

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

“MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES CONTROLADOS POR LA PRESENCIA DE NIVELES DE DESPEGUE DE ALTA PLASTICIDAD Y PERMEABILIDAD”

Trabajo de fin de carrera previo a la
obtención del título de Ingeniero Civil

AUTOR:

Freddy Fabián Angamarca Angamarca

DIRECTOR:

Ing. Carmen Esparza Villalba

**LOJA – ECUADOR
2010**

Ingeniera

Carmen Esparza Villalba.

**DOCENTE DE LA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
Y DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE CARRERA;**

C E R T I F I C A:

Haber efectuado la revisión y corrección de la Tesis:

“MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES CONTROLADOS POR LA PRESENCIA DE NIVELES DE DESPEGUE DE ALTA PLASTICIDAD Y PERMEABILIDAD”, fue elaborada por el Egresado Freddy Fabián Angamarca Angamarca, bajo mi dirección, habiendo cumplido con los requisitos metodológicos, teóricos y prácticos e investigativos.

Después de la revisión, análisis y corrección respectiva, autorizo su presentación para la defensa y sustentación del proyecto de tesis.

Loja, Diciembre del 2010

Ing. Carmen Esparza Villalba
DIRECTOR DE TESIS

CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Freddy Fabián Angamarca Angamarca**, declaro ser autor del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 de Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

Freddy Fabián Angamarca Angamarca

AUTORÍA

Las ideas y conceptos, así como el tratamiento formal y científico de la metodología de la investigación contemplada en la tesis sobre **“MODELACIÓN NUMÉRICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES CONTROLADOS POR LA PRESENCIA DE NIVELES DE DESPEGUE DE ALTA PLASTICIDAD Y PERMEABILIDAD”**, previa a la obtención del grado de Ingeniero Civil de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja, son de mi responsabilidad.

Freddy Fabián Angamarca Angamarca

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres por su incansable apoyo en todas las etapas de mi vida, a mis abuelos quienes fueron pieza fundamental en la realización de este trabajo, a mis tíos por su apoyo moral y en especial a toda mi familia.

A mi abuelita Macrina Puchaicela, que en paz descansa, por darme el cariño e incentivar me a esta hermosa carrera en las primeras etapas de mi vida.

Dedicada a todos los profesionales que buscan la excelencia dentro este campo que día a día buscan alternativas para mejorar sus conocimientos y plasmarlos en la ejecución de obras civiles.

FREDDY

AGRADECIMIENTOS

Dejo constancia de mi profundo agradecimiento a:

A mi directora de tesis, Ing. Carmen Esparza Villalba por toda la dirección prestada para la ejecución de este trabajo, a mis padres Efrén Angamarca y Luz Angamarca, hermanos Jimmy y Evelyn, a mi familia y amigos por brindarme todo su apoyo incondicional.

FREDDY

ABSTRACT

The basin of Loja itself seen affected very serious for the instability of the slopes; doing collapse works of big magnitude as roads of communication, system of capatation, housing, etc. At all itself sum the loss economic and human what cause for slides unforeseen causes for modifications of grounds, for ground feeblest what have little resistance, for need of information and budget for take measuring what help at the stabilize of slope. This project propose pose an analysis of factor of security through the model numerical, with the objective of apply at four slopes what present instabilities in the sector Salapa.

On the other hand, there are different systems for preventing and correcting these instabilities, as slope revegetation, the use the structures complex what of one at other help at elevate the factor of security of slope, for what the risk of fault itself minimal or null. For which is realize a recopilation summary of information geotecnic and topographic of the slopes in study, doing a base of data what permit us realize a modelation in different software.

After that realize the modelation numeric for mid of software, in the present work utilice the program PLAXIS and SLOPE, utilize two metohodology different(elements finite and equilibrium limit, respective). Inside of the modelation numeric probe the iteration what exist at vary 3 state of level of water (natural, 1er level and 2do level of water)

Whit all the dates obtain for proceed at realize a base of dates, the which help doing an analize profound of variation of loading of water vs factor of security, permitting give solution for the stabilize of the slopes

Words key: stability of slopes, modelation numeric, plaxis, slope, element finite, equilibrium limit.

RESUMEN

La cuenca de Loja se ha visto afectada muy seriamente por la inestabilidad de los taludes, haciendo colapsar obras de grande magnitud como vías de comunicación, sistemas de captación, viviendas, etc. A todo esto se suma las pérdidas económicas y humanas que se producen por deslizamientos imprevistos provocados por modificaciones de suelos, por suelos débiles que tienen poca resistencia, por falta de información y presupuesto para tomar medidas que ayuden a la estabilización de taludes. Dentro de este marco, el presente trabajo plantea un análisis de factor de seguridad mediante la modelación numérica, con el objetivo de aplicarlo a cuatro taludes que presentan inestabilidad en el sector de Salapa.

Por otro lado existen distintos sistemas de prevención y corrección de este tipo de inestabilidades, que van desde sistemas como la revegetación, hasta el empleo de estructuras complejas que de una u otra manera ayudan a elevar el factor de seguridad del talud, para que el riesgo de falla sea mínimo o nulo.

Para lo cual se realiza una recopilación de información geotécnica y topográfica de los taludes en estudio, realizando una base de datos que nos permita realizar una modelación en diferentes softwares.

Seguidamente se realiza la modelación numérica por medio de software, en el presente trabajo se utiliza el programa PLAXIS y SLOPE, utilizando 2 metodologías diferentes (elementos finitos y equilibrio límite, respectivamente). Dentro de la modelación numérica se prueba la interacción que existe al variar 3 estados de nivel freático (natural, 1er nivel y 2do nivel freático)

Con todos los datos obtenidos se procede a realizar una base de datos, la cual permite hacer un análisis profundo de variaciones de carga freática vs factor de seguridad, permitiendo dar soluciones para la estabilización de los taludes.

Palabras clave: estabilidad de taludes, modelación numérica, plaxis, slope, elementos finitos, equilibrio límite.

Índice - Contenido

1.	GENERALIDADES	8
1.1	Introducción	8
1.2	Objetivos	9
1.2.1	Objetivo general	9
1.2.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Problemática	10
1.4	Justificación del Proyecto	10
2.	ESTABILIDAD DE TALUDES	13
2.1	Introducción	13
2.2	Definición de talud	13
2.2.1	Definición de estabilidad	14
2.2.2	Condición de inestabilidad	16
2.3	Causas que provocan fallas en taludes	17
2.4	Modelos de deslizamiento	19
2.5	Caracterización del talud mediante ensayos	19
2.5.1	Ensayos de campo	20
2.6	Tipos de fallas en taludes	21
2.7	Métodos de estabilización de taludes	22
3.	METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	26
3.1	Antecedentes	26
3.2	Parámetros necesarios	27
3.2.1	Archivo geotécnico	28

3.3	Herramientas disponibles	28
3.4	Metodologías para el análisis de la estabilidad	30
3.5	Superficie de falla	31
3.6	Métodos de análisis de estabilidad	32
3.6.1	Generalidades	32
3.6.2	Equilibrio Límite	33
3.6.2.1	Desventajas de los métodos de límite de equilibrio	35
3.6.3	Elementos Finitos	36
3.6.3.1	Ventajas de los métodos de elementos finitos.	39
3.6.3.2	Desventajas de los métodos de elementos finitos.	40
3.6.4	Análisis de las diferentes metodologías	40
4.	MODELACIÓN NUMÉRICA	43
4.1	Área de estudio	43
4.1.1	Localización y características generales	43
4.1.2	Topografía	44
4.1.3	Datos geotécnicos	45
4.2	Modelación en el programa SLOPE	45
4.2.1	Generalidades	45
4.2.2	Modelación	46
4.3	Modelación en el programa PLAXIS	54
4.3.1	Generalidades	54
4.3.2	Modelación	54

5.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	61
5.1	Slopew_2007	61
5.1.1	Resultados	61
5.1.1.1	Tablas	61
5.1.1.2	Gráficas	61
5.2	Plaxis	64
5.2.1	Resultados	64
5.2.1.1	Tablas	64
5.2.1.2	Gráficas	64
5.3	Análisis de resultados	66
5.3.1	Resumen	66
5.3.2	Metodología de análisis	67
5.3.2.1	Talud 1	67
5.3.2.2	Talud 2	69
5.3.2.2	Talud 3	70
5.3.2.2	Talud 4	71
5.3.3	Alternativas correctivas	73
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
6.1	Conclusiones	75
6.2	Recomendaciones	76
	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	77
	ANEXOS	

