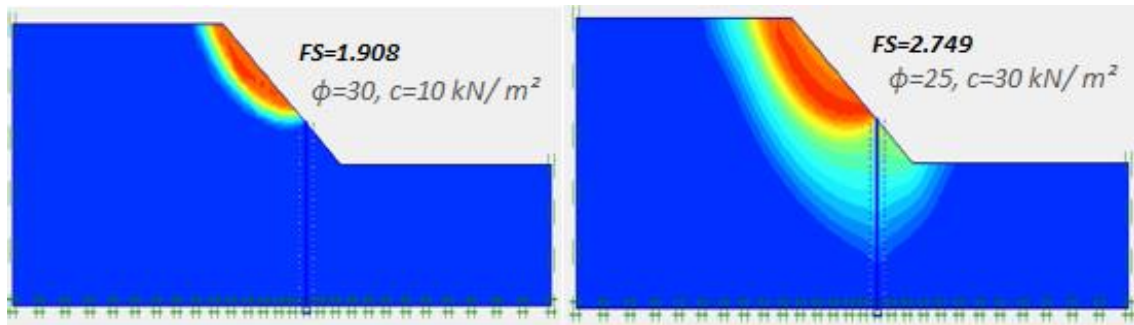


Figura 5.12. Representación de la superficie de falla para los casos 3 y 4 con pilotes en la posición $s=11m$, PLAXIS.

5.5 Comparación de resultados GEOSTUDIO Vs PLAXIS

Después de haber finalizado la modelización del talud en condiciones drenadas para los casos 3 y 4, es esencial elaborar un resumen de los resultados obtenidos con los programas PLAXIS y GEOSTUDIO para poder hacer un análisis comparativo y conocer si existen similitudes en el comportamiento del modelo planteado.

En el caso del talud sin pilote ambos programas tienen un comportamiento similar, el arco de las superficies de desplazamientos que se obtiene en el caso 3 como en el 4 del análisis son prácticamente iguales en PLAXIS como en GEOSTUDIO (tabla 5.1).

Aunque GEOSTUDIO no posee una herramienta para especificar en sí el análisis drenado y solo considera como parámetros de entrada del suelo la cohesión, el ángulo de fricción y el peso específico, los factores de seguridad obtenidos en los casos del estudio son muy similares a los arrojados por el programa PLAXIS como se observa en la tabla 5.1.

SIN PILOTE	Caso 3 C=10 kN/m ² y $\phi=30^\circ$	Caso 4 C=30 kN/m ² y $\phi=25^\circ$
GEOSTUDIO	1.722	2.367
PLAXIS	1.716	2.273

Tabla 5.1. Factor de seguridad en los casos 3 y 4 talud sin pilotes, PLAXIS Vs. GEOSTUDIO.

En la implementación de los elementos de refuerzo, en este caso pilotes, los programas proceden de maneras muy diferentes por lo que se hace más difícil su comparación. Para la etapa 3 de la modelización se observa en la tabla 5.2 que el factor de seguridad en GEOSTUDIO es mucho mayor si el pilote se coloca sobre la pendiente ($s=15$, $s=11$ o $s=5m$) y que en las demás posiciones ($s=20$, $s=0$ y $s=-3m$) arroja el mismo valor que se obtuvo cuando se analizó el talud sin pilote. Por lo que, si se coloca un pilote fuera de la pendiente, este programa considera que no tendrá ningún efecto. Con PLAXIS en cambio se obtuvieron factores de seguridad de menor valor que en GEOSTUDIO con diferencia de hasta 1.522.

Otro punto de diferencia para este caso es que según por los valores de seguridad obtenidos, GEOSTUDIO considera que la mejor posición para colocar los pilotes es en $S=5m$ lo más cercanos

al pie del talud y mientras que PLAXIS nos indica que justo el centro ($s=11m$) de la pendiente es la que aportará mayor estabilidad.

Datos	Resistencia al corte de 10 kN/m^2	Angulo de fricción 30
$S \text{ (m)}$	GEOSTUDIO	PLAXIS
27	1.722	1.751
15	3.272	1.813
11	3.336	2.076
5	3.430	1.908
0	1.722	1.658
-3	1.722	1.681

Tabla 5.2. Factor de seguridad para distintas posiciones del pilote, PLAXIS Vs. GEOSTUDIO.

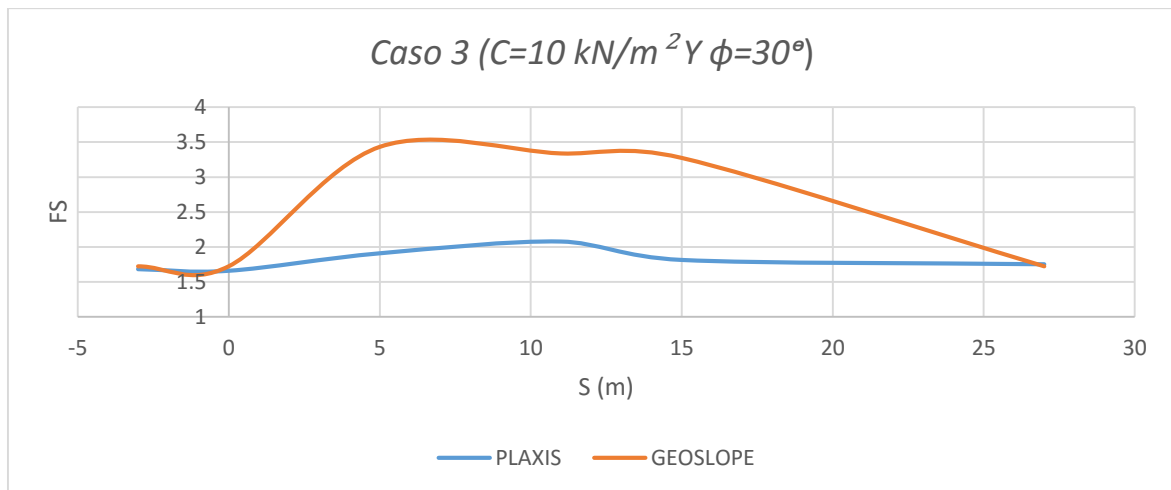


Figura 5.13. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, factor de seguridad con posición del pilote, caso 3 del modelo.

En la figura 5.13, se observa que en la modelización con pilote GEOSTUDIO y PLAXIS tienen una tendencia similar, aunque los programas usen técnicas distintas de análisis. Si se quiere saber la forma de la superficie de rotura y la mejor zona para colocar estos elementos estabilizadores ambos nos indicaran un área similar. Pero si es necesario ser puntual con la zona encontraremos contradicciones con ambos, ya que GEOSTUDIO nos dice que es la posición $S=5m$ y PLAXIS $S=11m$.

Para el caso 4 de la modelización tabla 5.3, GEOSTUDIO y PLAXIS tienen una tendencia una poco más parecida (tabla 5.3). Aquí el factor de seguridad es mayor en la posición ($s=5m$) cercana al pie del talud en ambos programas. Lo que indica que las características y los parámetros del material del talud hace que en PLAXIS se modifique la zona o posición del pilote que aportará mayor resistencia, mientras que GEOSTUDIO sigue teniendo la misma tendencia.

Datos	Resistencia al corte de 30 kN/m ²	Angulo de fricción 25°
S	GEOSTUDIO	PLAXIS
27	2.367	2.241
15	3.704	2.602
11	3.750	2.722
5	3.816	2.749
0	2.367	2.260
-3	2.367	2.243

Tabla 5.3 Factor de seguridad para las distintas posiciones caso 4, PLAXIS Vs. GEOSTUDIO.

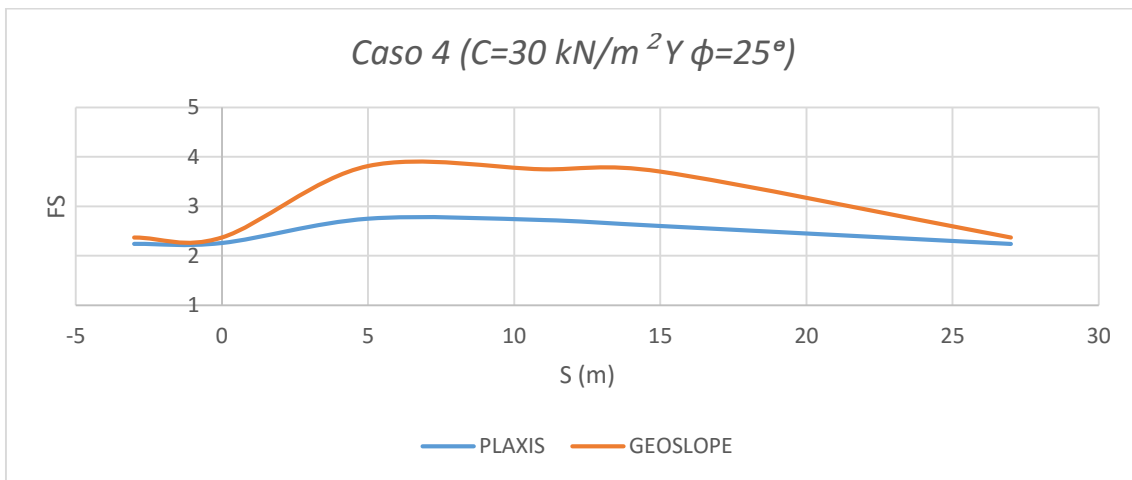


Figura 5.14. PLAXIS Vs. GEOSTUDIO, factor de seguridad con la posición del pilote caso 4.

Aunque la representación de la superficie de falla y el análisis del talud sin pilotes es prácticamente igual en ambos programas, el comportamiento es totalmente diferente en cuanto a la implementación de pilotes se refiere. GEOSTUDIO literalmente no considera las propiedades del pilote y sin importar las características del suelo tiene siempre las mismas tendencias, sobrevaluando la zona y arrojando valores del factor de seguridad muy altos. Mientras que PLAXIS, requiere de la especificación de las propiedades del pilote (como el EA, EI, momento flector (Mp) y axial máximo (Np)) y calcula el factor de seguridad a través del método Phi-c/reduction, herramienta que evalúa la estabilidad global del conjunto, por lo que arroja un comportamiento más realista del modelo.

ANÁLISIS DE LA POSICIÓN ÓPTIMA DEL PILOTE EN UN TALUD

La posición óptima de colocación los pilotes en una ladera es un tema controvertido, que ha inducido a diversos autores a elaborar estudios con el objetivo de establecer la ubicación óptima del pilote en la pendiente de un talud. Pero los resultados obtenidos no han sido muy concluyentes, debido a que han obtenidos resultados distintos. Por lo que en este capítulo emplearemos las herramientas de los programas GEOSTUDIO y PLAXIS para elaborar un análisis de la posición más adecuada de colocar el pilote y comparar los resultados con los trabajos hechos por otros autores (Hassiotis et al. (1997) y Ausilio et al. (2001)).

Hassiotis et al. (1997) en su trabajo concluyó que, para obtener un factor máximo de seguridad, los pilotes deben ser colocadas en la parte media superior de la pendiente. Dice que en general, deben estar situadas más cerca de la parte superior de las pendientes más pronunciadas que las de los más superficiales. Por otra parte, Ito (1975, en Ausilio et al. (2001) mostró que el efecto máximo del pilote en la estabilidad de taludes es cuando se colocan en la parte media-alta de la pendiente. Lee (1995, en Ausilio et al. (2001) expone que los pilotes son más eficaces cuando se instalan entre el centro y la cresta de la pendiente y recientemente Cai & Ugai (2000), utilizando el método de elemento finitos, han señalado que los pilotes deben estar situados en el centro de la pendiente para lograr el máximo factor de seguridad del talud y han encontrado que los pilotes tienen que ser instalados más cerca de la parte superior de la pendiente para obtener el mejor resultado.

6.1 Análisis del artículo de Hassiotis et al. (1997).

A partir de la teoría basado en la plasticidad desarrollada por Ito y Matsui (1975) para calcular el valor la fuerza lateral que actúa sobre la sección del pilote por encima de la superficie crítica y de los estudios realizados para obtener relaciones que puedan interpolar el factor de seguridad y parámetros tales, como diámetro del pilote, la distancia de centro a centro, y la ubicación óptima del pilote, Hassiotis et al. (1997) implementa el método del círculo de fricción para incorporar la fuerza de reacción en el análisis de estabilidad, teniendo en cuenta la fuerza ejercida por los pilotes en la pendiente y propone un procedimiento para lograr una óptima solución de diseño la cual provee un factor de seguridad deseado para el sistema de talud/pilote.

A continuación, se indican brevemente de las teorías de la deformación plástica y las ecuaciones desarrolladas por Hassiotis et al. (1997), para llegar a sus resultados:

1. Cuando la capa de suelo se deforma, dos superficies de deslizamiento, AEB y A'E'B', se producen formando un ángulo de $[(\pi / 4) + (\phi / 2)]$ con el eje x (Figura 6.1).

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

La fuerza lateral total que actúa sobre la estabilidad de un pilote, debido a la deformación plástica alrededor del pilote, F , se obtiene mediante la integración de la ecuación [6] a lo largo de la profundidad de la capa de suelo.

Suponiendo que el criterio de fallo de Mohr-Coulomb, el factor de seguridad está dada por:

$$FS = \frac{c_a + \sigma_n \tan \phi_a}{c_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad [6]$$

Donde los subíndices denotan cantidades disponibles y necesarios; y σ_n = fuerza normal que actúa en la superficie de ruptura en ausencia de agua.

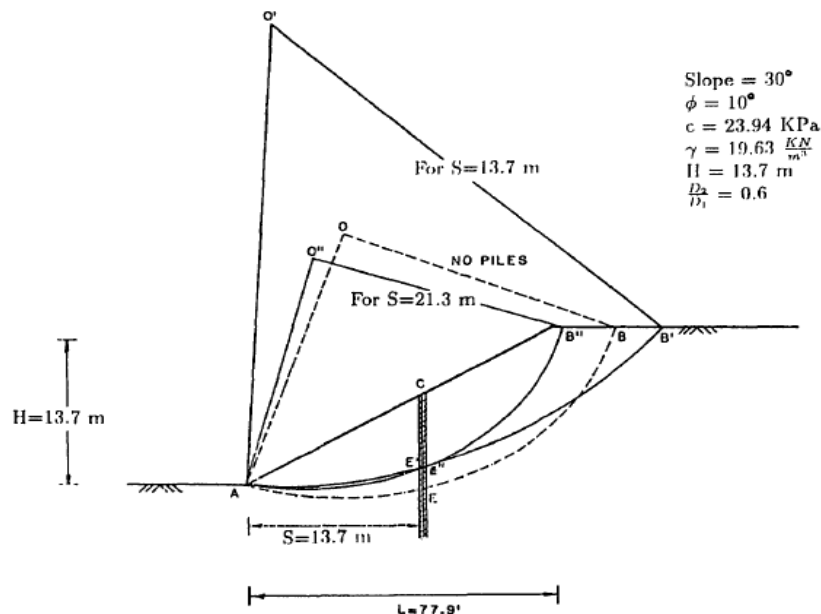
Como una ayuda en la determinación de FS , los factores de seguridad con respecto a la cohesión, F_c , y la fricción, F_ϕ , se han utilizado en el pasado, donde:

$$F_c = \frac{c_a}{c_r} \text{ and } F_\phi = \frac{\tan \phi_a}{\tan \phi_r} \quad [7]$$

El verdadero factor de seguridad se obtiene cuando F_c y F_ϕ son iguales.

$$FS = F_c = F_\phi \quad [8]$$

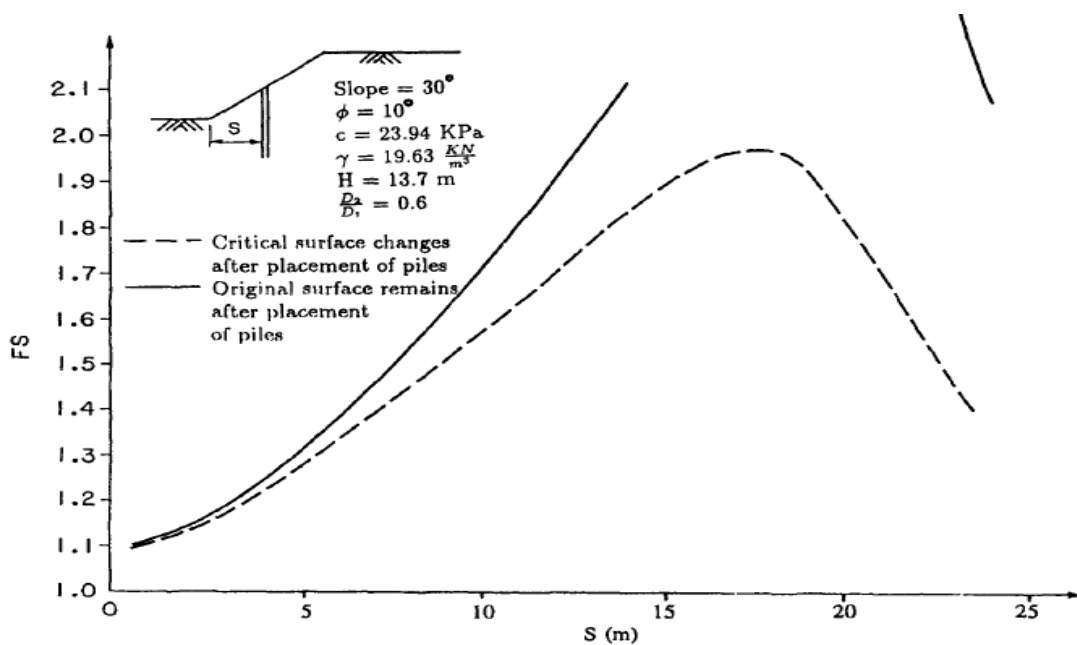
Para explicar las teorías de la metodología de la fricción circular y las ecuaciones planteadas anteriormente, elaboró el siguiente ejemplo que se muestran en la figura 6.2. El talud tiene una pendiente de 30° , con un ángulo de fricción del suelo $\phi=10^\circ$, una cohesión $c=23.94$ kPa, una altura de la pendiente de $H=13.7$ m y una relación de $D_2/D_1=0.6$



Figuras 6.2. Las superficies críticas de pendiente poco profunda en Función de la localización de la fila de pilote, Hassiotis et al. (1997).

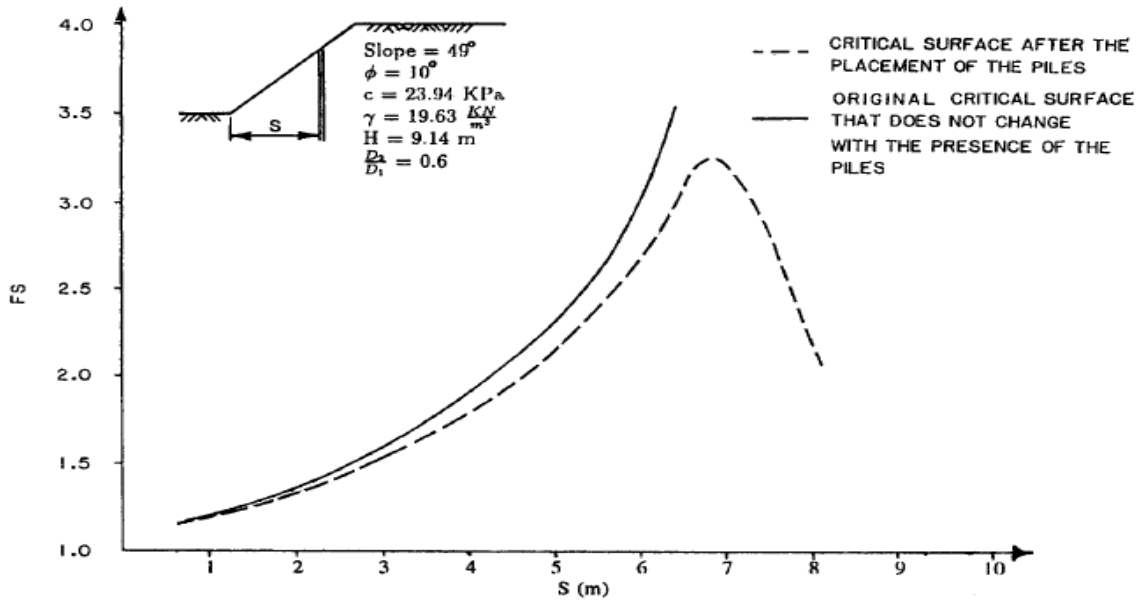
Cuando las pilas se insertan en la pendiente, la ubicación de la superficie crítica cambia, ya que una fuerza adicional, F_p (fuerza movilizada del pilote), se introduce en las ecuaciones de equilibrio límite. El factor original de seguridad de la pendiente (sin el refuerzo del pilote) fue 1,08, obtenido para la OAB superficial crítica. Después de la inserción de una fila de pilotes con una relación de diámetro $D_2 - D_1$ de 0,6, colocado a 13,7 m del pie, el factor de seguridad incrementó a 1,82 y la superficie crítica cambió a O'AB'. En la inserción del pilote a 23,1 m del pie se obtiene un factor de seguridad de 1,64 y la superficie crítica de O "AB". La hipótesis de que la superficie crítica no cambia con la adición del pilote daría lugar a respuestas no conservadora para el factor de la seguridad (Hassiotis et al. ,1997).

La influencia de la localización de los pilotes, S , (distancia al pie del talud) sobre el factor de seguridad del talud anterior se muestra en la figura 6.3. Para cada valor de S , el factor de seguridad se calcula para ambos, la superficie crítico original (curva de trazo continuo), y la superficie crítica modificado que se encontró después de la adición de pilas de una relación D^2-D_1 dado. (Línea discontinua). Para la superficie crítica modificada, la fuerza de reacción F es más pequeña y, por lo tanto, el factor real de seguridad es menor que el calculado para la superficie original (Hassiotis et al. ,1997).



Figuras 6.3 Efecto de la ubicación del pilote sobre la Seguridad en taludes tendidos, Hassiotis et al. (1997).

El comportamiento del factor de seguridad de una pendiente empinada reforzada con pilotes se muestra en la figura 6.4. Las superficies críticas de una pendiente pronunciada siguen siendo profundas y el factor de seguridad aumenta con S hasta que las pilas se colocan cerca de la parte superior de la pendiente. Evidentemente, las pilas deben ser colocados más cerca de la parte superior de una pendiente pronunciada que la de una pendiente tendida para el factor máximo de seguridad que deben respetar.



Figuras 6.4. Efecto de la ubicación del pilote en el Factor de seguridad en taludes menos tendidos, Hassiotis et al. (1997).

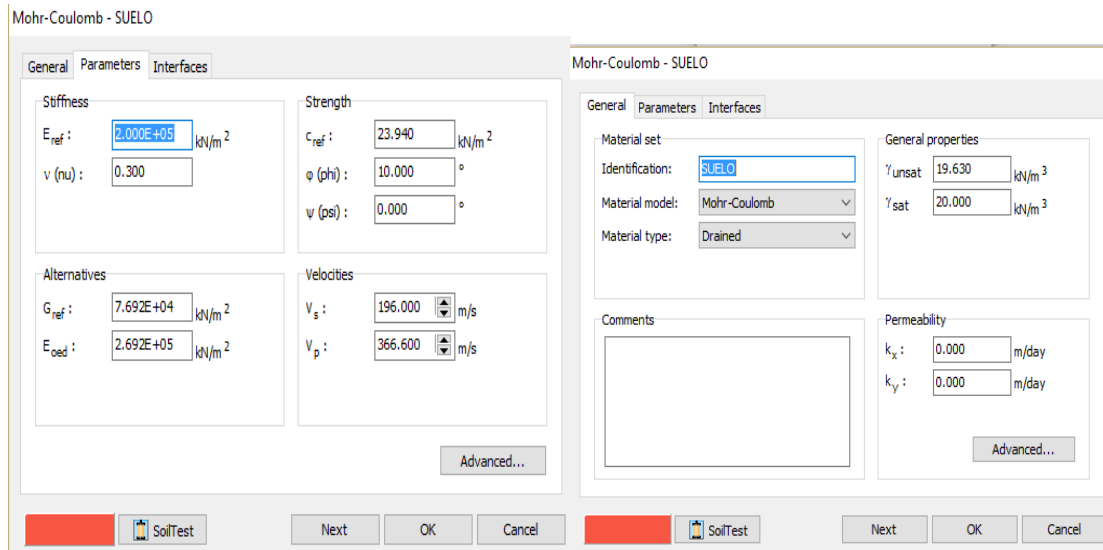
Hassiotis et al. (1997) concluyó que:

Un diseño óptimo se puede obtener mediante la minimización del costo de los materiales y la construcción de diferentes configuraciones del sistema de talud/pila. Para un máximo factor de seguridad, los pilotes deben ser colocados en la parte media superior de la pendiente. En general, deben estar situados más cerca de la parte superior de las pendientes más pronunciadas que las de los más superficiales. Se sugiere que el pilote debe ser introducido con una profundidad suficiente para que el momento y la fuerza de corte de flexión se aproxima cero a esa profundidad. La longitud de empotramiento disminuye considerablemente a medida que la rigidez del material de cimentación aumenta. El desplazamiento máximo, momento, y la fuerza de cizallamiento en ella son los tres parámetros que deben ser considerados para asegurar que el diseño es adecuado. La cabeza del pilote debe ser restringido (extremo fijo o articulado) para minimizar los momentos de flexión y fuerzas de cizallamiento sobre los pilotes.

6.1.1 PLAXIS

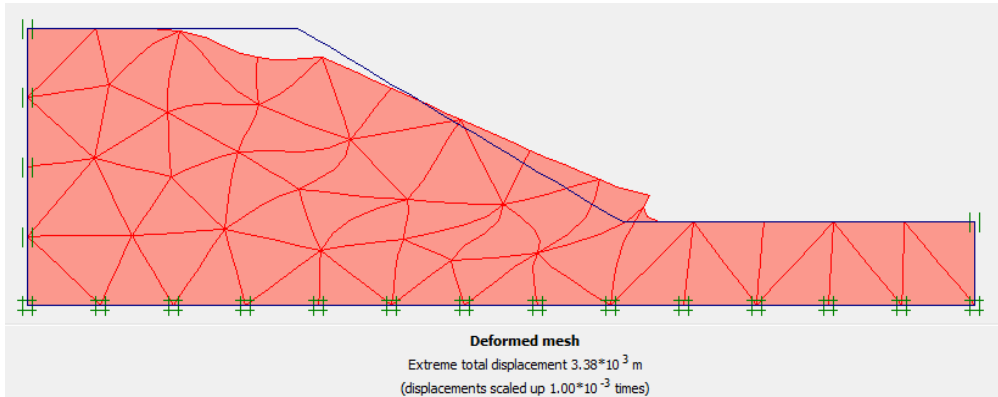
Para poder realizar el cálculo del talud estudiado por Hassiotis et al. (1997), fue necesario asumir algunos datos de la geometría del talud. Se planteó una altura total para la geometría de 20m y una longitud total de 70m. La altura de la pendiente $H=13.7m$, el ángulo de fricción del suelo $\phi=10^\circ$, la cohesión de $c=23.94\text{ KPa}$, el peso específico del suelo $\gamma=19.63\text{ kN/m}^3$ y una relación de diámetro de $D_2/D_1=0.6$ son los datos para el primer caso de la pendiente de 30° y $H=9.14\text{ m}$, $\phi=10^\circ$, $c=23.94\text{ KPa}$, $\gamma=19.63\text{ kN/m}^3$ y $D_2/D_1=0.6$ para el caso de una pendiente más pronunciada de 49° .

Como se ha dicho antes el programa PLAXIS requiere de la especificación del módulo de Young y coeficiente de Poisson para el análisis por lo que fue necesario asumir ciertos valores ($E=2.0E+05$ y $\nu=0.300$) figura 6.5. Se asumió condición drenada en el análisis para los dos casos planteados.

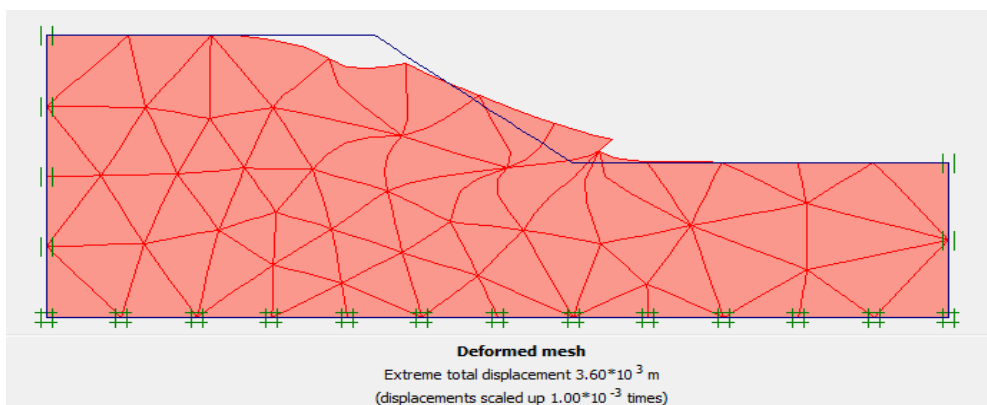


Figuras 6.5. Ventana con los parámetros del material del talud, PLAXIS.

En la modelación del talud sin pilotes, se obtuvo un valor del factor de seguridad para el caso del talud de la pendiente de 30° $FS=1.07$ y para el talud de pendiente más pronunciada de 49° $FS=1.280$. El factor de seguridad del caso de pendiente de 30° ($FS=1.07$) en PLAXIS, es prácticamente igual al que obtuvo Hassiotis et al. (1997) en su análisis con el método del círculo de fricción. En las figuras 6.6 y 6.7 se observa la deformación del mallado en PLAXIS para los dos casos analizado.

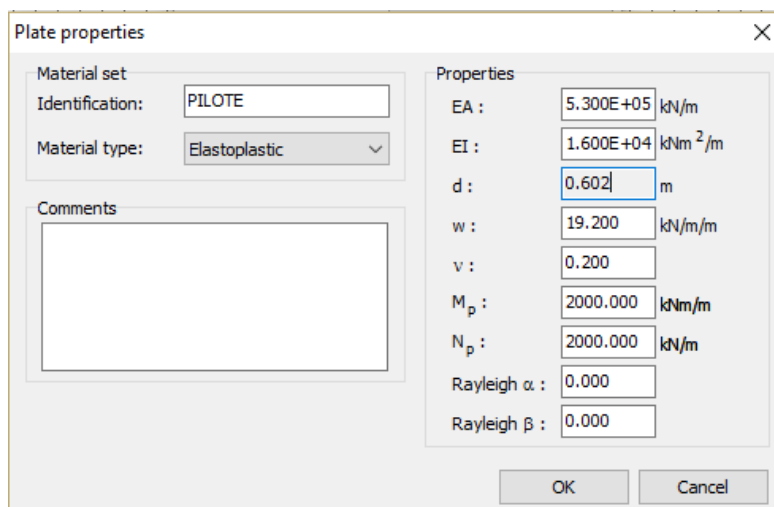


Figuras 6.6. Deformación de la malla para el caso del talud con pendiente de 30°, PLAXIS.



Figuras 6.7. Deformación de la malla para el caso del talud con pendiente de 49°, PLAXIS.

En la colocación del pilote Hassiotis et al. (1997) realiza un análisis con un $EI=16.65 \text{ MN}\cdot\text{m}^2$ para el pilote, que se ha utilizado también en PLAXIS. Al pilote se le asigno las siguientes características (figura 6.8), $EA=5.30\text{E}+05 \text{ kN/m}$, $EI= 1.60\text{E}+04 \text{ kNm}^2/\text{m}$ (valor equivalente al asignado por el autor) y momento máximo ($M_p\text{-kNm/m}$) y axial máximo ($N_p\text{-kN/m}$) de 2000 al inicio.



Figuras 6.8. ventana con los datos del pilote asignando, PLAXIS.

Los resultados obtenidos no fueron muy satisfactorios, debido a las características del pilote. El factor de seguridad no aumentaba por más que se aumentara el momento máximo y el axial máximo del pilote, ya que el valor asignado del EA y EI son muy bajos. Por estas condiciones y los parámetros del pilote en PLAXIS no fue posible obtener valores comparables con el análisis elaborado por Hassiotis et al. (1997) con el método de fricción circular.

En PLAXIS, al asignarles los parámetros correspondientes al pilote, se obtenían factores de seguridad de menos valor de los que Hassiotis et al., (1997) obtuvo en su análisis. Por más que se aumentara el valor del momento máximo y el axial máximo del pilote, el valor del factor de seguridad no pasaba de lo que presenta la tabla 6.1. Los pilotes eran excesivamente deformables, aunque los valores de resistencia fueran altos, y acompañaban al suelo en la deformación.

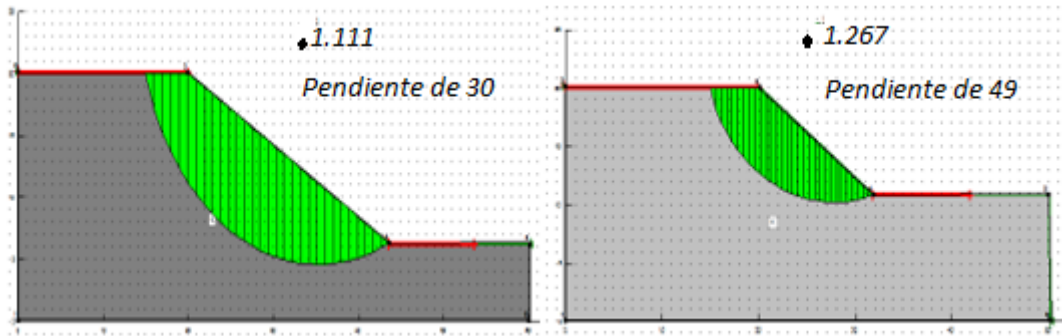
Talud con pendiente de 30°			Talud con pendiente de 49°		
SIN PILOTE		1.070	SIN PILOTE		1.280
S (m)	FS	Mp, Np	S (m)	FS	Mp, Np
0	1.085	4000	0	1.310	4000
5	1.107	4000	2	1.477	4000
10	1.122	4000	4	1.476	4000
15	1.139	4000	6	1.487	4000
20	1.176	4000	7	1.499	4000
23	1.184	4000	8	1.518	4000

TABLA 6.1. Factor de seguridad y posición del pilote, en los casos del talud de pendiente de 30° y 49°, obtenidos en PLAXIS. (Mp-kNm/m y Np- kN/m)

6.1.2 GEOSTUDIO

Implementando la misma geometría planteada en el apartado 6.1.1 en PLAXIS, utilizamos GEOSTUDIO para modelar los casos estudiado por Hassiotis et al. (1997) con el método de fricción circular para comparar resultados.

El factor de seguridad arrojado para el caso del talud con, altura de la pendiente H=13.7m, el ángulo de fricción del suelo $\phi=10^\circ$, la cohesión $c=23.94$ KPa, el peso específico del suelo $\gamma=19.63$ kN/m³ y un diámetro del radio de $D_2/D_1=0.6$ y pendiente de 30° es de FS= 1.11 y en el caso de H=9.14 m, $\phi=10^\circ$, $c=23.94$ KPa, $\gamma=19.63$ kN/m³ y $D_2/D_1=0.6$ y pendiente más pronunciada de 49° es de FS=1.267 valores similares a los obtuvo Hassiotis et al. (1997) con el método de fricción circular (figura 6.9).



Figuras 6.9. Superficies de deslizamientos para los casos del talud de pendiente de 30° y 49°, GEOSTUDIO.

Las teorías aplicadas por Hassiotis et al. (1997) en su artículo, es muy parecida a la forma en que modela la herramienta GEOSTUDIO un talud con este elemento estructural, porque en la colocación del pilote para obtener resultados similares solo fue necesario ir variando la fuerza cortante del pilote en cada posición analizada de las pendientes. En ambos casos se requiere mayor concentración de la fuerza cortante del pilote en la parte superior de la pendiente.