Índice – Figuras

Fig. 2.1:	Vista de un talud	14
Fig. 2.2:	Condiciones de talud inestable	16
Fig. 2.3:	Condiciones de talud estable	17
Fig. 2.4:	Ubicación de perforaciones	20
Fig. 3.1:	Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante	31
Fig. 3.2:	Formas de superficie de falla	32
Fig. 3.3:	Metodologías de cálculo para la modelación de taludes	33
Fig. 3.4:	Generación de la falla utilizando la metodología de elementos finitos.	38
Fig. 4.1:	Implantación de la zona de estudio	44
Fig. 4.2:	Especificación de las opciones de análisis	46
Fig. 4.3:	Especificación avanzadas de las opciones de análisis	47
Fig. 4.4:	Fijación del área de trazado	47
Fig. 4.5:	Fijación de la escala del problema	48
Fig. 4.6:	Perfilación del problema	48
Fig. 4.7:	Opciones de Análisis	49
Fig. 4.8:	Propiedades de los suelos	49
Fig. 4.9:	Regiones del suelo	50
Fig. 4.10:	Dibujar la línea piezométrica	50
Fig. 4.11:	Línea de radios	51
Fig. 4.12:	Verificación general	51
Fig. 4.13:	Verificación de datos de entrada	52
Fig. 4.14:	Evaluación del factor de seguridad	52
Fig. 4.15:	Obtención de resultados	53
Fig. 4.16:	Reporte de resultados	53
Fig. 4.17:	Características iniciales	54

Fig. 4.18:	Perfilar el problema	55
Fig. 4.19:	Rigidizar la estructura	55
Fig. 4.20:	Propiedades de los suelos	56
Fig. 4.21:	Generación del mesh	57
Fig. 4.22:	Condiciones iniciales	57
Fig. 4.23:	Características del cálculo	58
Fig. 4.24:	Cálculo	58
Fig. 4.25:	Factor de seguridad	59
Fig. 4.26:	Magnitud de la falla	59
Figura 5.1:	Gráfica del talud 1 (Abscisa 0+030)	62
Figura 5.2:	Gráfica del talud 2 (Abscisa 0+090)	62
Figura 5.3:	Gráfica del talud 3 (Abscisa 0+150)	63
Figura 5.4:	Gráfica del talud 4 (Abscisa 0+210)	63
Figura 5.5:	Gráfica del talud 1 (Abscisa 0+030) PLAXIS	64
Figura 5.6:	Gráfica del talud 2 (Abscisa 0+090) PLAXIS	65
Figura 5.7:	Gráfica del talud 3 (Abscisa 0+150) PLAXIS	65
Figura 5.8:	Gráfica del talud 4 (Abscisa 0+210) PLAXIS	66
Figura 5.9:	Gráfica de análisis, talud 1 (Abscisa 0+030)	68
Figura 5.10:	Gráfica de análisis, talud 2 (Abscisa 0+190)	69
Figura 5.11:	Gráfica de análisis, talud 3 (Abscisa 0+150)	70
Figura 5.12:	Gráfica de análisis, talud 4 (Abscisa 0+150)	72

Índice – Tablas

Tabla 2.1:	Tipos de fallas	21
Tabla 2.2:	Alternativas de solución	23
Tabla 3.1:	Métodos de análisis de estabilidad de taludes	34
Tabla 3.2:	Métodos numéricos para la estabilidad de taludes	37
Tabla 5.1:	Resultados del programa SLOPEW_2007	61
Tabla 5.2:	Resultados del programa PLAXIS	64
Tabla 5.3:	Tabla de resumen de programación	66
Tabla 5.4:	Tabla de resumen de programación, talud 1	67
Tabla 5.5:	Tabla de resumen de programación, talud 2	69
Tabla 5.6:	Tabla de resumen de programación, talud 3	70
Tabla 5.7:	Tabla de resumen de programación, talud 4	71
Tabla 5.13:	Alternativas de estabilización	73

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los taludes son proyectos que requieren cuidado debido a la magnitud de los daños que se pueden originar por la movilización súbita de grandes volúmenes de suelo. La evaluación de la estabilidad de éstos depende de la resistencia y la redistribución de los esfuerzos en la masa de suelo debido a la pérdida o reducción de confinamiento lateral y a las nuevas condiciones hidráulicas. El problema requiere de un análisis de esfuerzo-deformación-tiempo que considere el comportamiento visco-elasto-plástico y la conductividad hidráulica del suelo.

El moderno desarrollo de las actuales vías de comunicación, tales como los canales, caminos o ferrocarriles, así como el impulso de la construcción de presas de tierra y obras de protección contra la acción de los ríos por medio de desbordes, entre otras; resaltan la importancia del adecuado diseño y construcción de taludes dentro de un plano ingenieril de primer orden.

Tanto por el aspecto de inversión como por el de consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista, los cuales son tan antiguos como la misma humanidad; sin embargo, durante casi toda la época histórica han constituido un problema al margen de toda investigación científica.

Hasta relativamente pocos años los taludes se manejaron con normas puramente empíricas, sin ningún criterio generalizador de las experiencias adquiridas, la expansión del ferrocarril, el canal primero y de la carretera después, motivaron los primeros intentos para el estudio racional de taludes; pero no fue sino hasta el advenimiento de la actual mecánica de suelos cuando fue posible aplicar al diseño de taludes normas y criterios, que sistemáticamente consideran las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constitutivos, la cual permitr adquirir experiencia sobre bases firmes y desarrollar ideas teóricas para conocer cada vez más detalladamente el funcionamiento particular de estas estructuras.

En el campo del estudio de los taludes existen pioneros de muy notable trayectoria como Collin (1845) quién habló por vez primera de superficies de deslizamiento curvas en las fallas de los taludes e imaginó mecanismos de falla que no difieren mucho de los que actualmente se consideran en muchos métodos prácticos de diseño, estos son los denominados métodos de equilibrio límite, pero surgió la modelación numérica denominada o conocida como “Reducción de la resistencia al corte”, la cual tiene una serie de ventajas sobre los habituales métodos de cálculo de equilibrio límite, una de las más importantes es que la superficie crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de la resistencia del corte del suelo, es decir que su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.) se produce espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo.

En la cuenca de Loja, se ha producido un gran número de deslizamientos en taludes debido a fuertes precipitaciones ocurridas en los últimos años, además a la falta de estudios, características geológicas, mecánicas y planificación en la construcción de estas obras, por esta razón se elaborará un análisis de estabilidad de taludes, a través de la modelación numérica.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Simulación de deslizamiento de taludes, a partir de modelación numérica utilizando programas computacionales de estabilidad de taludes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Selección de deslizamientos en un sector de la cuenca de Loja
- Recolección de datos de campo y laboratorio de lugares que presenten deslizamiento.
- Obtención de datos geológicos y geotécnicos de los suelos de lugares que presenten deslizamiento.
- Realizar la simulación y modelación numérica de taludes que presenten deslizamientos, utilizando software de estabilidad de taludes (PLAXIS y

SLOPE), sometiéndolos a variaciones de alturas de nivel freático y permeabilidad

- Realizar un análisis de la obtención de resultados.

1.3 Problemática

La estabilidad de taludes es un problema que afecta especialmente a las vías terrestres de comunicación, ya que en estas estructuras es necesario realizar cortes de tierras que afectan en gran magnitud al estado inicial de sus propiedades como empuje de tierra, soportes o apoyos de resistencia de estos taludes.

La cuenca de Loja se ha visto afectada muy seriamente por la inestabilidad de los taludes, haciendo colapsar obras de grande magnitud como vías de comunicación, sistemas de captación, viviendas, etc. A todo esto se suma las pérdidas económicas y humanas que se producen por deslizamientos imprevistos provocados por modificaciones de suelos, por suelos débiles que tienen poca resistencia, por falta de información y presupuesto para tomar medidas que ayuden a la estabilización de taludes. Existen zonas en las cuales los deslizamientos están presentes en cualquier momento, ya sea este por las propiedades de los suelos o por agentes externos como drenajes deficientes, cargas excesivas, o por el simple hecho de la meteorización que está presente en los cambios del talud. Por estas condiciones nos vemos en la necesidad de aportar con conclusiones y ensayos que fortalezcan de alguna manera la forma de pensar de autoridades que no ponen la importancia que se merecen estas estructuras y así podemos reducir los estragos que producen los deslizamientos.

1.4 Justificación del Proyecto

Este proyecto tiene la finalidad de buscar alternativas para mejorar las estructuras geotécnicas en especial la estabilidad de los taludes de la cuenca de Loja, que nos permitan reducir el riesgo de destrucción que se produce a causa de la falta de información o la no actuación de nuestras autoridades.

La ciudad de Loja, en los últimos años debido al aumento de estructuras vulnerables, ha sido afectada por desastres naturales, especialmente por la inestabilidad de taludes, en especial en zonas críticas como son los casos de la calle Berlín, colegio Adolfo Valarezo, colegio 27 de Febrero, Urbanización Reinaldo Espinosa, la inundación del Terminal

Terrestre, gasolinera “Transportes Loja”, etc., estas zonas son las más vulnerables a desastres, especialmente en temporada de lluvias.