En la tabla 6.2 se muestra el factor de seguridad obtenido en el análisis del talud de pendiente de 30° y de 49° con las fuerzas de aplicación en cada punto de análisis.

Talud con pendiente de 30°			Talud con pendiente de 49°		
SIN PILOTE		1.11	SIN PILOTE		1.267
S (m)	FS	FUERZA kN/m	S (m)	FS	FUERZA kN/m
0	1.111	200	0	1.267	50
5	1.298	200	2	1.447	70
10	1.509	550	4	1.739	200
15	1.847	800	6	2.570	550
20	1.715	700	7	3.102	700
23	1.216	500	8	2.188	400

Tabla 6.2. Factor de seguridad, fuerza cortante empleada y posición del pilote, en los casos del talud de pendiente de 30° y 49°.

En las gráficas 6.10 a la 6.13 se observa que el método del círculo de fricción aplicado por Hassiotis et al. (1997) en los casos de un talud de pendiente 30° y de un talud con pendiente más pronunciada de 49° es similar a los resultados obtenidos con el programa GEOSTUDIO. Las gráficas elaboradas con los resultados del factor de seguridad versus la ubicación del pilote en el talud tienen las mismas tendencias que las gráficas 6.3 y 6.3, planteada por Hassiotis et al. (1997).

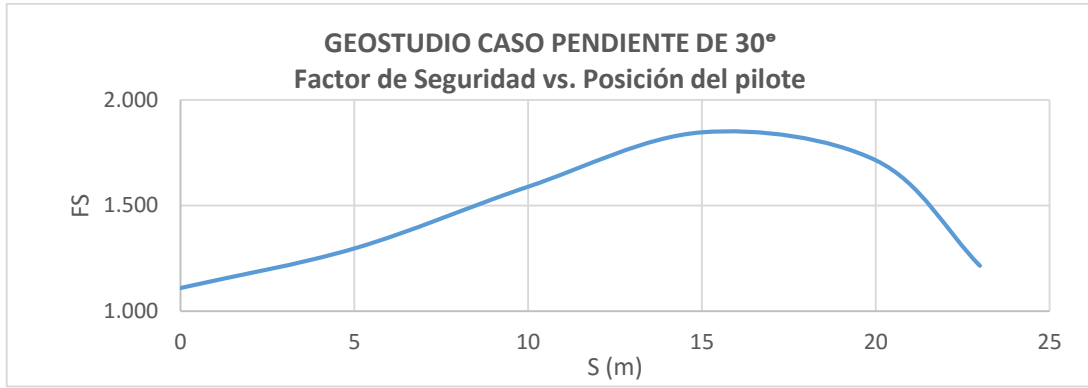
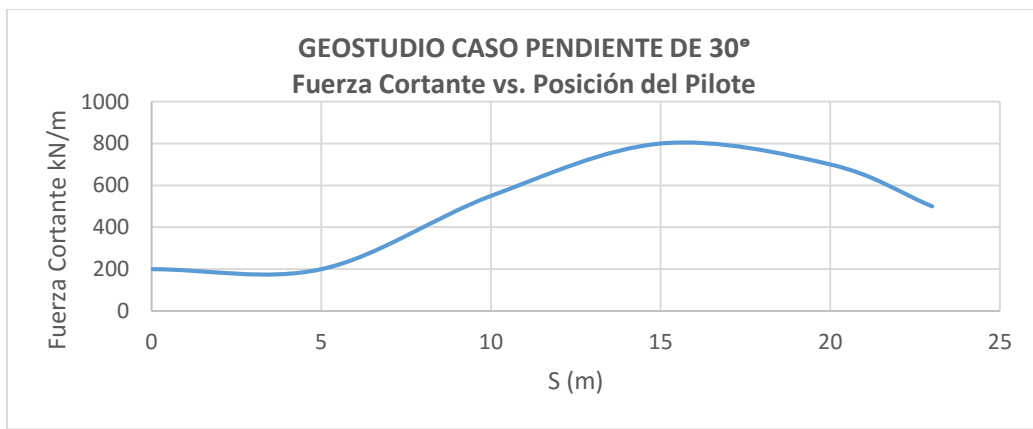


Figura 6.10. Efecto de la ubicación del pilote sobre la Seguridad en pendiente poco profunda, GEOSTUDIO.



Figuras 6.11 Fuerza Cortante del pilote vs. Posición del pilote, pendiente de 30° en GEOSTUDIO.

En las figuras 6.11 y 6.13 (Fuerzas cortante del pilote vs. Posición del pilote) se observa que pese a la teoría de Hassiotis et al., (1997) de que la posición óptima del pilote es la parte superior del talud, porque se obtiene mayor valor del factor de seguridad, es también cierto que se aplica una mayor fuerza cortante, dato que no está muy claro en su artículo. Por lo que hay que analizar y conocer si aplicar esta técnica no conllevaría a un mayor costo.

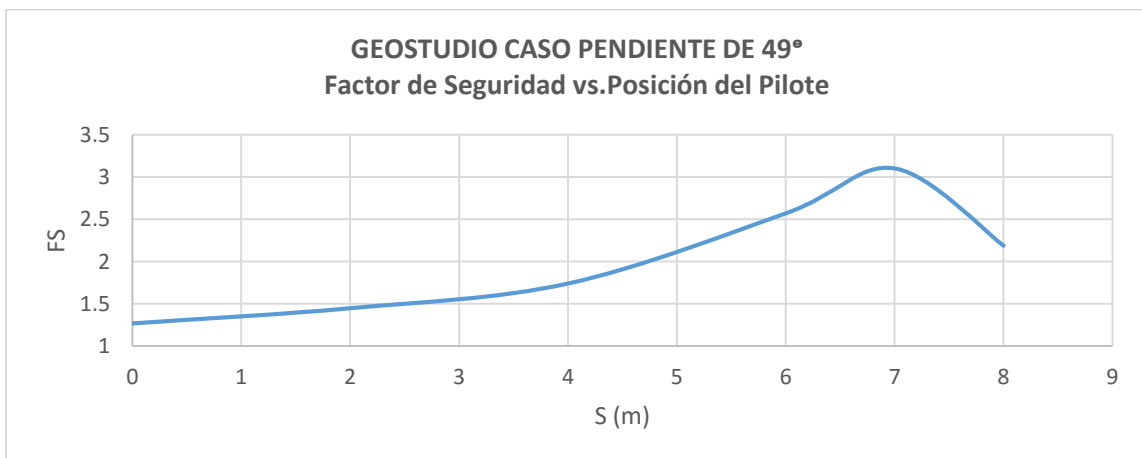
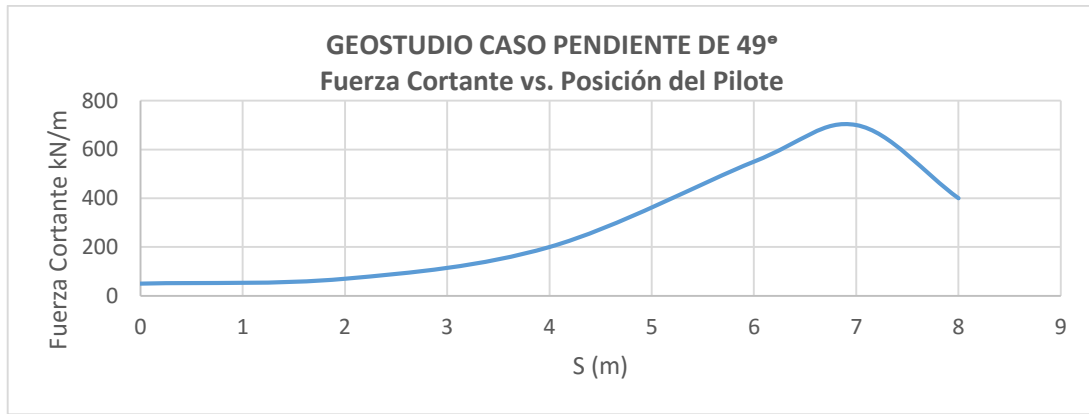


Figura 6.12. Efecto de la ubicación del pilote en el Factor de seguridad en cuesta empinadas, GEOSTUDIO.



Figuras 6.13. Fuerza Cortante del pilote vs. Posición del pilote, pendiente de 49° en GEOSTUDIO.

6. 2 Análisis y comparación (Hassiotis et al. (1997), PLAXIS y GEOSTUDIO)

Después de finalizar la modelación de los casos estudiados por Hassiotis et al. (1997) mediante el método de fricción circular, con los programas PLAXIS y GEOSTUDIO, al comparar los resultados en el caso del talud sin pilotes, los valores obtenidos son similares para GEOSTUDIO. El factor de seguridad para el talud con pendiente de 30° de los análisis limite es de FS=1.11, y el de PLAXIS, FS=1.07 mostrando el programa PLAXIS más acercamiento al factor obtenido por Hassiotis et al (1997) FS=1.08 (tabla 6.3), pero al momento de colocar el pilote el comportamiento es totalmente diferente. Con PLAXIS debido a las características del pilote fue casi imposible realizar un análisis, ya que Hassiotis et al. (1997) en su estudio no ofrece muchos datos del pilote, porque su análisis se basa en la fuerza lateral movilizada y la fuerza movilizada del pilote. En cambio, con el programa GEOSTUDIO el análisis coincide a la perfección con el método de fricción circular de Hassiotis et al. (1997), dando este los mismos resultados. Esto es debido a que ambos calculas se fundamentan en el método de equilibrio limite. Notando que, aunque se obtiene mejor resultado en parte superior, esto conlleva la implementación de una fuerza cortante del pilote mayor, dejando la incógnita de si será proporcional al costo.

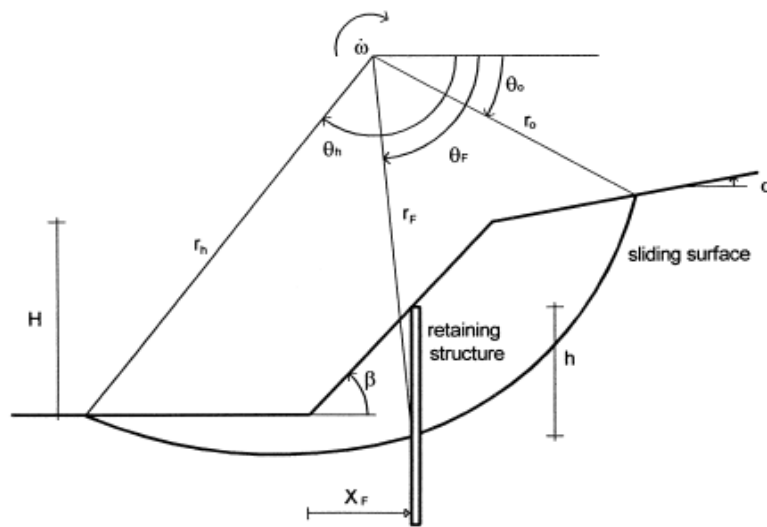
Talud con pendiente de 30°	Factor de seguridad
Hassiotis et al. (1997)	1.08
GEOSTUDIO	1.11
PLAXIS	1.07

Tabla 6.3. Factor de seguridad del talud sin pilote en GEOSTUDIO, PLAXIS y Hassiotis et al. (1997).

6.3 Análisis del artículo de Ausilio et al. y otros, 2001.

Ausilio et al. (2001), usa los teoremas de análisis límite para obtener la posición óptima del pilote. Aplicando un enfoque cinemático, con el objetivo de alcanzar el mejor factor de seguridad, para evaluar la fuerza adicional que los pilotes deben proporcionar para aumentar la estabilidad de taludes, y la ubicación más adecuada del pilote (X_F).

A continuación, se presenta un breve resumen de las ecuaciones, el modelo utilizado y los resultados obtenidos por Ausilio et al. (2001), los cuales serán comparados con la modelación del mismo talud realizado con los programas GEOSTUDIO y PLAXIS, para evaluar y obtener la posición óptima del pilote.



Figuras 6.12. Problema de estabilidad de taludes con pilotes, Ausilio et al. (2001).

Para tener en cuenta la presencia del pilote (figura 6.12), una fuerza lateral y un momento se supone que se aplica a la profundidad en la superficie de deslizamiento y bajo esta suposición la tasa de disipación de energía se convierte en (Ausilio, et al., 2001):

$$\dot{D} = \frac{c}{2} \frac{r_0^2}{\text{tg}\varphi} \dot{\omega} \left[e^{2(\theta_h - \theta_o) \frac{\text{tg}\varphi}{FS}} - 1 \right] + F r_0 \sin\theta_F \dot{\omega} e^{(\theta_F - \theta_o) \frac{\text{tg}\varphi}{FS}} - M \dot{\omega} \quad [9]$$

Donde:

F_s es el factor de seguridad, $\dot{\omega}$ es la velocidad angular, θ_h y θ_o son los ángulos que definen geoméricamente el mecanismo de falla de la estructura, el ángulo θ_F especifica la posición de la estructura de retención a lo largo de la superficie de deslizamiento; F es la fuerza estabilizadora por unidad de ancho, M representa el momento de distribución de la fuerza F que está dado por:

$$M = F m h \quad [10]$$

Donde:

h es la altura de la parte de los pilotes por encima de la superficie de deslizamiento y m es un coeficiente menor que la unidad, X_f es una distancia que se mide desde el inicio del pie del talud.

$$h = r_F \sin\theta_F - r_h \sin\theta_h \quad \text{si } -D \leq x_F < 0 \quad [11]$$

$$h = r_F \sin\theta_F - r_h \sin\theta_h + x_F \operatorname{tg}\beta \quad \text{si } 0 \leq x_F \leq H \operatorname{ctg}\beta \quad [12]$$

$$h = r_F \sin\theta_F - r_h \sin\theta_h + H + (x_F - H \operatorname{ctg}\beta) \operatorname{tg}\alpha \quad \text{si } x_F > H \operatorname{ctg}\beta \quad [13]$$

Donde;

$$x_F = r_F \cos\theta_F - r_h \cos\theta_h - D \quad [14]$$

$$D = \frac{\sin(\beta - \beta')}{\sin\beta \sin\beta'} H \quad [15]$$

$$r_F = \frac{H}{A} e^{(\theta_F - \theta_0) \frac{c\varphi}{FS}} \quad \text{y} \quad r_h = \frac{H}{A} e^{(\theta_h - \theta_0) \frac{c\varphi}{FS}} \quad [16]$$

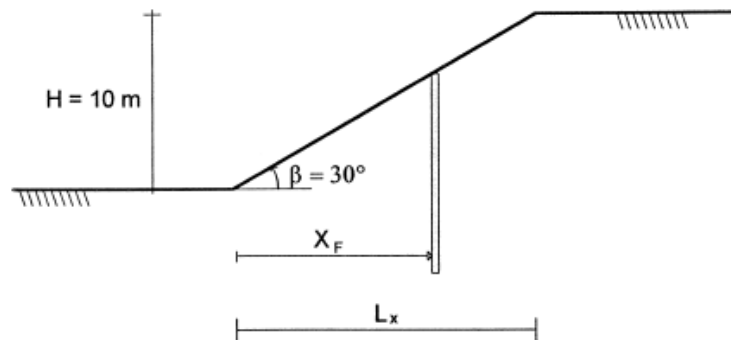
Para un valor del factor de seguridad (FS) seleccionado, h es una función de los ángulos θ_h , θ_0 , β y F . Por lo tanto, igualando la tasa de trabajo externo con la tasa de disipación de energía conduce a la siguiente expresión para F :

$$F = \frac{\frac{\gamma}{A} H (f_1 - f_2 - f_3 - f_4) + q B \left[\cos(\theta_0 + \alpha) - \frac{B}{2} \right] + s B \sin(\theta_0 + \alpha) - \frac{c}{2 \operatorname{tg}\varphi} \left[e^{2(\theta_h - \theta_0) \frac{c\varphi}{FS}} - 1 \right]}{\frac{A}{H} \left[\sin\theta_F e^{(\theta_F - \theta_0) \frac{c\varphi}{FS}} - m h \frac{A}{H} \right]} \quad [17]$$

Ausilio et al. (2001) indica que la posición óptima del pilote es aquella que minimiza la fuerza estabilizadora F , que se ejerce en el terreno y produce la superficie de rotura. El valor X_f se debe asumir teniendo en cuenta la superficie de deslizamiento crítico, esta superficie indica el rango donde los pilotes deben ser colocados para incrementar la estabilidad del talud. La condición de mínimo se expresa como:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial \theta_0} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \theta_h} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \beta'} = 0 \\ x_F = \frac{H}{A} \left[\cos \theta_F e^{(\theta_F - \theta_0) \frac{180}{FS}} - \cos \theta_h e^{(\theta_h - \theta_0) \frac{180}{FS}} \right] - H \frac{\sin(\beta - \beta')}{\sin \beta \sin \beta'} \end{array} \right. \quad [18]$$

Después de desarrollar las ecuaciones del teorema de análisis límite anteriormente descritas y para explicar el efecto de la posición del pilote, utiliza el modelo de la figura 6.13 y realiza el ejemplo. El pilote variaría de posición, y el terreno posee unos parámetros de resistencia: $c = 4.7$ kPa y un ángulo de fricción $\phi = 25^\circ$, con un peso específico del suelo 20 kN/m³ y suponiendo suelo seco (figura 6.13).



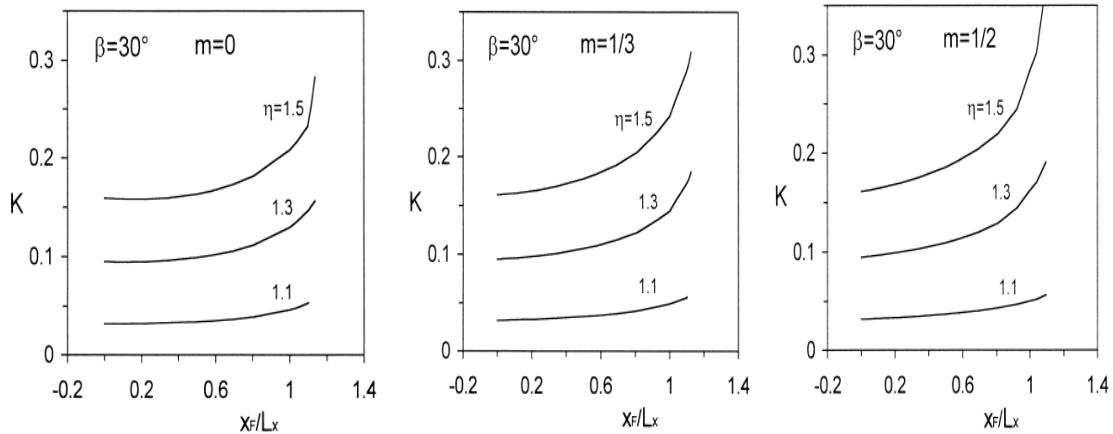
Figuras 6.13. Ilustración de ejemplo de un talud reforzado con pilote, Ausilio et al. (2001).

El factor de seguridad obtenido para el talud sin pilote es de $F_s = 1.19$.

La posición óptima del pilote dentro del talud es determinada cuando la fuerza estabilizadora necesaria para aumentar el factor de seguridad al valor deseado toma el valor mínimo. Suponiendo que la posición del pilote varía entre la base y la parte superior del talud, la fuerza proporcionada por el pilote se calcula usando las ecuaciones (17) y (18), y se representa gráficamente frente al perímetro X_f/L_x en abscisa, donde $L_x = H \operatorname{ctg} \beta$ (figura 6.13). Cabe señalar que cuando $X_f/L_x = 0$ o $X_f/L_x = 1$ la posición del pilote es la cresta del talud, respectivamente. Por otra parte, los valores del talud X_f/L_x mayor que la unidad indican que el pilote se encuentran en la parte superior de la pendiente. La fuerza estabilizadora se expresa en una forma adimensional como $k = \frac{F}{\frac{1}{2} \gamma H^2}$. El coeficiente m se supone que es 0, 1/3 o 1/2. Los resultados se dan en las figuras. 6.14 para tres valores diferentes de la relación de mejora que η se define como:

$$\eta = \frac{FS}{FS_0} \quad [20]$$

donde FS = factor de seguridad del talud con pilotes, y FS_0 = factor de seguridad del talud sin pilote (Ausilio et al. (2001)).



Figuras 6.14. Efecto del pilote sobre la fuerza adimensional K , con $m=0$, $m=1/3$ y $m=1/2$, Ausilio et al. (2001).

El valor de m depende de cómo es la interacción entre el terreno y el pilote. Si la fuerza que ejerce el pilote se distribuye linealmente en el mismo, entonces $m=1/3$. Si $m=0$ es como suponer que la fuerza que ejerce el pilote está concentrada en la superficie de falla.

Para este análisis se puede concluir lo siguiente, según Ausilio et al., (2001):

Como se puede esperar, K aumenta con el aumento η . El aumento de la K es mayor cuando $m = 1/2$, aunque los resultados parecen no estar afectadas en gran medida por el valor de m . En todos los casos examinados, la posición óptima del pilote está cerca del pie del talud, donde la fuerza proporcionada por los pilotes para alcanzar el valor seleccionado de la relación, toma el valor más bajo. Esto es debido a la forma de la superficie del deslizamiento que es una curva que tiene un radio que aumenta a medida que la superficie se desarrolla desde la parte superior a la base del talud. Para un mecanismo de falla rotacional se muestra en la figura 6.14, el momento requerido, debido a la estabilización de F , con respecto a la rotación centro, tiene un brazo que aumenta a medida que la ubicación de los pilotes se acerca a la pendiente máxima del talud, y por consiguiente la fuerza estabilizadora (F) disminuye. Sin embargo, las Figs. 6.14 muestran que los pilotes son también muy eficaces cuando se encuentran entre el medio y la base del pie del talud, sobre todo cuando se supone que m sea cero. Las figuras también muestran que la región en la que los pilotes son más eficaces se reduce a medida que η aumenta, y se encuentra más cerca al pie del talud. Por lo tanto, cuando es necesario un alto valor de la relación, [20] el pilote debe colocar con mayor atención dentro del talud (Ausilio et al. (2001)).

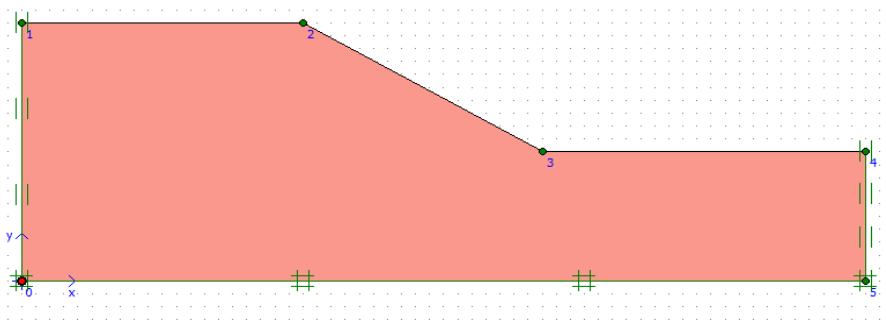
6.3.1 PLAXIS

Las dimensiones de la geometría global del talud no fueron especificadas, por lo que fue asumida para poder elaborar el análisis con el programa. Se le asignó de altura 20m del terreno en el pie, 20m de longitud de la zona de la coronación y 77.32m la longitud total del talud. Con el ángulo de inclinación de $\beta=30^\circ$ y la altura del talud $H=10\text{m}$ del modelo se calculó la longitud de la base de la pendiente con la fórmula $L_x = H \cot \beta = 17.32\text{m}$ (figura 6.15).

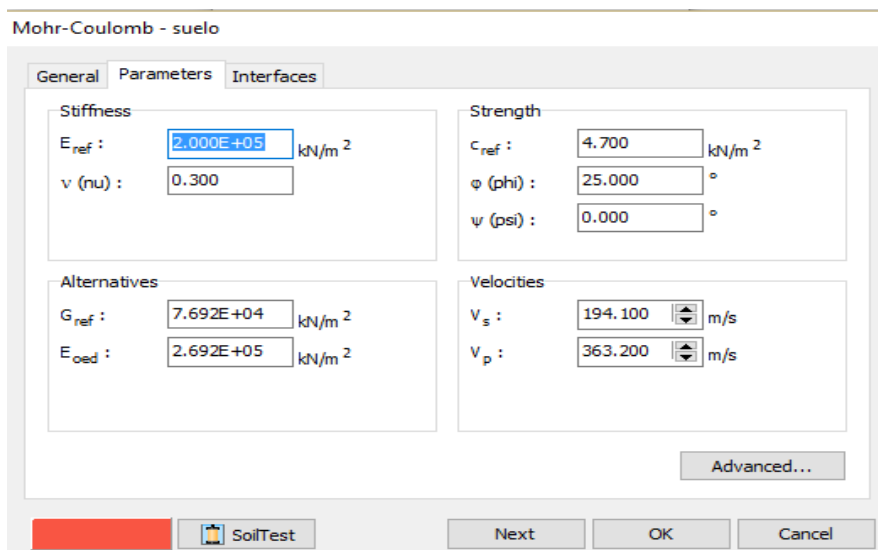
Los parámetros de resistencia del suelo asignados por el autor fueron, una cohesión del suelo de $c=4.7\text{kPa}$, ángulo de fricción de $\phi=25^\circ$ y un peso específico del suelo de 20 kN/m^3 .

Utilizando el método de elemento finitos con el programa PLAXIS, se analizará el modelo anteriormente estudiado por Ausilio et al. (2001) mediante el teorema de análisis límite, para ver si es posible con esta herramienta llegar a las mismas conclusiones y obtener la posición óptima del pilote.

Para el cálculo con esta herramienta fue necesario asumir también un valor para el módulo de Young (E) = $2 \times 10^5\text{ kN/m}^2$ y un coeficiente de Poisson (ν) = 0.30 . Como tipo de modelo de cálculo se asignó la condición drenada y suelo seco (figura 6.16).



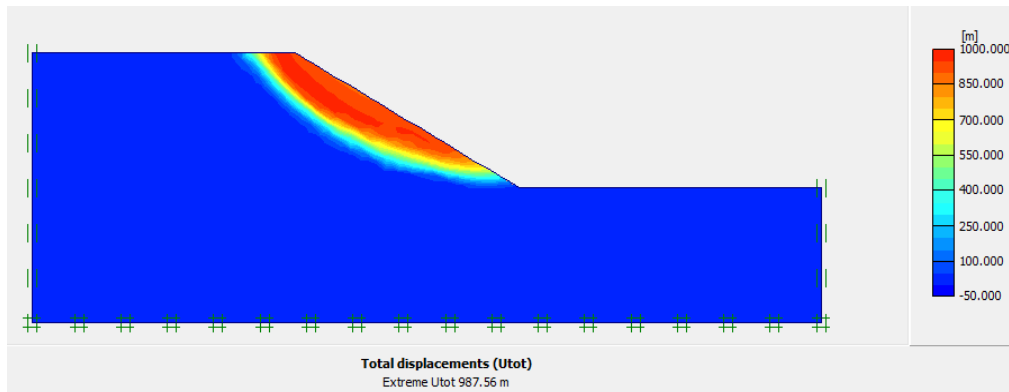
Figuras 6.15. Diseño del talud, PLAXIS.



Figuras 6.16. Ventana con los parámetros del suelo del talud, PLAXIS.

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Aplicando los mismos procedimientos descrito, se modeló el talud con dos fases de cálculo. En el caso del talud sin pilotes se obtuvo un factor de seguridad de 1.174 ($FS= 1.174$), casi similar al que obtuvo Ausilio et al. (2001) con el método de teorema de análisis límite ($FS=1.19$) (figura 6.17).



Figuras 6.17. Superficie de deslizamiento del talud sin pilote, PLAXIS.

En el análisis con pilotes se utilizaron pilotes largos, ósea, de gran profundidad porque estos arrojaban mejores resultados. Las propiedades del pilote fueron asumidas, ya que era necesario la especificación de los parámetros EA , EI , peso, momento flector y axial máximo del pilote para la modelación con PLAXIS. Como Ausilio et al. (2001), realiza el análisis variando la fuerza estabilizadora del pilote y PLAXIS trabaja con el momento máximo y al axial máximo el cálculo se hizo variando estas propiedades (M_p , $N_p=1000$ y M_p , $N_p=2000$) (M_p -kNm/m y N_p -kN/m) (figura 6.18).

Figuras 6.18. Ventana con los datos asignados al pilote, PLAXIS.

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Se consideró cinco (5) posiciones para la colocación del pilote, siguiendo las consideraciones descritas en el artículo ($X_f=0$, $X_f=1/2$, $X_f=1/3$, $X_f=3/4$ y $X_f=1$), las cuales están en función de la longitud de la base del talud $L_x=17.32\text{m}$. en la medida de lo posible la entrada de datos en PLAXIS era similar a lo que se utilizó en el teorema de análisis límite para así obtener resultados comparables.

En la tabla 6.4 se presentan los resultados obtenidos del factor de seguridad en cada una de las posiciones del talud estudiada, para el momento máximo (kNm/m) y axial máximo (kN/m) de 1000 y 2000 y el valor de la relación η .

Lx		FS0		1.174	
Xf/Lx (m)	S o Xf (m)	Mp, Np=1000	Mp, Np=2000	η con Mp, Np 1000	η con Mp, Np 2000
0	0	1.153	1.188	0.982	1.012
1/3	5.77	1.291	1.315	1.100	1.120
1/2	8.66	1.336	1.369	1.138	1.166
3/4	12.99	1.202	1.216	1.024	1.036
1	17.32	1.186	1.169	1.010	0.996

Tabla 6.4. Posición, factor de seguridad y momento máximo (Mp- kNm/m) y axial máximo(Np-kN/m) de análisis empleadas en PLAXIS.

En casos analizados se aprecia, que para la posición del pilote $L_x/2$ ($S=8.66\text{m}$) tanto para el momento máximo y axial máximo de 1000 y 2000 (Mp- kNm/m y Np- kN/m) es donde se obtiene el valor más alto del factor de seguridad, considerando que el centro del talud es la posición idónea para el pilote (figura 6.19). A diferencia de lo que se obtuvo con el teorema de análisis límite en el artículo de Ausilio et al. (2001), donde el pie del talud es la posición óptima. Pero esto puede ser debido a que Ausilio et al., (2001) minimizan la fuerza resistente que hace el pilote.

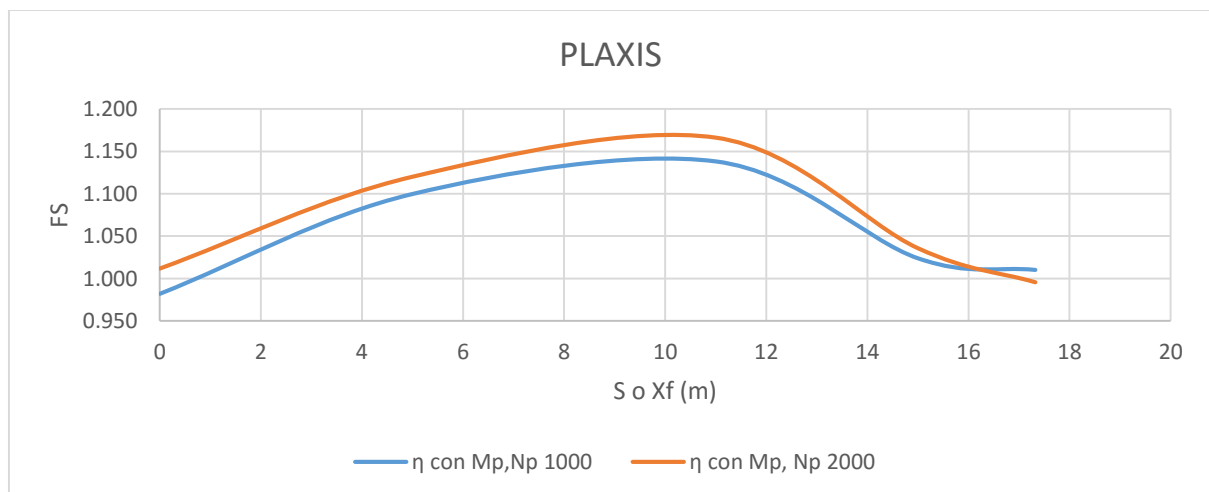


Figura 6.19. Factor de seguridad vs. La posición del pilote para el talud, PLAXIS.

6.3.2 GEOSTUDIO

En este apartado, se busca determinar la posición óptima de un pilote mediante el método de equilibrio límite con la herramienta GEOSTUDIO del caso estudiado por Ausilio et al. (2001) mediante el método de teorema de análisis límite y comparar los resultados obtenidos.

El análisis en GEOSTUDIO se elaboró introduciendo la geometría de la figura 6.17 descrita en el apartado 6.3.1 en el diseño con PLAXIS, con los parámetros del suelo de la siguiente tabla 6.5. El modelo geométrico de GEOSTUDIO se presenta en la figura 6.20.

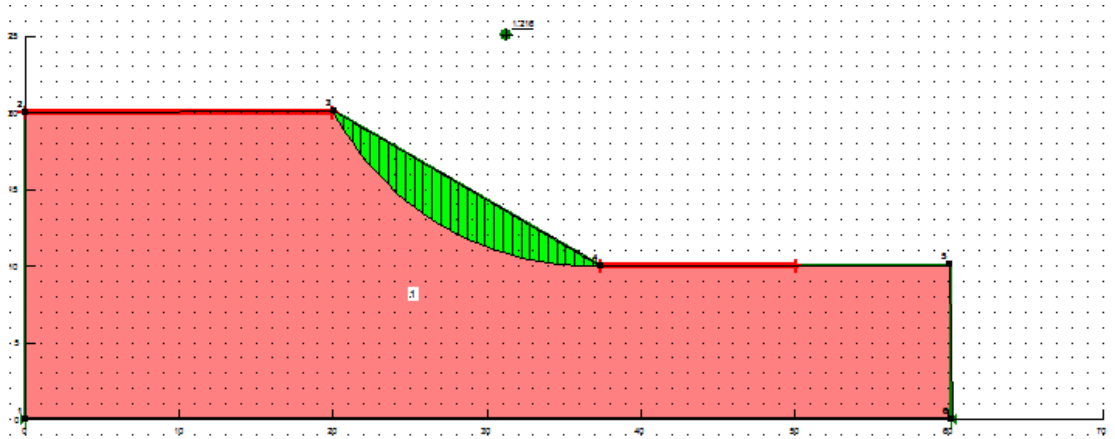
Datos		
C	4.7	kPa
γ	20	kN/m ³
φ	25	°
β	30	°
H	10	m
Lx	17.32	m

Tabla 6.5. Datos y parámetros del talud. C: cohesión, γ peso específico del suelo, φ ángulo de rozamiento interno, β pendiente del talud, H altura del talud, Lx longitud de la base del talud.



Figuras 6.20. Diseño del talud en GEOSTUDIO.

Realizando el mismo procedimiento de cálculo, descrita anteriormente en el capítulo 2, apartado 2.3, se obtuvo como resultado para el talud sin pilotes un factor de seguridad de 1.216 (FS=1.216), igualándose prácticamente con el factor de seguridad obtenido por Ausilio et al. (2001). Se generó una superficie de deslizamiento en la pendiente del talud parecida a la generada en PLAXIS (figura 6.21).



Figuras 6.21. Superficie de deslizamiento del talud obtenida en GEOSTUDIO.

En el caso de la implementación de pilotes se fijará la fuerza cortante F , para calcular la fuerza estabilizadora con la formula $k = \frac{F}{\frac{1}{2}\gamma H^2}$, obtener el factor de seguridad en las posiciones de cambio ($Lx=0, 1/3Lx, 1/2Lx, 3/4Lx$ y $Lx=1$) y poder obtener la relación $\eta=FS/Fs_0$ del talud en cada una de las posiciones del pilote. De esta manera se podrá comparar con el análisis presentado por (Ausilio et al. (2001).