Todas estas catástrofes que tienen un alto contenido económico y material, pueden disminuir de manera considerable al analizar estos taludes, conocer su factor de seguridad, realizar estudios que nos ayuden a visualizar una técnica para su estabilización que tenga poca repercusión económica pero que sea lo más seguro posible.

Este proyecto tiene la visión de realizar un análisis por medio de la modelación numérica ya que esta se considera hoy en día la más vanguardista por su mayor eficiencia a la hora de mostrar resultados, ya que estos son de manera más real por no tener una geometría ya definida.

Mediante el presente trabajo se busca obtener el factor de seguridad mediante la modelación numérica, para lo cual trabajaremos con el factor más crítico, posteriormente dar una solución económicamente conveniente que garantice la sostenibilidad de los taludes analizados. A partir del análisis por medio de dos metodologías muy conocidas y prácticas como son; el método de equilibrio límite y el de elementos finitos, las cuales garantizan la veracidad de los resultados.

CAPÍTULO II

2. ESTABILIDAD DE TALUDES

2.1 Introducción

El principal problema que se plantea a la hora de proyectar cualquier tipo de explanación es asegurar la estabilidad de sus taludes, ya que las características resistentes de ese suelo de nada servirán si se producen continuos deslizamientos que pongan en peligro la funcionalidad de la carretera a la que sirven de soporte.

Parece claro que la estabilidad de un talud depende tanto de su geometría, pendiente y altura como de las características intrínsecas del propio suelo que lo forma, concretamente con sus propiedades como ángulo de rozamiento interno y cohesión, ya que estos definen su resistencia a cizalla.

En este sentido, un suelo sin cohesión, por ejemplo, una arena limpia y seca, será estable siempre y cuando su ángulo de rozamiento interno sea superior al ángulo que forma el talud con la horizontal. En suelos cohesivos este valor aumenta, dado que a la fuerza de rozamiento interno que se opone al movimiento se suma la producida por la cohesión entre las partículas del suelo. (Galera & Velasco, 2004)

2.2 Definición de talud

Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable. Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre, es decir incluye la intervención de maquinaria para movimiento de tierra se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes. (F. de Matteis, 2003)

En ciertos trabajos de la Ingeniería Civil es necesario utilizar el suelo en forma de talud como parte de la obra. Tal es el caso de terraplenes en caminos viales, en presas de tierra (como la presa Retardadora del Ludueña, Rosario), canales, etc.; donde se requiere estudiar la estabilidad del talud. En ciertos casos la estabilidad juega un papel muy importante de la obra, condicionando la existencia de la misma como puede verse en presas de tierra, donde un mal cálculo puede hacer fracasar la obra. (Barrera V. & Campaña Z., 2003)

El resultado del deslizamiento de un talud puede ser a menudo catastrófico, con la pérdida de considerables bienes y muchas vidas. Por otro lado el costo de rebajar un talud para alcanzar mayor estabilidad suele ser muy grande. Es por esto que la estabilidad se debe asegurar, pero un conservadorismo extremo sería antieconómico, en la figura 2.1 se muestra la vista de un tipo de estabilización de un talud.



Fig. 2.1: Vista de un talud

Fuente: Universidad Nacional de Rosario, facultad de ingeniería y agrimensura

2.2.1 Definición de estabilidad

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de tierra contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio. (Rodríguez, 2000)

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material térreo por mover y por lo tanto diferentes costos. Podría imaginarse un caso en que por alguna razón el talud más conveniente fueses muy tendido y en tal caso no habría motivos para pensar en problemas de estabilidad de taludes, pero lo normal es que cualquier talud funcione satisfactoriamente desde todos los puntos de vista excepto el económico, de manera que las consideraciones de costo presiden la selección del idóneo, que resultará ser aquel al que corresponda la mínima masa de tierra movida, o lo que es lo mismo el talud más empinado. (Rodríguez, 2000)

Probablemente muchas de las diferencias asociadas en la actualidad a los problemas de estabilidad de taludes radican en que se involucren en tal denominación a demasiados temas diferentes, a veces radicalmente distintos, de manera que el estudio directo del problema sin diferenciar en forma clara tales variantes tiende a conducir a cierta confusión. Es indudable que en lo anterior está contenida la afirmación de que los taludes son estructuras muy complejas, que prestan muchos puntos de vista dignos de estudio sea siempre complicado, pero parece cierto también, que una parte de las dificultades presentes se debe a una falta de correcto deslinde de las diferentes variantes con que el problema de estabilidad se puede presentar y se debe afrontar.

Los problemas relacionados con la estabilidad de laderas naturales difieren radicalmente de los que se presentan en taludes construidos por el ingeniero. Dentro de éstos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes de laderas y los terraplenes. Las diferencias importantes radican, en primer lugar, en la naturaleza de los materiales involucrados y, en segundo, en todo un conjunto de circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de su historia geológica, de las condiciones climáticas que primaron a lo largo de tal historia y de la influencia del hombre que ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado. Esta historia y génesis de formulación de laderas y taludes, la historia de esfuerzos a que estuvieron sometidos y la influencia de condiciones climáticas o, en general ambientales, definen

aspectos tan importantes como configuración de los suelos que forman la ladera o el talud, el cuál influye decisivamente en sus condiciones de estabilidad.

Para determinar la estabilidad de una masa de suelo debemos determinar su coeficiente de seguridad al deslizamiento. Al existir un coeficiente de seguridad igual a 1, el talud se encuentra seguro, libre de deslizamientos. Debemos comparar la colaboración de esfuerzos que tienden a producir el deslizamiento (esfuerzos motores) con aquellos que tienden a evitarlo (esfuerzos resistentes) se debe definir la superficie de falla. (Barrera V. & Campaña Z., 2003)

2.2.2 Condición de inestabilidad

En el caso de que exista la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento o se trate de la estabilización de un movimiento activo, la teoría de presión de tierras de Rankine o de Coulomb no representa la realidad de las fuerzas que actúan sobre el muro y generalmente el valor de las fuerzas actuantes es muy superior a las fuerzas activas calculadas por teorías tradicionales. El hecho de que exista un deslizamiento o un factor de seguridad bajo, equivale a que se han generado en el talud deformaciones que producen un aumento muy grande de fuerzas sobre la estructura a diseñar. (Da Costa García, 2004)

En la figura 2.2 y 2.3 se dan a conocer los factores que afectan la estabilidad de un talud.

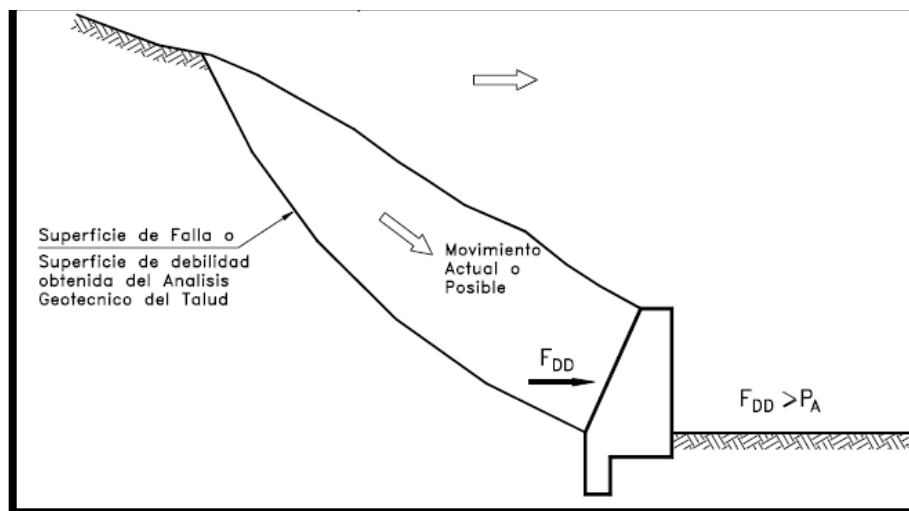


Fig. 2.2: Condiciones de talud inestable

Fuente: Estabilidad de taludes en obras de ingeniería civil, Ramos Taype Vidal

Es común que los muros o estructuras de contención fallen en el caso de deslizamientos a pesar de que fueron diseñados de acuerdo a un procedimiento universalmente aceptado. El costo de construir una estructura de contención es generalmente, mayor que el de conformar un talud, por lo tanto debe estudiarse con mucho cuidado su efectividad como método de estabilización y durante el diseño debe hacerse todo el esfuerzo por mantener su altura lo más baja posible.