La tabla 6.6 a continuación, contiene los resultados del factor de seguridad obtenido para la fuerza de 50 kN/m y 100 kN/m con sus respectivos valores de la relación η calculado en cada posición evaluada.

Lx	17.32 m	FS_0	1.216		
X_f/Lx (m)	S o X_f (m)	$F=50$ kN/m	$F=100$ kN/m	η con $F=50$ kN/m	η con $F= 100$ kN/m
0	0	1.216	1.216	1.000	1.000
1/3	5.77	1.424	1.600	1.171	1.316
1/2	8.66	1.400	1.578	1.151	1.298
3/4	12.99	1.377	1.563	1.132	1.285
1	17.32	1.358	1.545	1.117	1.271

Tabla 6.5 Posición, factor de seguridad y fuerzas cortantes del análisis del talud en GEOSTUDIO.

En el análisis de la relación η para cada posición del pilote estudiada se nota en la figura 6.22, que los resultados arrojados en GEOSTUDIO, son muy similares a lo que obtuvo Ausilio et al. (2001) en su artículo. A medida que nos alejamos del pie del talud se requiere uno mayor valor de la fuerza estabilizadora. Para ambas fuerzas cortantes analizadas se obtiene que cerca del pie del talud ($S= 5.77$ m), es la posición más óptima para colocar el pilote, debido a que es donde se obtiene mayor factor de seguridad y mayor valor de la η (tabla 6.6).

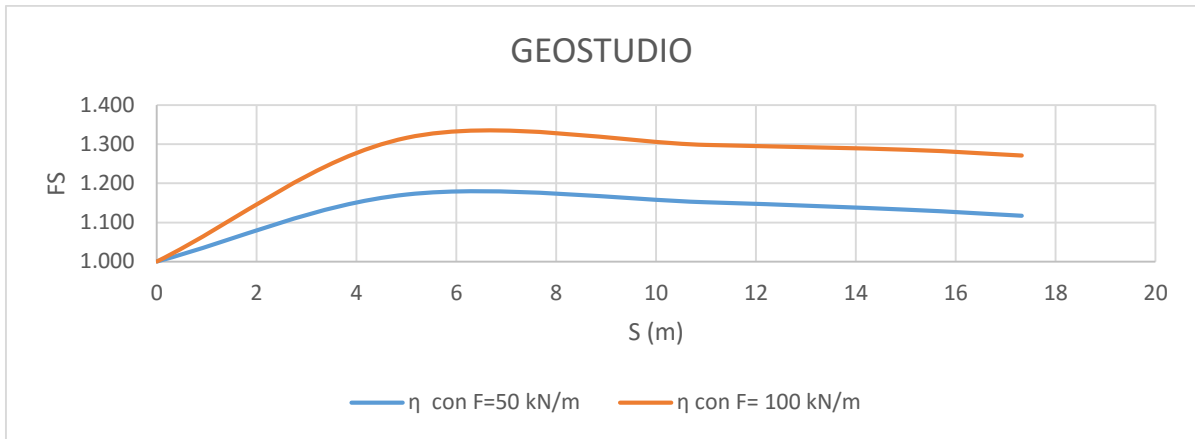


Figura 6.22. Factor de seguridad Vs. Posición del pilote en GEOSTUDIO.

6.4 Análisis y comparación de resultados (Ausilio et al. 2001, PLAXIS y GEOSTUDIO)

Al comparar los resultados obtenidos con PLAXIS y GEOSTUDIO con los resultados con el método de teorema de análisis limite en el caso del talud sin pilote, los valores son similares. El factor de seguridad de los análisis limite es de FS=1.19, de PLAXIS FS=1.17 y el de GEOSTUDIO FS=1.21 (tabla 6.7), con diferencias mínimas entre ellos.

Talud sin pilote	
Métodos / Programas	Factor de seguridad
Ausilio et al. (2001)	1.19
PLAXIS	1.17
GEOSTUDIO	1.21

Tabla 6.7 Factor de seguridad del análisis del talud de Ausilio et al. (2001), comparado con PLAXIS y GEOSTUDIO para el talud sin pilote.

Al momento de colocar el pilote las relaciones son totalmente diferentes. Ello es debido a que en los análisis limite se obtiene la ubicación óptima del pilote del pilote cerca al pie del talud, contrario al análisis realizado en PLAXIS, el cual muestra que esta posición no genera ninguna resistencia al desplazamiento, considerando la posición óptima en el centro del talud. Mientras que con GEOSTUDIO se obtuvo los mismos resultados que Ausilio et al. (2001), resultando que la posición optima del pilote, está cerca del pie del talud, donde la fuerza proporcionada por los pilotes para alcanzar el valor seleccionado de η , toma el valor más bajo de la fuerza

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

estabilizadora necesaria. Sin embargo, la comparación con PLAXIS ya se ha visto que es mucho más difícil, ya que en este programa los pilotes se tratan de manera diferente.

GEOSTUDIO sigue el mismo patrón de la relación del radio $\eta=FS/F_{so}$ para $m=0$, $m=1/3$ y $m=1/2$ (Ausilio et al. (2001), necesitando mayor valor de la fuerza estabilizadora a medida que nos alejamos del pie del talud, en cambio en PLAXIS como se obtiene que el centro del talud es la mejor posición de colocar el pilote no guarda semejanza directa con esta relación.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones

Una vez finalizados la modelización, cálculos y análisis de los diferentes casos de la fase no drenada y drenada, con y sin la implementación de pantalla de pilotes en el modelo, mediante el método de equilibrio límite utilizando el programa GEOSTUDIO y el método de elemento finitos con el programa PLAXIS, es necesario extraer las principales conclusiones del trabajo.

El agua y la colocación de elementos estructurales, tienen una influencia importante sobre el suelo y también en la resistencia al corte. Por tal razón uno de los objetivos de este trabajo ha sido analizar el modelo geométrico en condición no drenada y drenada con los programas GEOSTUDIO y PLAXIS para comparar si existen similitudes entre los resultados, para así conocer cuál es el funcionamiento de estas herramientas y tener una referencia del margen de seguridad que hay entre ellos.

A pesar de que el programa PLAXIS requiere de más parámetros de entradas del suelo que GEOSTUDIO, tanto en los casos de condición no drenada y como drenada para el talud sin pilotes los programas arrojan resultados similares. Esto es debido a que comparamos situaciones de rotura solo con terreno y estas depende primordialmente del valor de la resistencia al corte sin drenaje en condiciones no drenada y del ángulo de fricción y la cohesión en condiciones drenada (C_u y ϕ), que fue el mismo en ambos casos.

En la modelación del talud con la pantalla del pilote los resultados obtenidos son muy diferentes en ambos programas para las distintas posiciones analizadas. Esto es debido a que los dos programas consideran de forma diferente la configuración de trabajo del pilote, GEOSTUDIO solo se fundamenta en el cortante que resiste el pilote y PLAXIS considera la relación suelo-pilote, trabajando con el EA, EI, peso, momento máximo y axil máximo del pilote, proporcionando PLAXIS un mecanismo de interacción más completo que el que plantea GEOSTUDIO, que se basa solo en la fuerza de corte.

En el caso de la implementación de los pilotes cortos en ambos programas el talud rompe por el suelo como por el pilote, debido a que, en la mayoría de las posiciones, este queda por encima de la superficie de falla. Para las tres (3) fuerzas cortantes asignadas en GEOSTUDIO, este proporciona el mismo valor del factor de seguridad de 2.022 ($FS=2.022$) considerando que, aunque se aumente la fuerza el pilote, este no causa ningún efecto. Mientras que en PLAXIS, aunque el talud sigue estando en rotura, a medida que se mejora las condiciones del pilote, el factor de seguridad aumenta aportando a la estabilidad del mismo. En el proceso de análisis del caso no drenado con pilotes largos, GEOSTUDIO arroja los mismos valores siempre para las posiciones ($s=15$, $s=11$ y $s=5$ m), lo que están sobre el talud, por lo que con este programa no sería posible obtener la posición más óptima de colocar el pilote, en cambio PLAXIS nos dice que la ubicación del pilote en $s=5$ m, en el pie del talud, es la posición más óptima. Un punto importante en el estudio es que al reducir la fuerza cortante en GEOSTUDIO a $F= 370$ kN/m, a pesar de que los cortantes obtenidos con PLAXIS eran más grandes, se obtuvo factores de seguridad similares. Ya en el análisis drenado, para el caso 3, GEOSTUDIO da que la ubicación del pilote en $s=11$ m, el

centro de la pendiente, es la más adecuada y PLAXIS en cambio arroja que $s=5m$, el pie del talud, es la posición óptima. Ambos programas en el caso 4, coinciden que, en $s=5m$, el pie del talud, es la que nos ofrece mejor seguridad en la estabilidad del talud.

En general, los taludes presentaban el mismo comportamiento de superficie de falla, pero aun reflejando el problema de diferencia en los cortantes máximo. Por tanto, si se usan pantallas de pilotes como medio de contención, se observa que la estabilidad de las laderas está influenciada significativamente por la interacción suelo-pilote. En los ejemplos estudiados, el factor de seguridad de taludes reforzados con pilotes obtenidos por el método de elementos finitos es en general menor con respecto a los obtenidos mediante el método de equilibrio límites, mostrando que el programa GEOSTUDIO nos da factores de seguridad más sobre evaluados que PLAXIS. Por otra parte, el concepto de Φ -c reduction de PLAXIS se complica cuando hay elementos estructurales, que no se ven influenciados por dicho proceso de reducción de la resistencia. La comparación entre GEOSTUDIO y PLAXIS, además, puede ser más compleja, según sea el mecanismo de rotura del talud o del pilote. De hecho, el pilote no rompe de forma directa en GEOSTUDIO, pero sí que puede romper en un análisis de PLAXIS.

En el caso de GEOSTUDIO se obtuvieron los mismos resultados que Ausilio et al. (2001) utilizando los Teoremas de Análisis Límite, que considera la ubicación óptima del pilote, cerca del pie del talud. De manera que el método de equilibrio límite y teorema de análisis límite dan lugar a resultados similares. En el caso del artículo de Hassiotis et al. (1997), con GEOSTUDIO se simula la misma respuesta, pero no queda claro si colocar el pilote en la parte superior del talud, es más conveniente ya que requiere una mayor fuerza del pilote y eso afecta a otros factores como el costo.

7.2 Futuras líneas de investigación

En este trabajo de tesina se ha comparado los resultados de análisis con el método de equilibrio límite y el método de elementos finitos en un talud, tanto en el caso no drenado como drenado y se ha visto las dificultades que existen cuando se implementa el pilote como elemento estructural de contención. En particular, los factores de seguridad en taludes reforzados con pilotes no son directamente comparables entre ambos métodos. Por lo que en trabajos futuros se podría seguir investigando en la forma de comparar estos dos métodos, o de estructurar lo más real posible, la forma de diseño que se haga en GEOSTUDIO, elaborando análisis con otros elementos de contención como anclajes, muros, etc., así ver si tienen el mismo comportamiento. Porque, aunque el método de elemento finitos presenta ventajas conceptuales sobre el método de equilibrio límite, este sigue siendo muy usado en la práctica, por su fácil uso y costo.

La dificultad de comparación entre métodos tiene que ver también con las siguientes partes:

- ✓ La superficie de rotura cambia cuando se introduce una pantalla de pilote en el talud.
- ✓ En algunas situaciones se busca la posición de los pilotes que hace máximo el factor de seguridad y en otras se busca minimizar la fuerza que ejercen.

Los futuros trabajos de investigación podrían tratar de abordar mejor estos dos puntos, estudiando cómo cambia la superficie de falla con pilotes y analizando las dos variables que intervienen: factor de seguridad y fuerza ejercida.

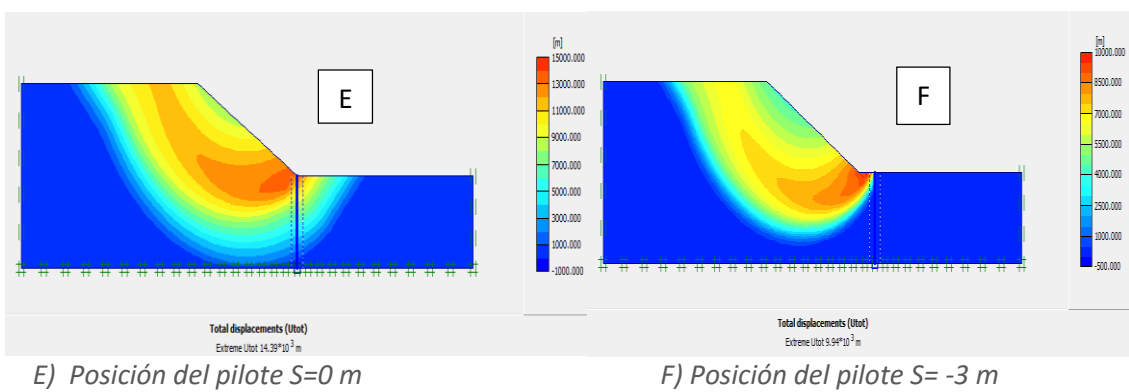
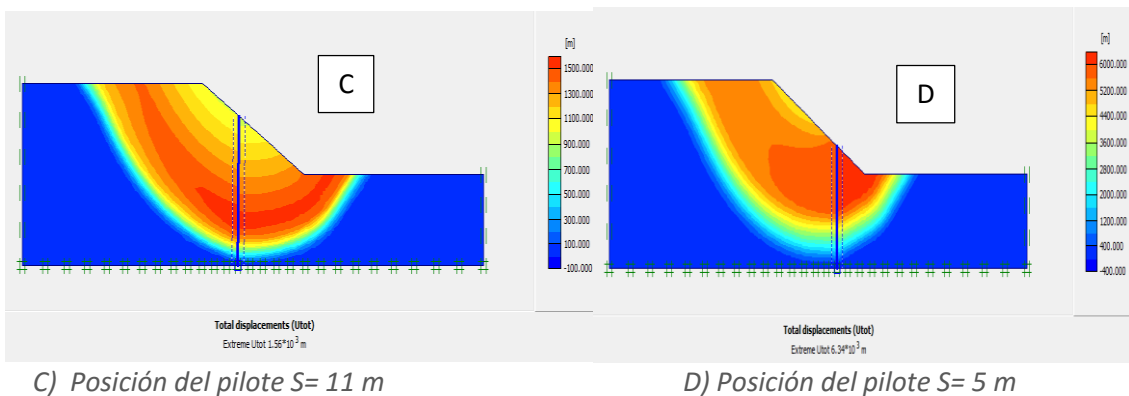
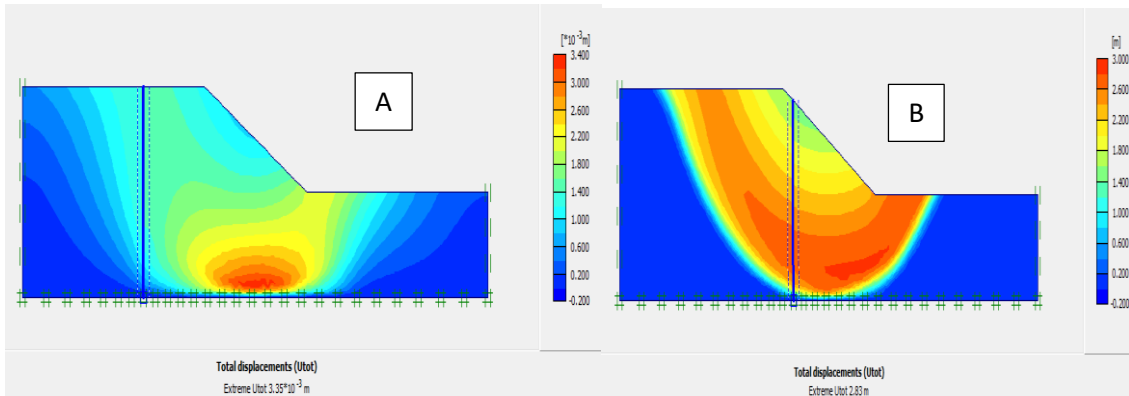
REFERENCIAS

1. Alonso, E. (2005). *Estabilidad de Taludes. Notas de la asignatura. Barcelona: UPC.*
2. Chow, Y. K. (1996). *Analysis of Piles used for Slope Stabilization. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 20, 635-646.*
3. Corominas, J., & García Yagüe, A. (1997). *Terminología de los movimientos de laderas. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, (págs. 1051-1072.) Granada.*
4. Díaz D., Y. A., & López A., E. F., (2008). *PLAXIS como herramienta de modelación para la solución de algunos problemas geotécnicos reales en la ciudad de Punta Arenas. Universidad de Magallanes.*
5. E. Ausilio, E. Conte, & G. Dante (2001). *Stability Analysis of Slopes Reinforced with Piles. Computer and Geotechnics, 28 (2001), 591-611.*
6. Frías V., E., (2004). *Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.*
7. *GEOSTUDIO Stability Modeling with SLOP/W, 2004.*
8. Grases, J. (1997). *Estudio de caso: Vulnerabilidad de los Sistemas de Agua Potable Frente a Deslizamiento. Caracas, Venezuela: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencia de Ambiente.*
9. Jiménez Salas, J.A. (1976). *Geotecnia y Cimientos II. Madrid: Rueda.*
10. Lloret A. (2011). *Análisis en Rotura. Equilibrio Limite, Estado de Rankine y Teoremas. Apuntes curso Mecánica de Suelo, Universidad Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona.*
11. Lloret A. (2011). *Análisis en servicio y en rotura. Apuntes curso Mecánica de Suelos, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.*
12. Martínez Gallego, J. & Balaguer Carmona, J., (1998). *Litología, aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamientos en la comunidad Valenciana (págs. 61-68).*
13. Matteis, A. F. (2003). *Estabilidad de Taludes. Universidad Nacional del Rosario, Argentina.*
14. Núria Martí i Audí, (2008). *Construcció II- Cimentaciones Profundas (págs. 1-43). LA SALLE (Curs 2008-2009).*
15. Ortuño, L., Murillo, T. (2010). *Estabilización de taludes Mediante Pilotes. Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010 (págs. 1-24). Argentina: CAMSIG 2010.*
16. *PLAXIS Material Models Manual. (2011), Plaxis.nl*
17. *PLAXIS 2D REFERENCE MANUAL, Versión 9.0, Plaxis.nl*
18. Ramírez C., R. G., y Salcedo B., Y. (2006). *Comparación de los Métodos de Esfuerzo-Deformación y Equilibrio Limite en la Modelación de Estabilidad de Taludes utilizando los Software PLAXIS y SLOPE/W. Universidad Industrial de Santander.*
19. S. Hassiotis, J.L. Chameau, and M. Gunaratne, (1997). *Design Method for Stabilization of Slopes with Piles. JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEONVIRONMENTAL ENGINEERING*
20. Suárez Díaz, J. (1998). *Estructuras de Contención. En J. Suárez Díaz, Deslizamientos y Estabilidad de taludes en Zonas Tropicales (págs..473-541). Colombia: Ingeniería de Suelos Ltda.*
21. Suárez Díaz, J. (2009). *Análisis de Estabilidad. En J. Suárez Díaz, Deslizamientos. Análisis Geotécnico Vol. 1 (págs. 128-171). Colombia: UIS.*
22. USGS, Wikipedia. *Imagen del deslizamiento causado por sismo de El Salvador del 13 de enero de 2001. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ElSalvadorslide.jpg>*
23. Vargas F., (2015). *Estabilización de taludes mediante pilotes; Análisis por Equilibrio Limite y Elementos Finitos. Universidad Politècnica de Catalunya.*

ANEXOS

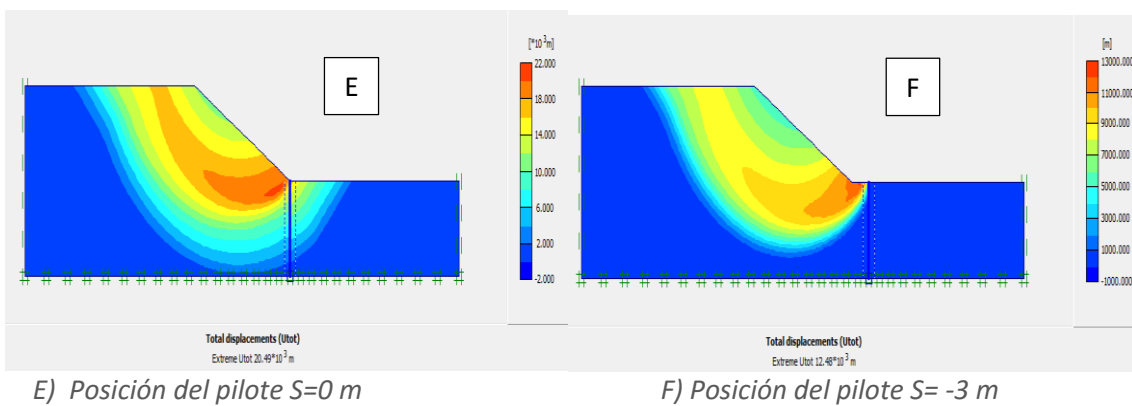
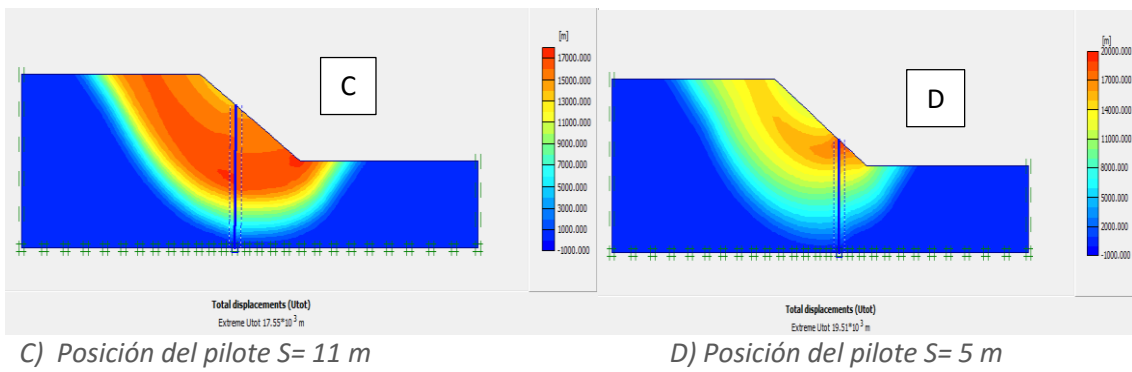
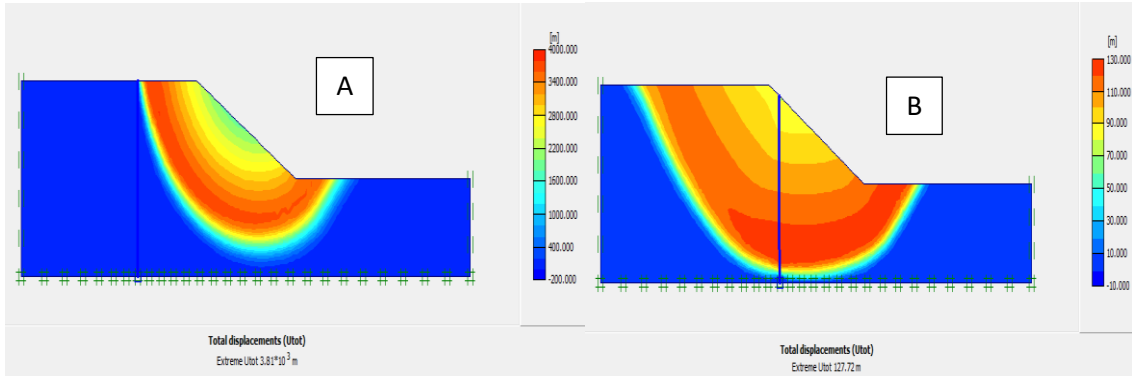
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO I: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas), con momento máximo de $M_p=1000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=1000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.6).



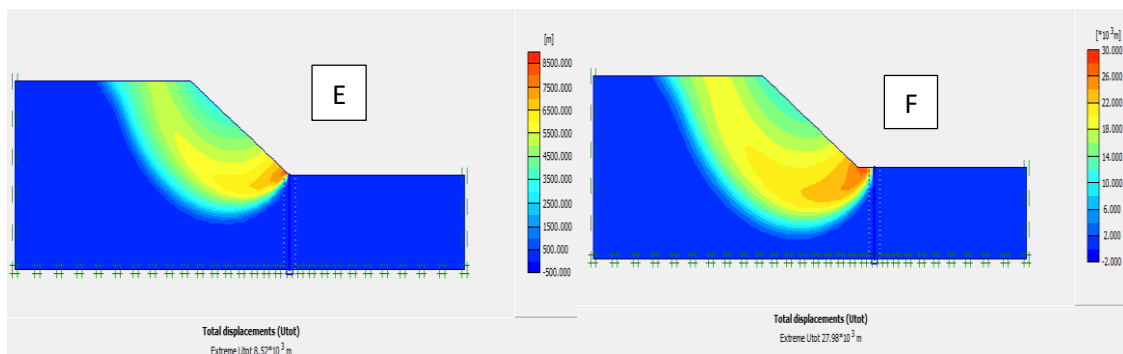
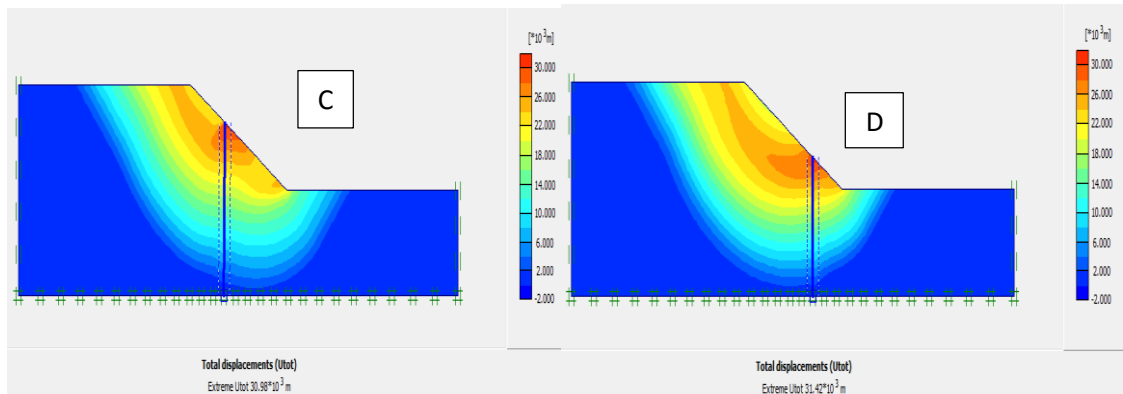
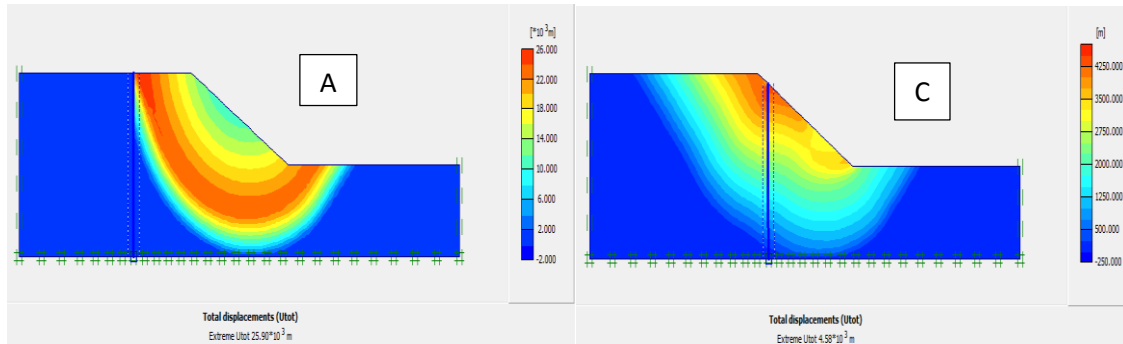
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO II: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas) con momento máximo de $M_p=2000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=2000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.6).



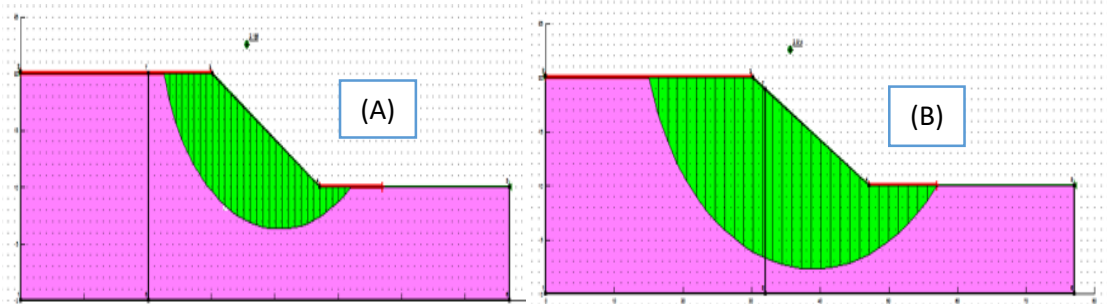
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO III: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas) con momento máximo de $M_p=4000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=4000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.6).



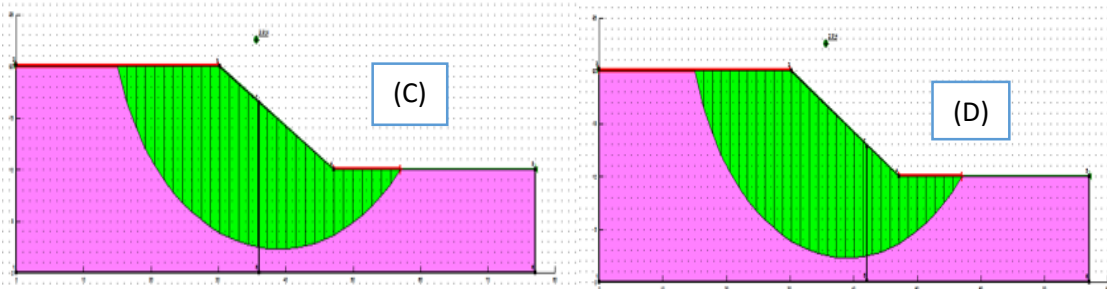
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO IV: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas) con la fuerza cortante de 542.4 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.1).



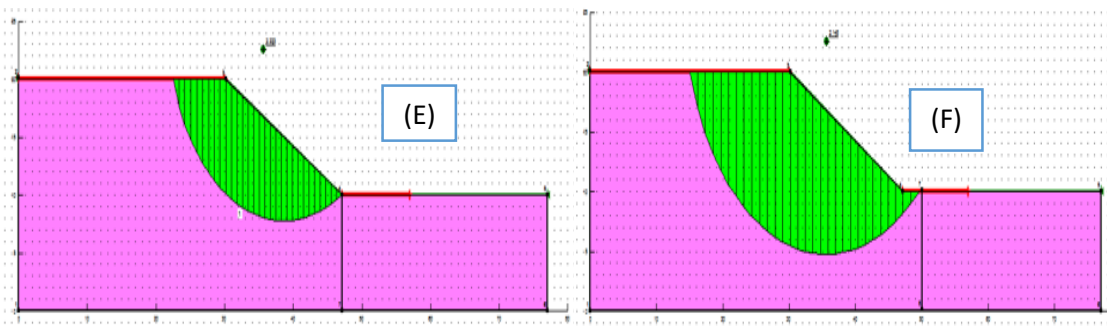
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$

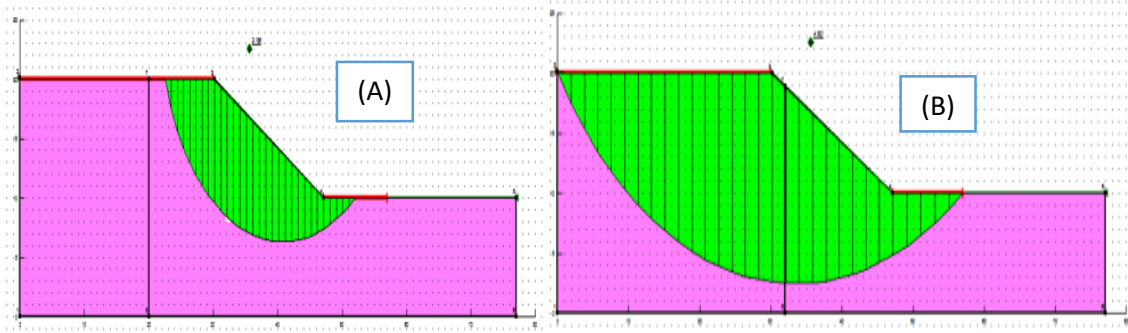


E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

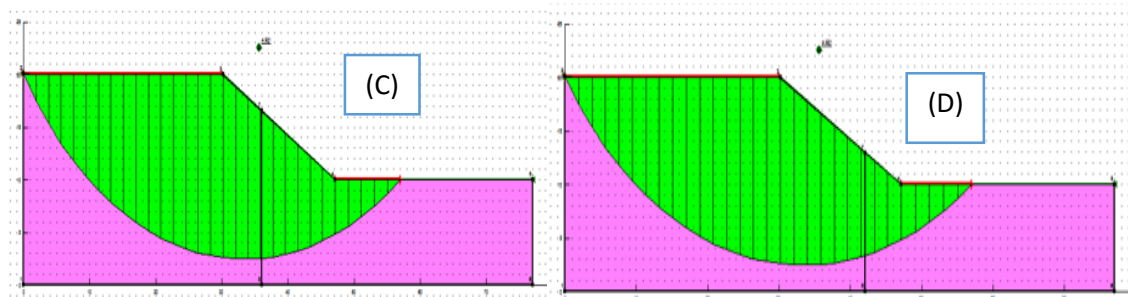
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO V: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas) con la fuerza cortante de 1085 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.1)



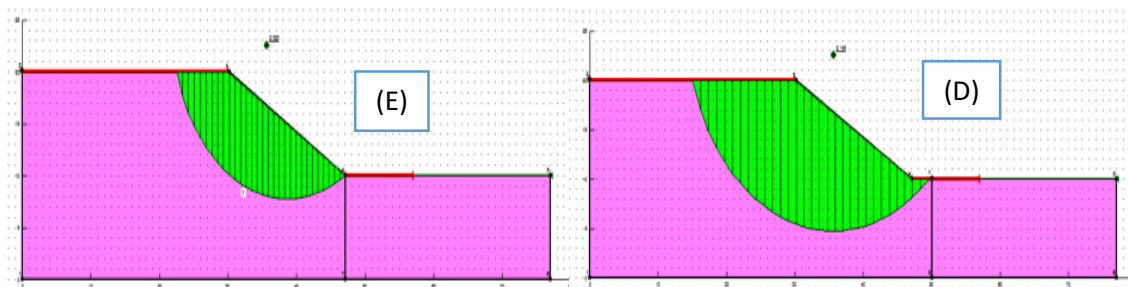
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$