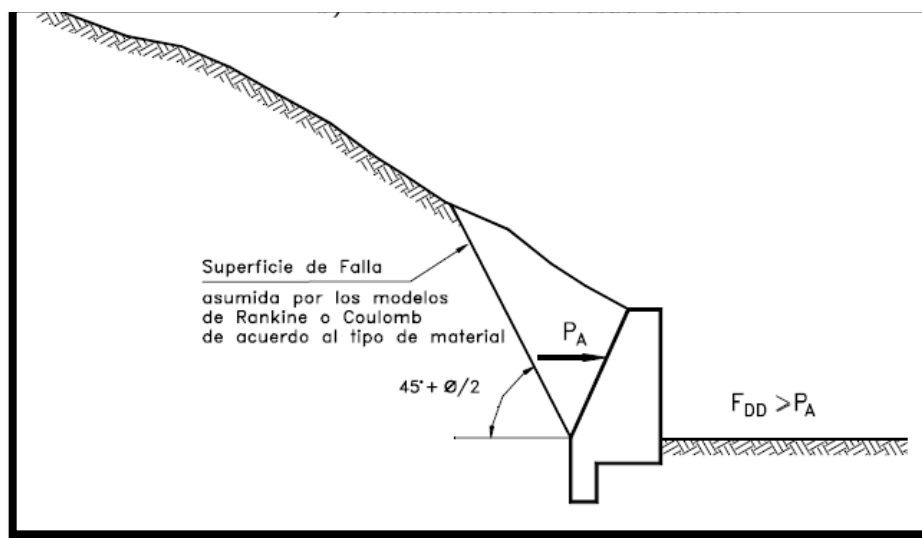


Fig. 2.3: Condiciones de talud estable

Fuente: Estabilidad de taludes en obras de ingeniería civil, Ramos Taype Vidal

2.3 Causas que provocan fallas en taludes

La seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento es lo que se llama estabilidad. Cuando ocurren los deslizamientos o hundimientos, es necesario hacer estudios de estabilidad para determinar la causa de la falla; la estabilidad se pierde debido a agentes naturales tales como las presiones hidrostáticas, el intemperismo, la deforestación y la erosión. El aumento temporal de cargas, la reducción de la resistencia del suelo o una redistribución desfavorable de esfuerzos contribuyen a que el talud busque una posición más estable. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2008)

También resulta muy difícil establecer las causas de los deslizamientos pero se mencionan algunos de los procesos constructivos que comúnmente causan más problemas:

- Modificación de las condiciones naturales del flujo interno del agua al colocar rellenos o hacer excavaciones.

- Sobrecarga de estratos débiles por relleno, a veces de desperdicios.
- Sobrecarga de terrenos con planos de estratificación desfavorable por relleno.
- Remoción por corte, de algún estrato delgado de material permeable que funciona como un manto natural drenante de estratos de arcillas suaves.
- Aumento de presiones de filtración u orientación desfavorable de fuerzas de filtración al producir cambios en la dirección del flujo interno del agua por haber practicado corte o construido relleno.
- Explosión al aire y al agua, por corte de arcillas duras fisuradas.
- Remoción de capas superficiales de suelo por corte lo que puede causar el deslizamiento de capas del mismo estrato ladera arriba sobre mantos subyacentes del suelo más duro o roca.
- Incremento de carga hidrostática o niveles piezométricos bajo la superficie de un corte al cubrir la capa del mismo con una capa impermeable. (F. de Matteis, 2003)

Además debemos tomar en cuenta el factor topográfico, que consiste en la presencia de pendientes que no son uniformes.

Siguiendo con el estudio de las causas, debemos considerar los efectos que produce la precipitación pluvial (lluvia) sobre un mismo suelo, en forma torrencial corta e intensa, que puede tener efectos totalmente distintos, que si cae de forma regular poco intensa y durante un período de tiempo más largo.

Se puede decir que siempre que el suelo lo permita, en el primer caso favorece la escorrentía superficial debido a la impermeabilización rápida del suelo, mientras que en el segundo caso tiene tiempo suficiente para infiltrarse.

La lluvia medianamente intensa pero prolongada favorece a la filtración del agua en el suelo, provocando así la saturación del mismo.

La erosión del suelo es otro factor a tomar en cuenta para el desprendimiento y arrastre de partículas del terreno. Estas acciones son provocadas por el agua, el viento, el hielo y la gravedad.

Hay dos tipos de erosión: naturales, causadas por el propio ciclo de la tierra, es decir la evolución de la misma por diferentes agentes geofísicos que se producen desde tiempos atrás. La otra manera es la causada por la deforestación de lugares con mucha

vegetación, al querer utilizar los recursos naturales de forma no sustentable. (Universidad Nacional de Ingeniería, 2008)

2.4 Modelos de deslizamiento

El deslizamiento de un talud se produce por la rotura y posterior desplazamiento de una cuña de suelo a lo largo de un plano de debilidad, lo que producen este deslizamiento son muy diversas, filtraciones de agua, vibraciones producidas por cargas externas, socavaciones, etc., lo que hace difícil su encuadre analítico. (Plaza Díaz, 2007)

El ingeniero sueco Petterson, tras estudiar con detenimiento este problema, concluyó que el deslizamiento de un suelo se produce a lo largo de una superficie de curvatura variable, que posteriormente asimiló a un arco de circunferencia dada su mayor simplicidad de cálculo. En honor a la nacionalidad de su descubridor, estas superficies de rotura reciben el nombre de círculos suecos.

Este modelo general de rotura presenta diversos matices en función del tipo de suelo y de la geometría de talud, pudiéndose distinguir los siguientes casos:

- Círculo superficial de pie
- Círculo profundo
- Círculo profundo de pie
- Círculo condicionado

2.5 Caracterización del talud mediante ensayos

En aquellos lugares identificados como más propensos a la inestabilidad, deberá obtenerse información adicional para caracterizar mejor el subsuelo y conocer los parámetros que sirvan de base para el análisis y solución del problema, para lo cual es necesario realizar una base que garantice la confiabilidad de los mismos.

La obtención de información consta de tres fases:

- En la primera fase se debe recopilar la información disponible acerca del sitio de estudio, desde relatos de eventos pasados por parte de los lugareños, hasta estudios geológicos y geotécnicos previos, incluidos los planos topográficos, pluviosidad y sismicidad de la zona.
- La segunda fase es el trabajo de campo en el cual se ejecutan ensayos en el sitio y se obtienen muestras de suelo.

- La tercera fase consiste en el trabajo de laboratorio para determinar las propiedades y características del material mediante ensayos de caracterización y resistencia. (F. de Matteis, 2003)

2.5.1 Ensayos de campo

Uno de los principales métodos para obtener información acerca de las características geotécnicas del suelo son las perforaciones, para su posterior análisis en el laboratorio.

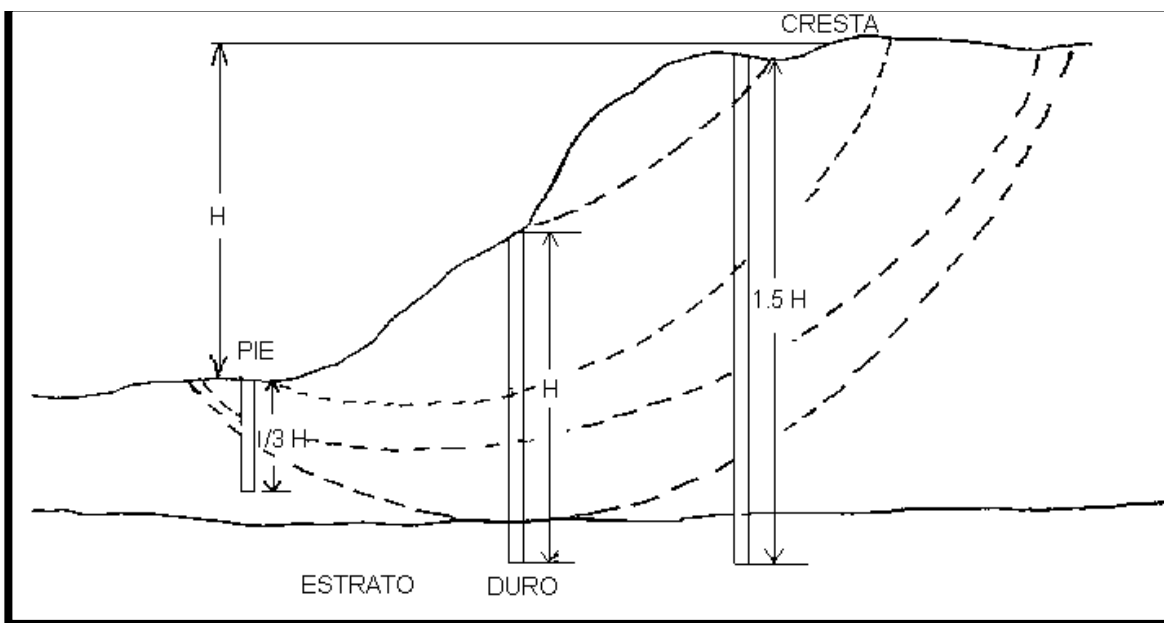


Fig. 2.4: Ubicación de perforaciones

Fuente: Guía para identificar problemas de deslizamientos. Cap. 3

El número y ubicación de las perforaciones a realizar en un estudio dependen del tamaño y forma del área considerada. Los criterios para determinar estas dos características básicas varían considerablemente, sobre todo en áreas planas. En el caso de taludes es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones; este número se puede incrementar dependiendo del tamaño del talud. Se puede hacer una perforación en la cresta con una profundidad aproximada de 1,5 veces la altura del talud, otra hacia la mitad del talud con una profundidad comparable con la altura de ese talud y una última al pie del mismo con una profundidad aproximada de $1/3$ de la altura mencionada, como se presenta en la figura 2.4.

Mediante las calicatas, método de exploración más superficial que el anterior, es posible tomar muestras más voluminosas de material para tener una vista "interna" del

suelo y detectar posibles planos de falla (sobre todo en materiales arcillosos). Estas calicatas generalmente se excavan a mano y miden 1,5 x 1,5 x 2,0 metros de profundidad, aunque también puede utilizarse procedimientos mecánicos. (F.B. de Mello, 1988)

2.6 Tipos de fallas en taludes

Hoy en día se presenta una clasificación de tipos de falla de taludes basada en el reconocimiento de factores geológicos que condicionan la falla. Los deslizamientos de taludes ocurren de muchas maneras y aún persiste cierto grado de incertidumbre en su predictibilidad, rapidez de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, existen ciertos patrones que ayudan a identificar o reducir a un mínimo el riesgo de falla. (F. de Matteis, 2003)

A continuación se presenta un cuadro con las diferentes fallas:

Tabla 2.1: Tipos de fallas

Tipo de Falla	Forma	Definición
Desprendimientos	Caída Libre	Desprendimiento repentino de uno o más bloques de suelo o roca que descienden en caída libre.
	Volcadura	Caída de un bloque de roca con respecto a un pivote ubicado debajo de su centro de gravedad.

Sigue.....

.....Viene

Tabla 2.1: Tipos de fallas

Tipo de Falla	Forma	Definición
Derrumbes	Planar	Movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana.
	Rotacional	Movimiento relativamente lento de una masa de suelo roca o una combinación de los 2 a lo largo de una superficie curva de falla bien definida.

	Desparramiento lateral	Movimiento de diferentes bloques de suelo con desplazamientos distintos.
	Deslizamiento de escombros	Mezcla de suelo y pedazos de roca moviéndose a lo largo de una superficie de roca planar.
Avalanchas	De roca o escombros	Movimiento rápido de una masa incoherente de escombros de roca o suelo-roca donde no se distinguen la estructura original del material.
Flujo	De escombros	Suelo o suelo-roca moviéndose como un fluido viscoso, desplazándose usualmente hasta distancias mucho mayores de falla. Usualmente originado por exceso de presión de poros.
Repteo		Movimiento lento e imperceptible talud debajo de una masa de suelo o suelo-roca.

Fuente: Universidad Nacional de Rosario, facultad de ingeniería civil

2.7 Métodos de estabilización de taludes

Todos los métodos correctivos siguen una o más de las siguientes líneas de acción:

- Evitar las zonas de falla.
- Reducir las fuerzas motoras.
- Aumentar las fuerzas resistentes.

Evitar la zona de falla suele estar ligado a cambios en el alineamiento de la vía, sea el horizontal o el vertical; a la remoción total de los materiales estables o a la construcción de estructuras que se apoyen en zonas firmes, tales como puentes o viaductos.

La reducción de las fuerzas motoras se puede lograr, en general, por dos métodos: remoción de material en la parte apropiada de la falla y subdrenaje, para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de tierra, que es menor cuando pierde agua.

Por lo común, la línea de acción que ofrece mas variantes es la que persigue aumentar fuerzas tales como: el subdrenaje, que aumenta la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, la eliminación de estratos débiles u otras zonas falla potencial, la construcción de

estructuras de retención u otras restricciones y el uso de tratamientos, generalmente químicos, para elevar la resistencia de los suelos al deslizamiento.

En la tabla 2.2 se muestra algunas alternativas para la solución de inestabilidad de taludes:

Tabla 2.2: Alternativas de solución

ALTERNATIVAS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES		
Alternativa	Sugerencia	Características
Métodos de elusión	En todo caso sin excepción, siempre y cuando se pueda utilizar	Indiscutiblemente constituyen los medios más seguros para eliminar los problemas derivados de deslizamientos y fallas, pero no siempre se puede utilizar.
Métodos de excavación	El método se puede utilizar prácticamente en todo tipo de deslizamiento, pero es eficiente sobre todo en los de tipo rotacional.	Este va desde excavaciones menores hechas solo en la cabeza de la falla, hasta la remoción total del material inestable. La remoción de material suele dar lugar a soluciones bastantes permanentes.
Abatimiento de taludes	En suelos en que sea más importante la componente friccionante de la resistencia, abatir los taludes tendrá a ser más eficiente	Este es uno de los métodos más socorridos para el mejoramiento de las condiciones de la estabilidad de los taludes. Es un método correctivo ligado a deslizamientos en el cuerpo del talud.
Bermas y escalonamientos	En suelos cohesivos seguramente el efecto más interesante de la berma es descomponer el talud en dos	Se denomina bermas a masas generalmente del mismo material del propio talud o de uno similar que se adosan al mismo, para darle estabilidad. Además, el peso del material que se coloque podrá aumentar la resistencia al esfuerzo cortante del terreno de cimentación en su parte friccionante.

Sigue.....

.....Viene

Tabla 2.2: Alternativas de solución

Alternativa	Sugerencia	Características
Empleo de materiales ligeros	Solo será eficiente sobre suelos puramente cohesivos, tales como arcillas blandas o turbas.	Esta solución es aplicable únicamente en terraplenes por razones obvias, pues en terrenos de cimentación friccionantes la ventaja del poco peso se neutraliza mucho por la poca presión normal que se produce, lo que a su vez da lugar a que el terreno responda con baja resistencia.
Empleo de materiales estabilizantes	Se ha dicho que estos métodos solo se pueden aplicar a suelos arenosos.	Un aspecto de esta solución es el añadir al suelo alguna sustancia que mejore sus características de resistencia. Este tipo de soluciones es más factible en terraplenes.
Empleo de estructuras de retención	Depende de la estructura de retención a utilizarse.	En primer lugar debe comprenderse que la estructura de retención ha de contener a la superficie de falla formada o por formarse; si esta contiene al muro, el efecto de este será nulo en la estabilidad general.
Empleo de pilotes	Este método es apropiado en deslizamientos superficiales; los profundos generan fuerzas muy grandes, que con dificultad resisten los pilotes.	Es una solución más bien restrictiva, en el sentido que se instala una hilera de pilotes o dos para frenar un movimiento y se van instalando hileras sucesivas, a medida que el material se adapta a la restricción y los movimientos vuelven a comenzar
Empleo de contrapesos al pie de la falla		Esta busca dos efectos; en primer lugar, balancear el efecto de las fuerzas motoras en la cabeza de la falla y en segundo lugar incrementar la resistencia al esfuerzo cortante del material subyacente
Empleo de vegetación	Es aplicable en todos los tipos de taludes, especificando la clase de vegetación.	Se trata de un método preventivo y correctivo de fallas por erosión. Disminuye el contenido de agua en la parte superficial, y da consistencia a es aparte por el entramado mecánico de sus raíces.

Fuente: El Autor

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

3.1 Antecedentes

Los primeros pasos en el cálculo analítico de la estabilidad de taludes los dio Coulomb, en el siglo XVIII, al desarrollar un método de cuñas enfocado al estudio de la estabilidad de muros, pero también utilizable en taludes desnudos.

Ya en el siglo XIX, la construcción de líneas férreas obligó a grandes movimientos de tierras, lo que trajo como consecuencia la aparición de importantes deslizamientos y, por tanto, la necesidad de un método de cálculo para prevenirlos.

Sin embargo no es hasta la primera mitad del siglo XX cuando puede hablarse de métodos analíticos que sirvieron de base a los actuales.

En 1910, Fellenius desarrolla un método de cuñas, y en 1916 se utiliza por primera vez el de rebanadas, pero solo para suelos no cohesivos, y no es hasta las dos décadas siguientes que se consigue unificar la metodología para suelos con cohesión y con rozamiento interno, a la vez que se introduce en el cálculo el principio de las presiones efectivas, definido por Terzaghi en 1926.