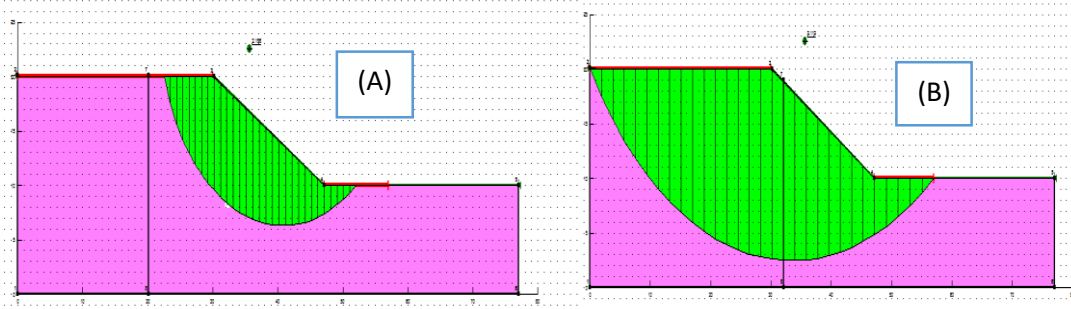


E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

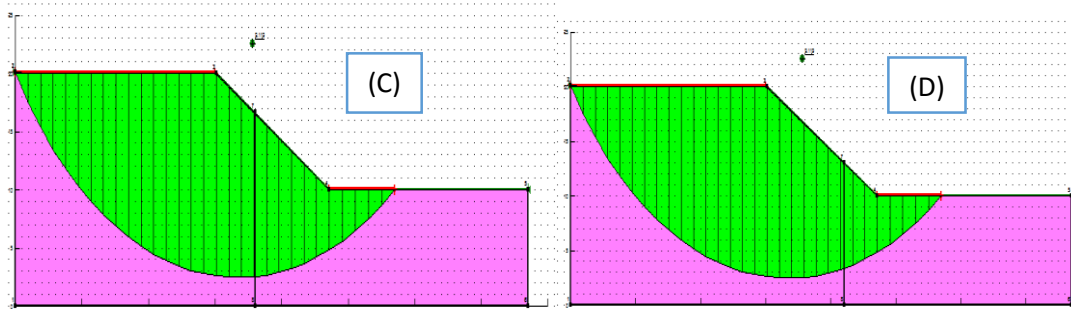
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO IV: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes largos (coordenadas verticales nulas) con la fuerza cortante de 1500 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.1)



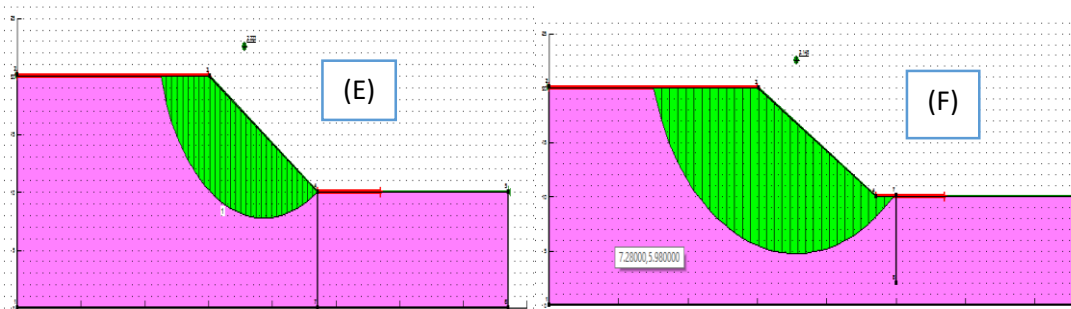
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$



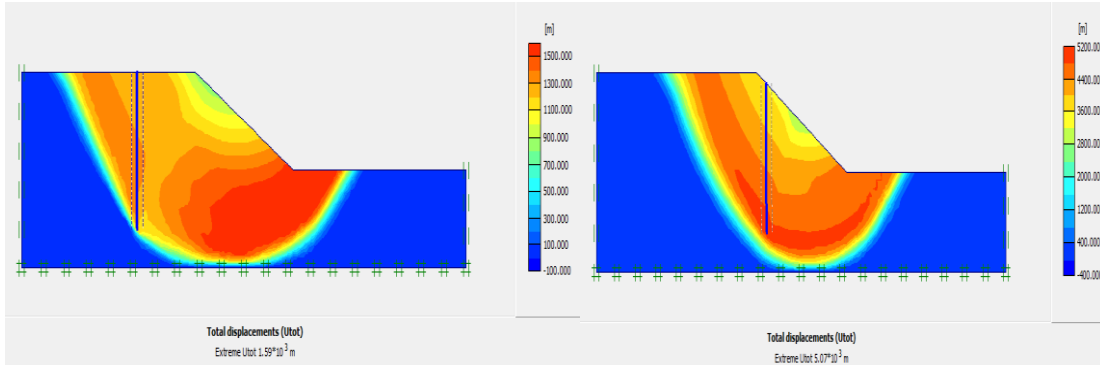
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

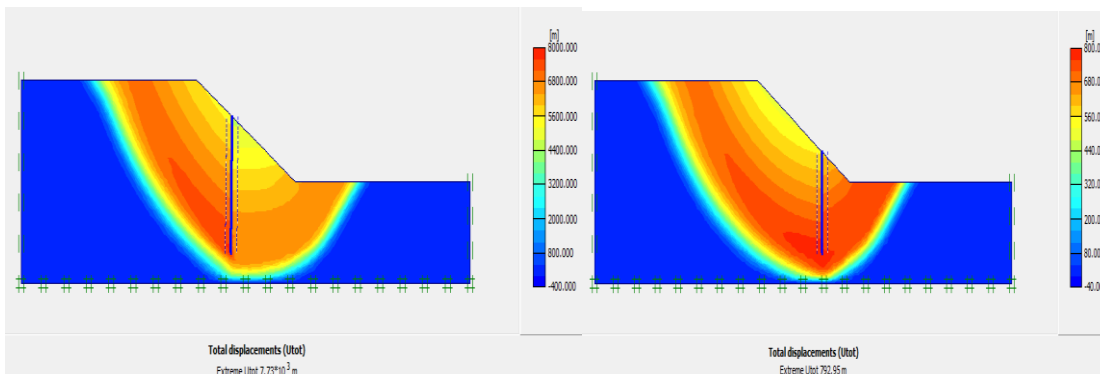
ANEXO VII: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con momento máximo de $M_p=1000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=1000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.7).

Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



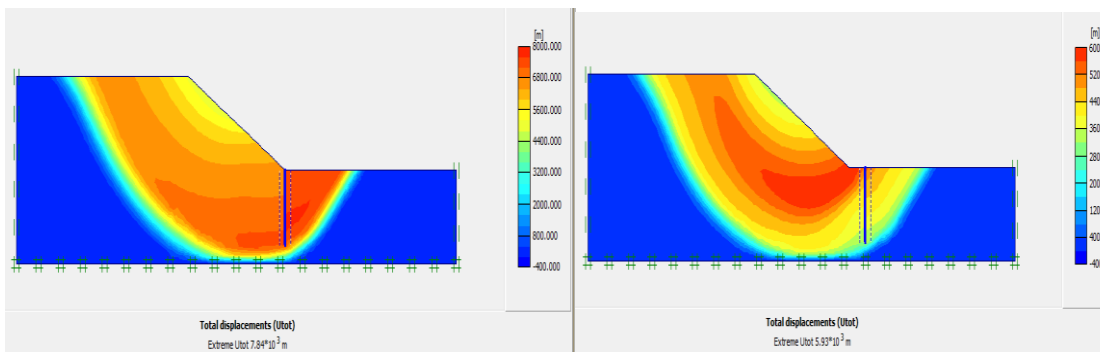
A) Posición del pilote $S= 27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S= 15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S= 11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S= 5 \text{ m}$



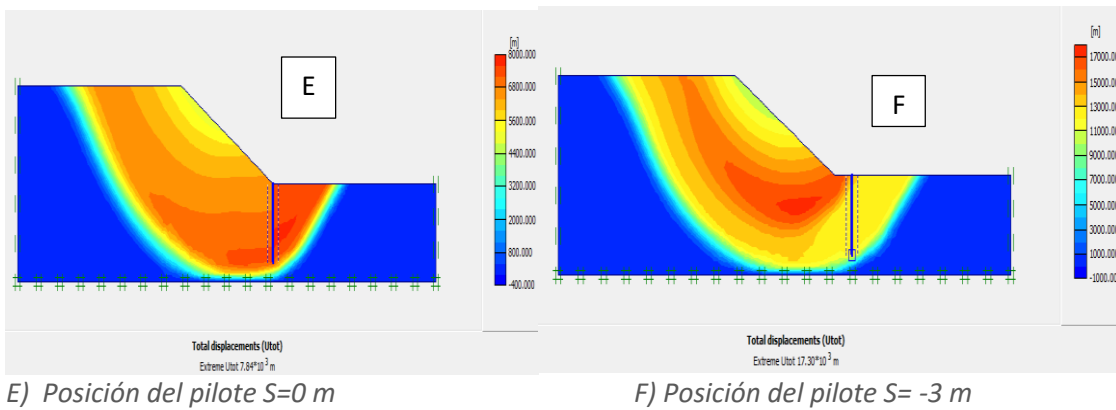
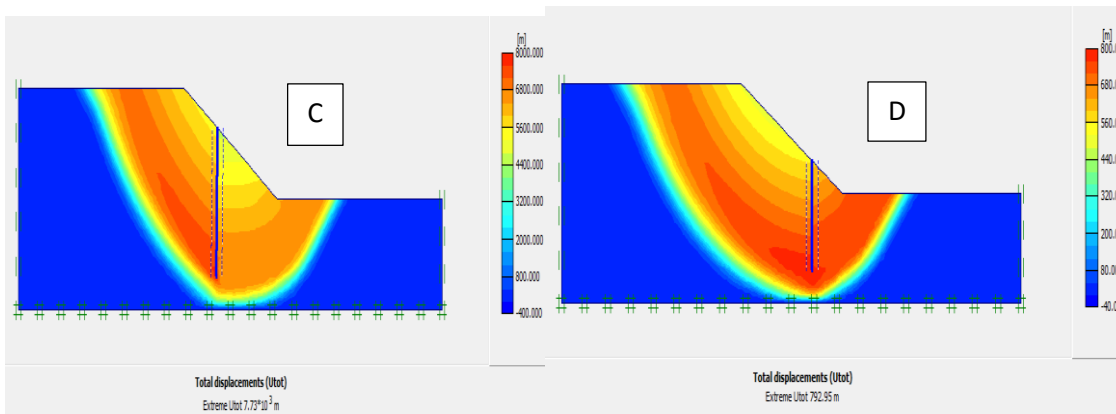
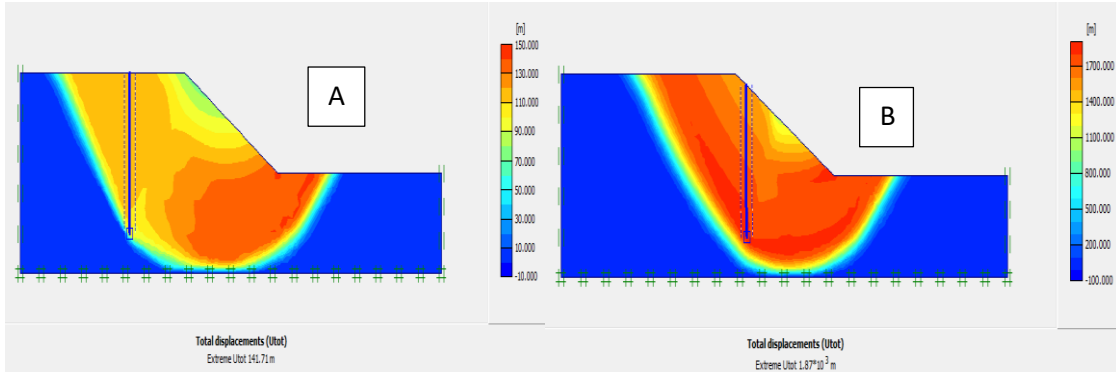
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S= -3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXO VIII: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con momento máximo de $M_p=2000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=2000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.7).

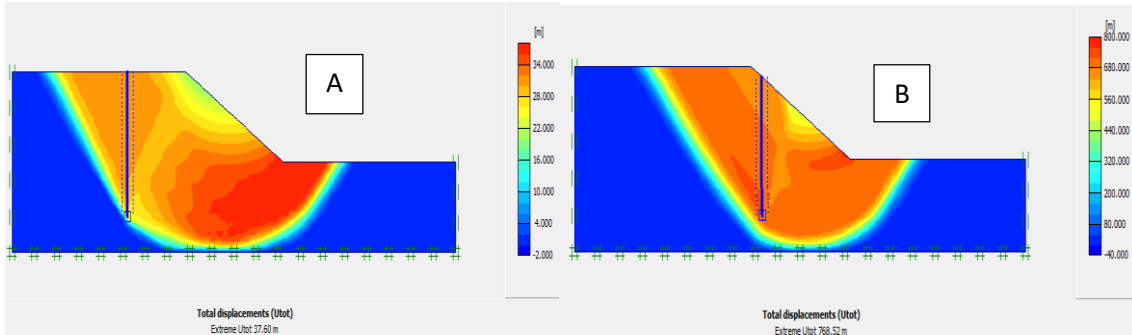
Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

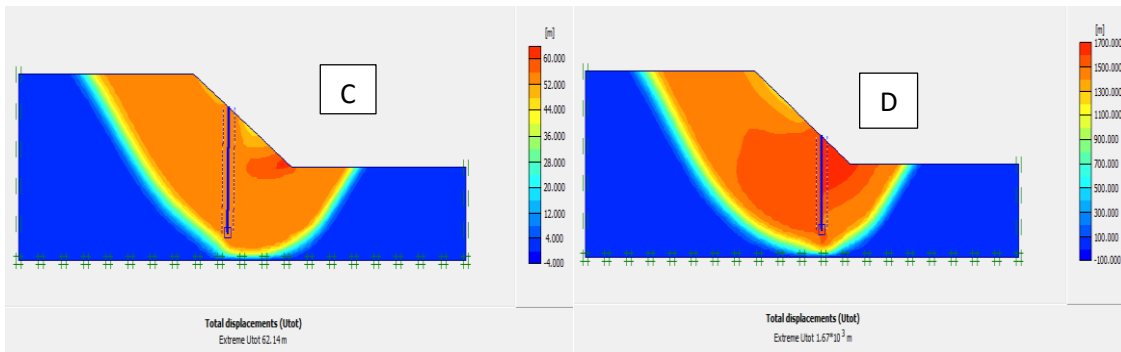
ANEXO IX: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con momento máximo de $M_p=4000 \text{ kNm/m}$ y axial máximo de $N_p=4000 \text{ kN/m}$ en las diferentes posiciones con PLAXIS (tabla 4.7).

Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



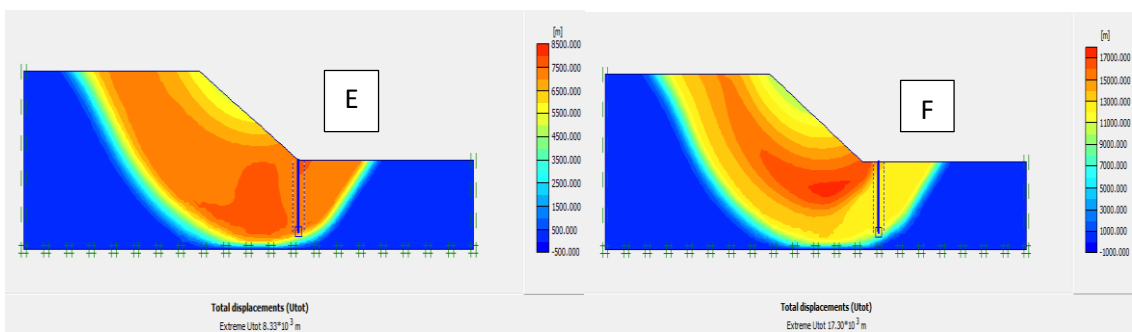
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$



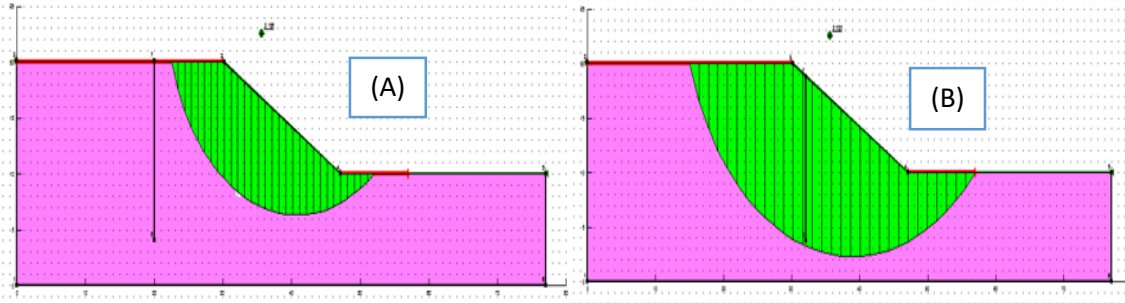
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

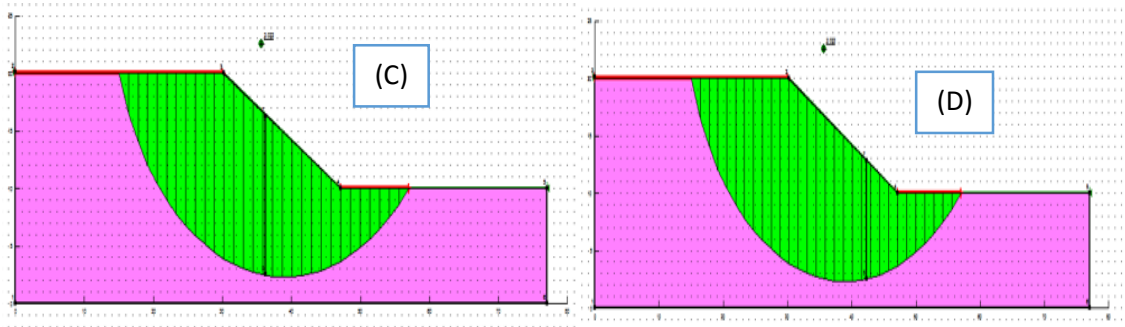
ANEXO X: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con la fuerza cortante de 542.4 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.2).

Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



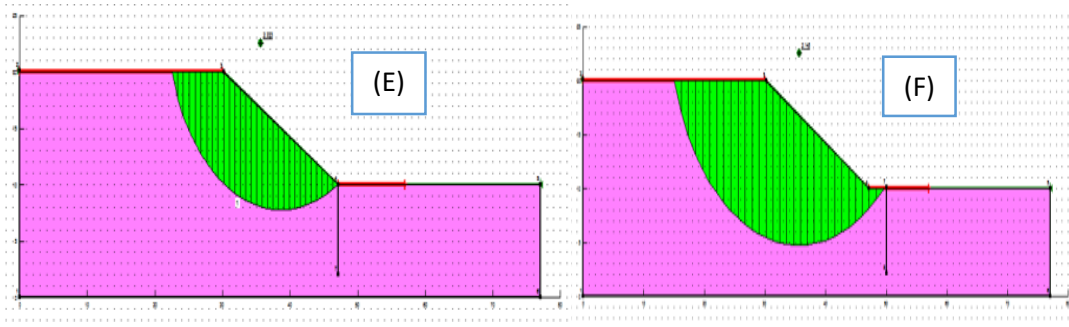
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$



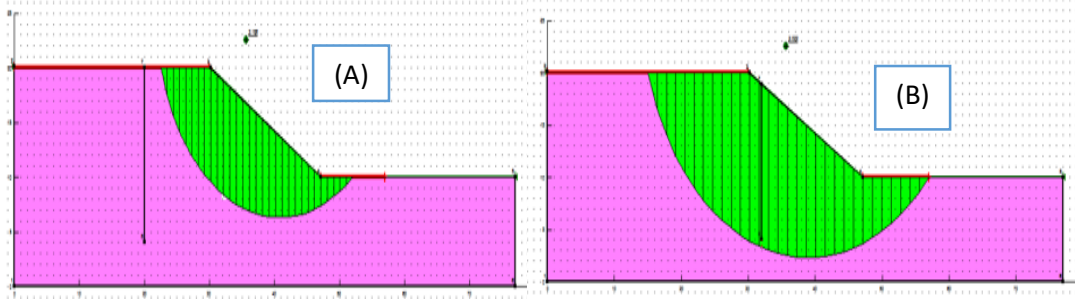
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

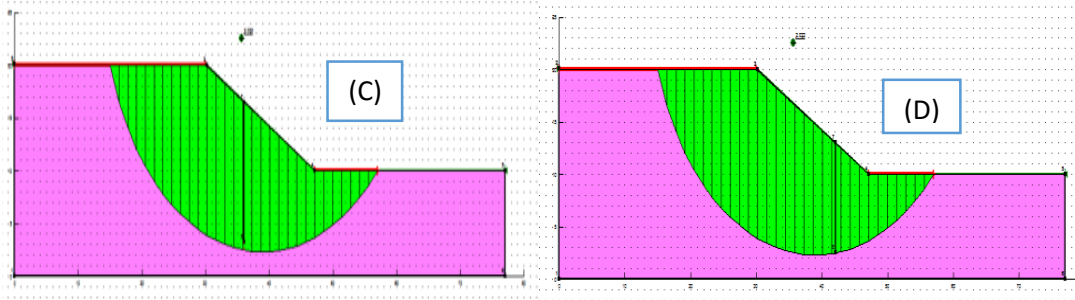
ANEXO XI: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con la fuerza cortante de 1085 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.2).

Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



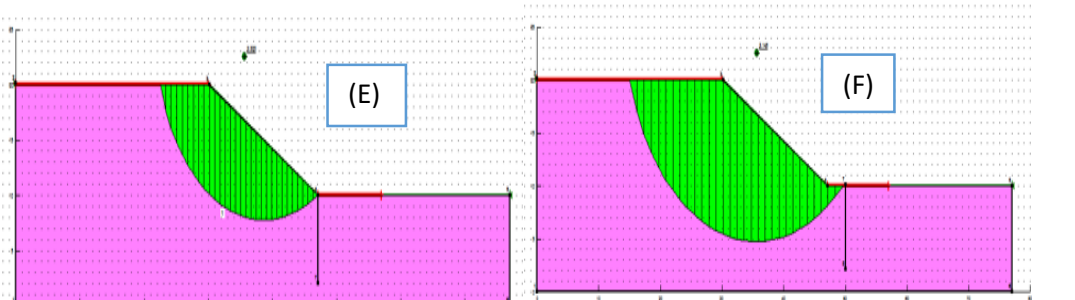
A) Posición del pilote $S=27 \text{ m}$

B) Posición del pilote $S=15 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$



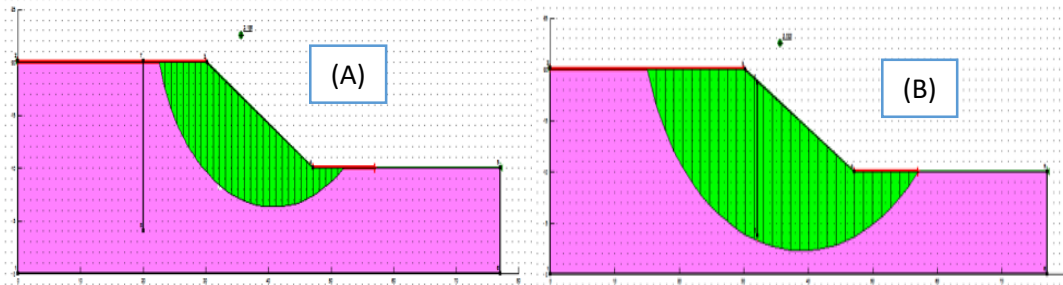
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

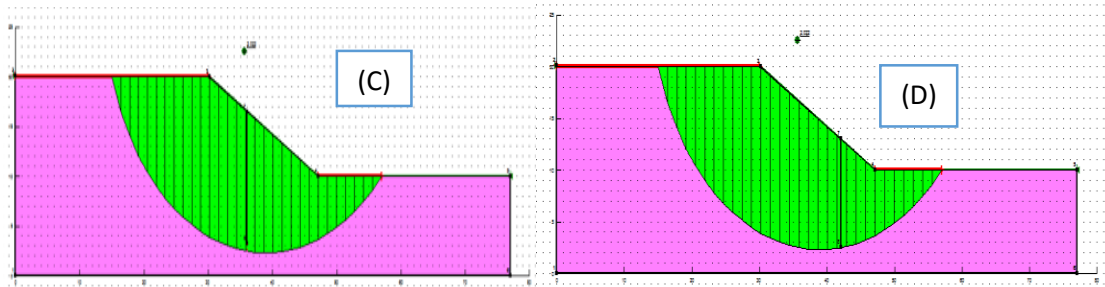
ANEXO XII: Superficie de falla y comportamiento del talud con resistencia al corte sin drenaje de 68.8 kN/m^2 . Para pilotes cortos con la fuerza cortante de 1500 kN/m en las diferentes posiciones con GEOSTUDIO (tabla 4.2).

Pilotes cortos: separado a $D=L/5$



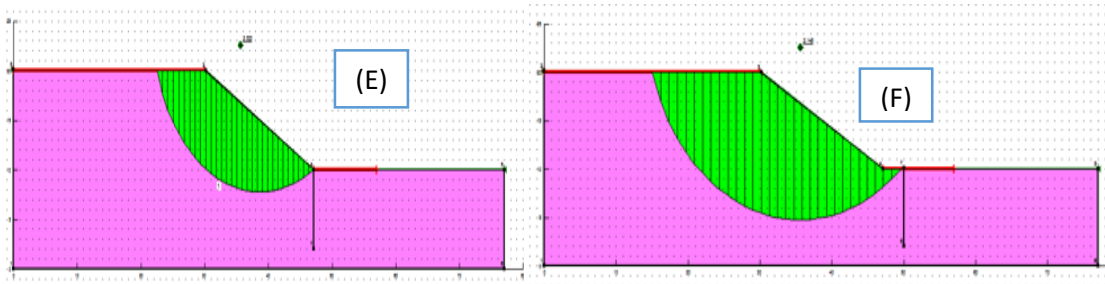
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$



C) Posición del pilote $S=11 \text{ m}$

D) Posición del pilote $S=5 \text{ m}$



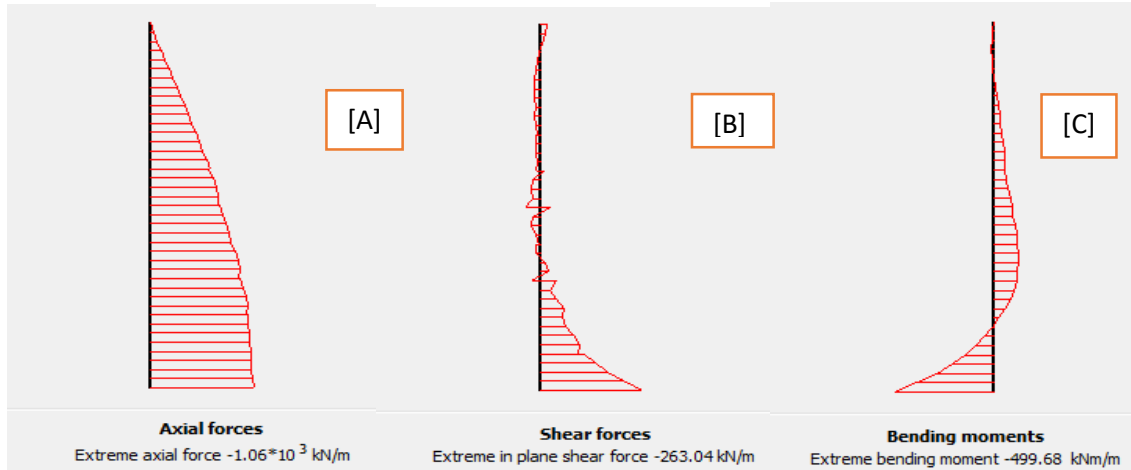
E) Posición del pilote $S=0 \text{ m}$

F) Posición del pilote $S=-3 \text{ m}$

Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

ANEXOS XIII: Resultados de los axiales, cortantes y momentos máximos del pilote, obtenidos en PLAXIS de la modelación del talud, del caso 2 (resistencia al corte sin drenaje de 34.4 kN/m^2 del suelo) (tabla 4.11).

Colocación del pilote a 27 m del pie del talud ($S=27 \text{ m}$).



A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=27 \text{ m}$ en PLAXIS.

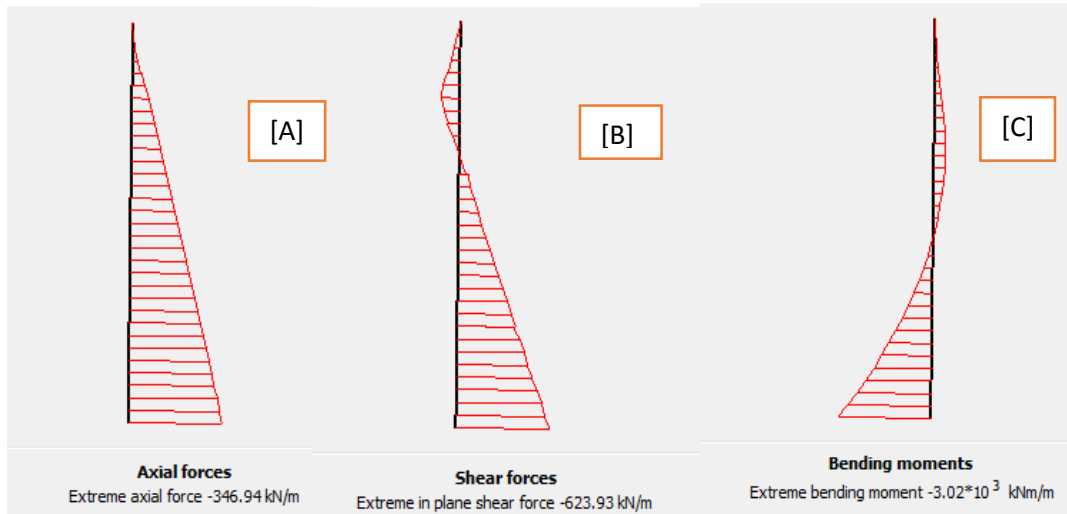
Colocación del pilote a 15 m del pie del talud ($S=15 \text{ m}$).



A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=15 \text{ m}$ en PLAXIS.

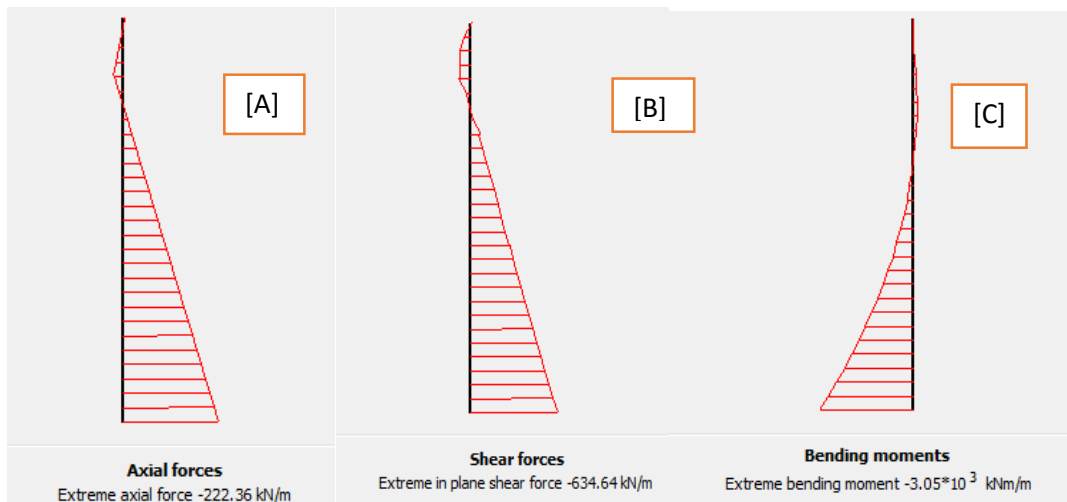
Estabilización de deslizamientos de tierras mediante pilotes

Colocación del pilote a 11 m del pie del talud ($S=11$ m).



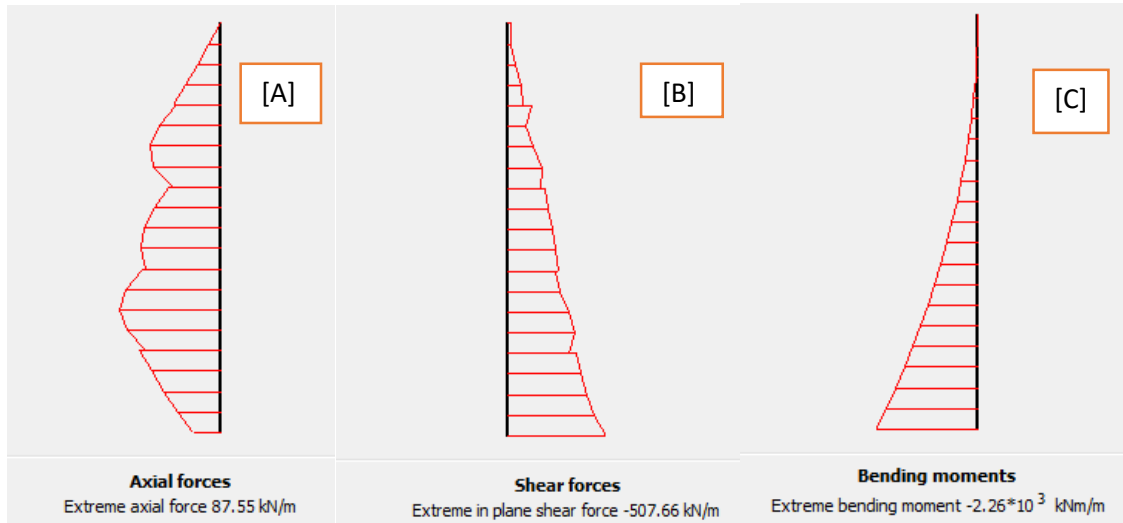
A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=11$ m en PLAXIS.

Colocación del pilote a 5m del pie del talud ($S=5$ m).



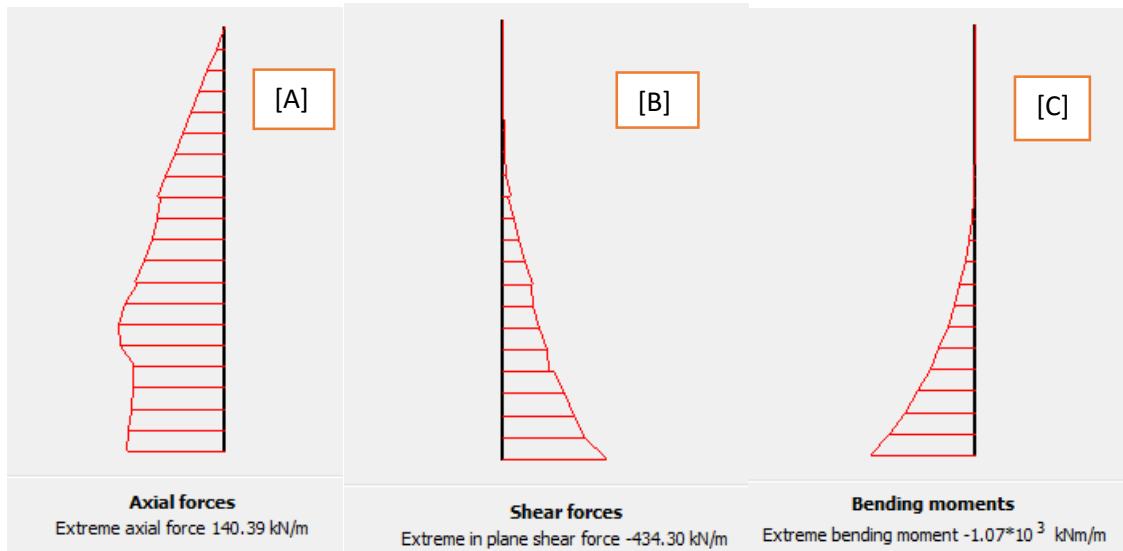
A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=5$ m en PLAXIS.

Colocación del pilote a 0 m del pie del talud ($S=0$ m).



A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=0$ m en PLAXIS.

Colocación del pilote a -3 m del pie del talud ($S=-3$ m).



A) Axial máximo, B) Cortante máximo y C) Momento máximo generado por el pilote en la posición $s=-3$ m en PLAXIS.