Los métodos que pueden considerarse modernos se inician en 1954 con el de Bishop, para roturas circulares, y en 1956 el de Janbu, para superficies no circulares. La complejidad del cálculo ya era inquietante, y las sofisticaciones posteriores llegaron a hacer casi utópica la aplicación práctica, hasta que la aparición del ordenador convirtió en rutina metodologías consideradas casi imposibles, como la basada en elementos finitos. Actualmente existen numerosos programas informáticos que cubren suficientemente las necesidades de un profesional, para comprobar la fiabilidad de un programa es necesario la utilización de un problema real, calcular los deslizamientos ya ocurridos y comprobar si los resultados se ajustan a lo comprobado sobre el terreno.

Antes de la expansión del ordenador se desarrollaron varios métodos simplificados, algunos de ellos basados en ábacos y en soluciones gráficas, que si en su momento

llenaron un importante vacío, hoy ya no está justificado su empleo salvo como herramienta de estimación rápida y preliminar.

Los programas de uso habitual en la actualidad suelen implementar los métodos de Bishop y Janbu, así como algunos de los conocidos como rigurosos o “exactos”, principalmente los de Spencer, Morgenstern y Price, y el de Sarma, que probablemente son los más experimentados. Una sucinta descripción de ellos se presenta a continuación, aunque sin entrar en las formulaciones específicas de cada uno, ya que eso se encuentra en cualquier tratado de Mecánica de Suelos.

Para completar este bosquejo histórico, no pueden dejarse en el tintero los importantes esfuerzos que se están dedicando, en el campo teórico, al desarrollo de métodos que pueden llegar a ser realmente exactos, si se salvan las dificultades que hoy plantea el cálculo analítico de soluciones a modelos de rotura complejos. Son los basados en los teoremas de estados límites de la Teoría del Sólido Plástico que, en el tema aquí tratado, permiten definir un valor máximo para el FS en el equilibrio entre los trabajos de las fuerzas externas y los disipados internamente por la deformación, así como otro valor mínimo a partir del equilibrio entre los campos de tensiones internas y externos. La potencia de los métodos de Elementos Finitos (FEM) y de Diferencias Finitas (FDM) permite disponer de algoritmos para soluciones numéricas de problemas en esta línea, pero la parte negativa aparece cuando es necesario definir el material mediante Leyes Constitutivas mal conocidas, y que normalmente requieren la cuantificación de parámetros del suelo de difícil adquisición. (Pita Olalla & Vásquez, 2007)

3.2 Parámetros necesarios

Las tendencias actuales en la estabilización de taludes, de forma general en la geotecnia han mostrado la necesidad de disponer de zonificaciones o sectorizaciones de áreas de terreno o poblaciones en las cuales se identifica la estratigrafía(o litología) predominante en los diferentes sectores de un terreno con el objetivo de disponer de un “geo-argumento” para la planificación de un proyecto o de un desarrollo urbano. Estas zonificaciones se basan en:

- Geología

- Información de sondeos geotécnicos
- Información de resultados de ensayos de laboratorio

3.2.1 Archivo geotécnico

El archivo geotécnico es de gran dinámica, ya que continuamente se está consultando la información de suelos de una zona ya investigada, y prácticamente todos los proyectos estudiados ofrecen el mismo interés para la consulta, no importa su antigüedad.

Principalmente se trata de investigar la información de suelos, o sea la estratigrafía, pero sería muy deseable contar con la información de soluciones de cimentación y su comportamiento con el objeto de poder afinar métodos de diseño y reducir costos. Lamentablemente todavía dista mucho el momento en que se vuelva rutinaria, durante la construcción, la medición y seguimiento del comportamiento de un talud. Dentro del archivo geotécnico el ingeniero debería tener disponible los siguientes grupos de información, que en orden de grado de detalle son:

- Zonificación
- Estratigrafía de suelos
- Propiedades de los suelos
- Soluciones de cimentación.(Juárez, 1975)

3.3 Herramientas disponibles

Para el análisis de estabilidad de taludes se dispone de varias herramientas tales como:

Tablas o ábacos

Se han elaborado tablas y ábacos para calcular en forma rápida y sencilla, los factores de seguridad para una variedad de condiciones.

Análisis gráficos

Históricamente, se han utilizado procedimientos gráficos o de polígonos de fuerzas para calcular las condiciones de estabilidad de los taludes. Estos sistemas gráficos son poco usados actualmente.

Cálculos manuales

La mayoría de métodos de análisis se desarrollaron para cálculos matemáticos manuales o con calculadora, de acuerdo con fórmulas simplificadas.

Hojas de cálculo

Algunos autores han desarrollado hojas de cálculo, las cuales pueden utilizarse para el análisis de taludes sencillos o con bajo nivel de complejidad.

Uso de “Software”

La técnica de análisis que se escoja depende de las características de los sitios y del modo potencial de falla; dando especial consideración a las fortalezas, las debilidades y las limitaciones de cada metodología de análisis. Hasta el año 1975, la mayoría de los análisis de estabilidad se realizaban en forma gráfica o utilizando calculadoras manuales.

Con la llegada del computador los análisis se pudieron realizar en forma más detallada; inicialmente utilizando tarjetas FORTRAN y recientemente con programas de software, los cuales cada día son más poderosos.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de aplicaciones numéricas disponibles en la actualidad, es esencial que el ingeniero entienda las fortalezas y limitaciones inherentes a cada metodología. Existen una gran cantidad de herramientas informáticas para el análisis de estabilidad de taludes. Dentro de estas herramientas, los métodos de equilibrio límite son los más utilizados; sin embargo, los métodos esfuerzo - deformación utilizando elementos finitos, han adquirido gran importancia y uso en los últimos años. La mayoría de los análisis de estabilidad se realizan utilizando programas comerciales de “software”, los cuales permiten analizar taludes complejos o con cantidad significativa de información, de forma eficiente. Se recomienda en lo posible, utilizar siempre programas de computador. (Pita Olalla & Vásquez, 2007)

3.4 Factor de seguridad

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}} \quad \text{ecuación 3.1}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F.S. = \frac{\text{Momento resistente}}{\text{Momento actuante}} \quad \text{ecuación 3.2}$$

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad. (Galera & Velasco, 2004)

Otro criterio es el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencia al corte}}{\sum \text{Esfuerzos al cortante}} \quad \text{ecuación 3.3}$$

3.5 Superficie de falla

El término superficie de falla se utiliza para referirse a una superficie asumida a lo largo de la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud; sin embargo, este deslizamiento o rotura no ocurre a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente. En los métodos de límite de equilibrio el factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla; por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie. Si la falla ocurre, los esfuerzos de cortante serían iguales en todos los puntos a todo lo largo de la superficie de falla, como se observa en la figura 3.1.

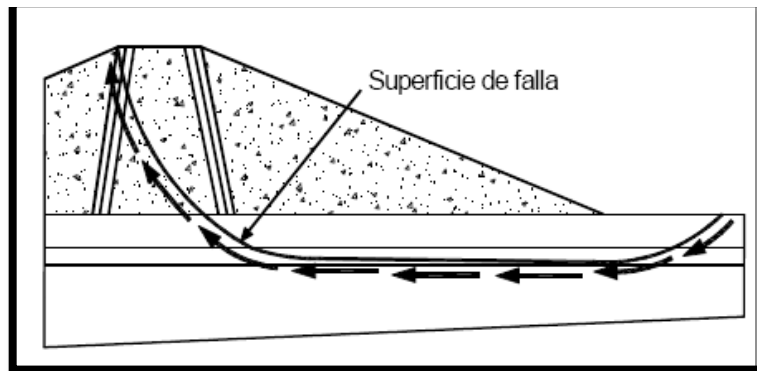


Fig. 3.1: Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante

Fuente: (U. S. Corps of Engineers, 2003).

Generalmente, se asume un gran número de superficies de falla para encontrar la superficie de falla con el valor mínimo de factor de seguridad, la cual se denomina “superficie crítica de falla”. Esta superficie crítica de falla es la superficie más probable para que se produzca el deslizamiento; no obstante, pueden existir otras superficies de falla con factores de seguridad ligeramente mayores, los cuales también se requiere tener en cuenta para el análisis.

Las técnicas de límite de equilibrio se utilizan cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación sobre superficies de falla determinadas. Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de éstas. En los últimos años, se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, como se muestra en la figura 3.2.

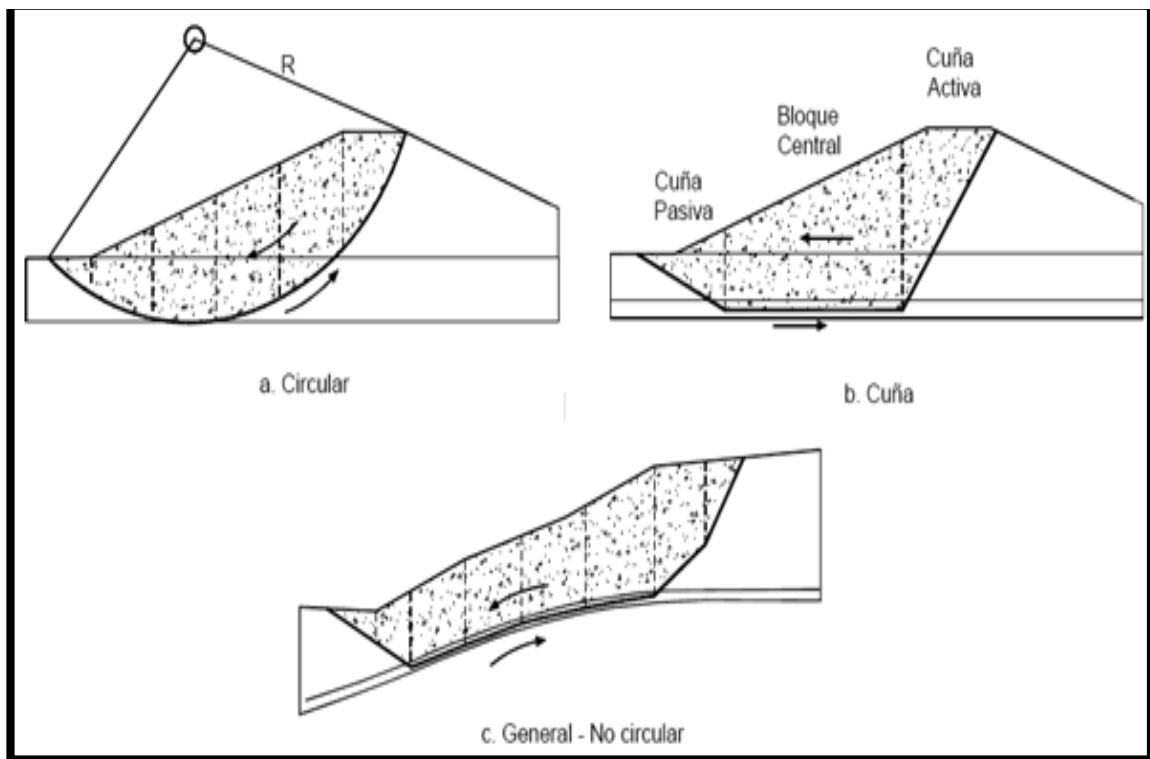


Fig. 3.2: Formas de superficie de falla

Fuente: (U. S. Corps of Engineers, 2003).

3.6 Métodos de análisis de estabilidad

3.6.1 Generalidades

El análisis de estabilidad es un procedimiento de pruebas sucesivas. Se escoge una superficie potencial de deslizamiento y se determina el factor de seguridad contra deslizamiento a lo largo de esa superficie. Se selecciona diferentes superficies y se repite el análisis hasta que se encuentre la superficie que tiene el factor más bajo de seguridad, conocido como superficie crítica. El factor calculado de seguridad contra el deslizamiento a lo largo de la superficie crítica es el factor de seguridad indicado para el talud. (Galera & Velasco, 2004)

En la figura 3.1 se presenta una serie de metodologías aplicables al análisis de la estabilidad de taludes, representados gráficamente para mayor comprensión. Además da a conocer las relaciones entre las diferentes metodologías:

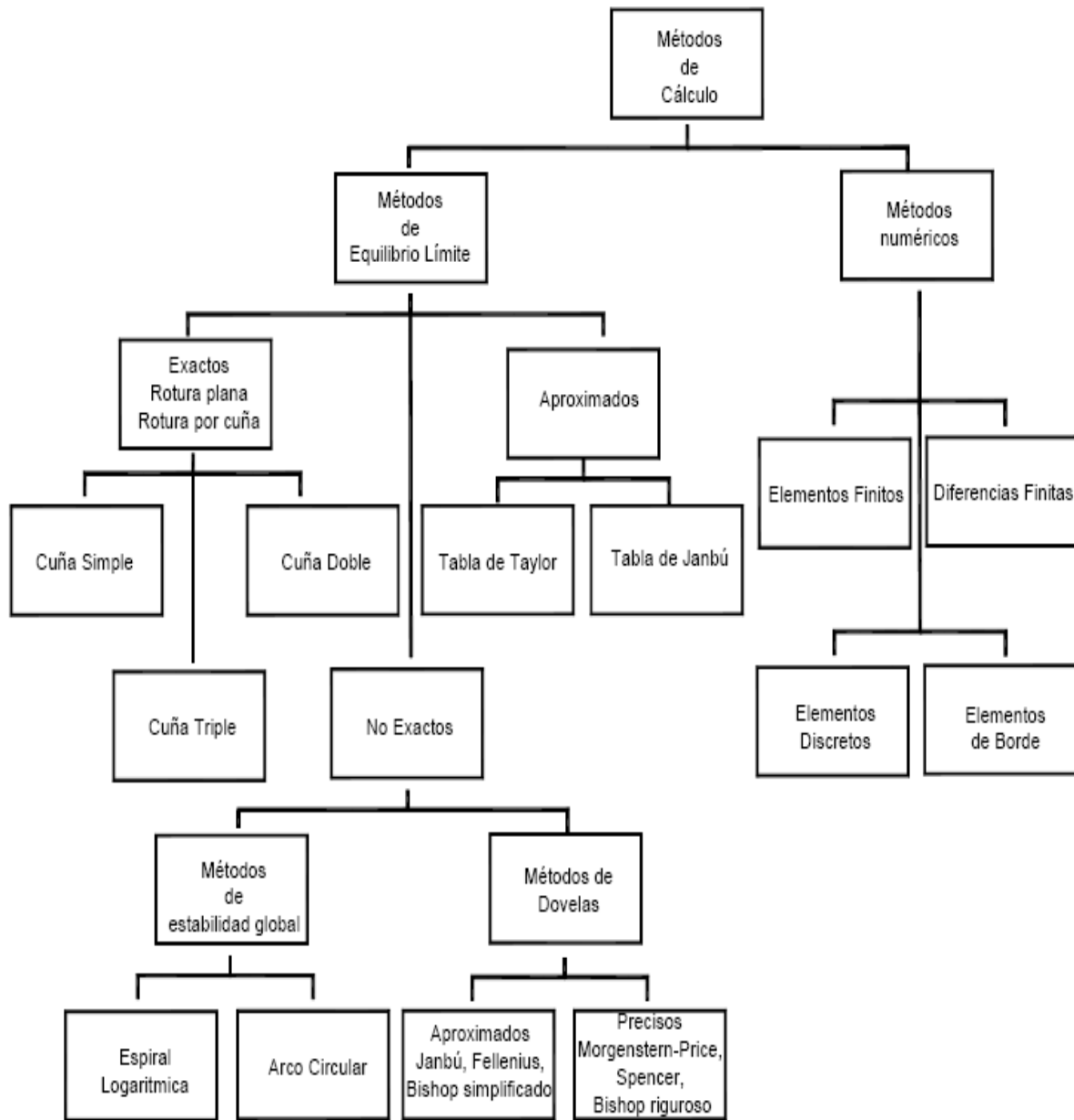


Figura 3.3: Metodologías de cálculo para el análisis de taludes

Fuente: Jaime Suarez, Análisis Geotécnico, Capítulo 4

3.6.2 Equilibrio Límite

Durante muchos años se ha realizado el análisis de los movimientos de los taludes o laderas, haciendo uso de las técnicas de límite de equilibrio. Este sistema supone que

en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes, son iguales a lo largo de la superficie de falla y equivalentes a un factor de seguridad de 1.0. (Vargas Delgado, 2008)

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han ido mejorando los sistemas de dovelas desarrollados por Petterson y Fellenius (1936).

Los métodos de Bishop (1955) y Janbú (1954) han sido muy utilizados en los últimos 50 años y se han desarrollado métodos de análisis más precisos y complejos como los de Morgenstern y Price (1965) y Spencer (1967), ayudados por programas de software que permiten realizar análisis muy rigurosos. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de éstos posee un cierto grado de precisión. En la tabla 3.1, se presentan algunos de los métodos más utilizados:

Tabla 3.1: Métodos de análisis de estabilidad de taludes, pertenecientes a equilibrio límite

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña
Espiral Logarítmica	Espiral Logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla en espiral logarítmica. El radio de la espiral varía con el ángulo de rotación
Arco Circular (Fellenius)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo
Ordinario o de Fellenius	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas

Bishop simplificado	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas son cero
Jambú simplificado	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas
Sueco modificado	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno

Sigue.....

Tabla 3.1: Continúa, métodos de análisis de estabilidad de taludes, pertenecientes a equilibrio límite

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Lowe y Karafiath	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de la dovelas
Spencer	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas
Morgenstern y Price	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	Las fuerzas entre dovelas, se asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma	Cualquier forma	Fuerzas y momentos	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla

Fuente: Análisis de Estabilidad, Jaime Suarez

3.6.2.1 Desventajas de los métodos de límite de equilibrio

Los análisis de límite de equilibrio tienen algunas limitaciones entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Se basan solamente en la estática. Como los métodos de límite de equilibrio se basan solamente en la estática y no tienen en cuenta las deformaciones, las distribuciones de presiones, en muchos casos, no son realistas. Sin embargo, debe

tenerse en cuenta que estos esfuerzos no realistas, generalmente ocurren en algunas tajadas del análisis y no significa que el factor de seguridad general sea inaceptable.

- Suponen los esfuerzos uniformemente distribuidos. Debe tenerse cuidado cuando existan concentraciones de esfuerzos debidos a la forma de la superficie de falla o a la interacción de suelo-estructura.
- Utilizan modelos de falla muy sencillos. El diseño de taludes utilizando solamente la modelación con métodos de límite de equilibrio es completamente inadecuado si los procesos de falla son complejos, especialmente cuando están presentes los procesos de “creep”, la deformación progresiva, el flujo, la rotura por fragilidad, la licuación y otras formas de deterioro de la masa del talud.
- Generalmente se asume el material como isotrópico. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema, asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares. Sin embargo, el mecanismo de falla en los materiales residuales donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como las formaciones aluviales y coluviales no-isotrópicas, requiere de nuevos enfoques y del estudio de las superficies de falla no simétricas. (Rodríguez, 2000)

A pesar de las debilidades de un modelo específico, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones. Los métodos de límite de equilibrio son una herramienta muy útil en la práctica y se recomienda tener cuidado de no abusar en la aplicación del método para casos complejos donde la distribución de esfuerzos y las deformaciones juegan un papel importante en el comportamiento del talud (Krahn, 2004).

3.6.3 Elementos finitos

El factor de seguridad de un talud se lo puede calcular por un modelo matemático, este puede ser bien de elementos finitos como por diferencias finitas, el procedimiento del mismo consiste en la reducción progresiva de la resistencia al corte del suelo hasta producir una rotura del mismo. El factor de seguridad se define por el ratio entre la

resistencia al corte original del suelo y la resistencia al corte para la que se ha producido la rotura. (Suárez, 2003)

La modelación numérica denominada “La reducción de la resistencia al corte”, tiene una serie de ventajas sobre los habituales métodos de cálculo de equilibrio límite en los que se basan la mayoría de los programas existentes, entre las cuales observamos las más comunes que son:

Una de las más importantes es que la superficie crítica de deslizamiento se genera automáticamente durante el proceso de reducción de la resistencia del corte del suelo, es decir que su forma (recta, poligonal, circular, espiral logarítmica, etc.) se produce espontáneamente sin que sea necesario predeterminarla al iniciar el proceso de cálculo. (Suárez, 2003)

La aplicación de este método en el pasado ha estado limitada por el elevado costo computacional especialmente por el tiempo de cálculo, pero en la actualidad esta característica se encuentra superada por el avance en velocidad de cálculo de los ordenadores personales. Actualmente contamos con un sin número de programas que nos ayudan a la modelación numérica como es el caso de PLAXIS, SLOPE, entre los más utilizados en nuestro medio.

El análisis por elementos finitos debe satisfacer las siguientes características:

- Debe mantenerse el equilibrio de esfuerzos en cada punto, el cual es realizado empleando la teoría elástica para describir los esfuerzos y deformaciones. Para predecir el nivel de esfuerzos se requiere conocer la relación esfuerzo - deformación.
- Las condiciones de esfuerzos de frontera se deben satisfacer. (Suárez, 2003)

En la tabla 3.2, se muestra los diferentes métodos numéricos utilizados comúnmente para el análisis de estabilidad de taludes:

Tabla 3.2: Métodos numéricos para la estabilidad de taludes

Método	Características	Utilización
Elementos	Se asume una malla de elementos con	Se aplica a taludes que

Finitos (FEM)	sus respectivos nodos y las propiedades elastoplásticas de los materiales	puedan considerarse como masas continuas sin bloques
Diferencias Finitas (FDM)	Se elabora una malla con una variedad de relación esfuerzo-deformación	Se utiliza para modelar masa rocosa con un alto grado de fracturación
Elementos Distintos o Discretos (DEM)	Se divide el talud en elementos con sus propiedades internas y de las uniones entre los elementos que se puedan mover libremente	Se aplica para analizar inclinación de bloques
Elementos de Bordo (BEM)	Se discretizan las áreas para poder modelar la ocurrencia de agrietamientos en el talud	Se utiliza para estudiar problemas de propagación de grietas

Fuente: (Modificado de Deangeli y Ferrero, 2000).

Existe dificultad en la mayoría de los casos prácticos, reales, para definir la relación esfuerzo - deformación, por lo difícil que es describir los depósitos de suelos naturales en términos de esfuerzo - deformación. Otra limitante es el poco conocimiento de los esfuerzos reales "in situ" que se requieren para ser incorporados en el modelo.

Generalmente, se hace el análisis en dos direcciones por la facilidad de su aplicación y de acuerdo con la capacidad de los computadores sencillos. Sin embargo, las soluciones en tres dimensiones son cada día más populares. El análisis planar, o en dos direcciones, asume cero esfuerzo o cero deformación en las superficies laterales del modelo; por lo tanto, para que se simulen las condiciones de campo, se requiere que existan esas condiciones. El empleo del análisis en dos direcciones se puede ampliar aplicándole al modelo, una carga hidrostática lateral. (Zuloaga Fábrega, 2009)

Es común que entre más pequeños sean los elementos, se obtengan mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud. La altura del elemento, es tal vez el factor más importante y se recomiendan por lo menos diez niveles de elementos entre el pie y la cabeza del talud para simular en forma precisa el comportamiento del éste.

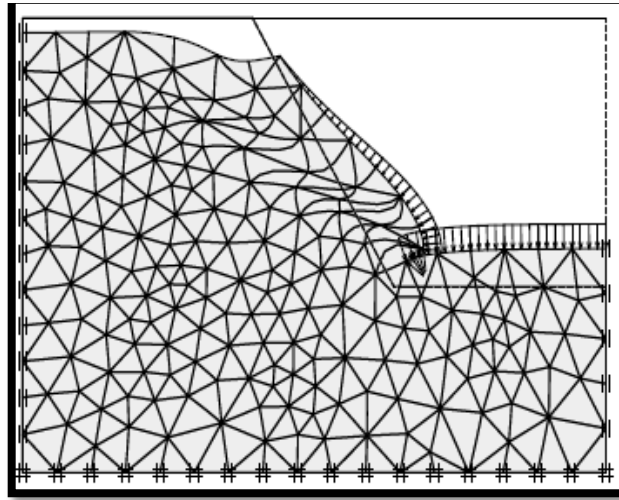


Fig. 3.4: Generación de una falla utilizando la metodología de elementos finitos.

Fuente: (Modificado de Deangeli y Ferrero, 2000).

Los elementos finitos pueden emplearse para estudiar las diversas posibilidades de falla en un talud, o para encontrar los efectos de varios sistemas de estabilización en el estudio de casos generales, donde las propiedades de los suelos o rocas y condiciones de frontera, se pueden suponer. En la estabilidad de taludes, los métodos de elementos finitos en 3-D, permiten analizar condiciones que los métodos de equilibrio límite no permiten. El análisis en 3-D es el mayor aporte de los elementos finitos a la estabilidad de taludes.

El método de elementos finitos es hoy el más utilizado y probablemente, el modelo numérico más versátil para el análisis de estabilidad de taludes. Las principales ventajas y desventajas del método de elementos finitos se resumen en los siguientes puntos (Carter y otros, 2001).

3.6.3.1 Ventajas de los métodos de elementos finitos:

- Se puede considerar el comportamiento no lineal de los materiales en la totalidad del dominio analizado.
- Es posible modelar la secuencia de excavación incluyendo la instalación de refuerzos y sistemas de estructura de soporte.

- La falla es progresiva.
- Los detalles estructurales de juntas o fisuras cercanas pueden modelarse utilizando una técnica de homogenización.
- Se puede introducir un comportamiento de los materiales con base en el tiempo.
- El sistema de ecuaciones es simétrico con excepción de los problemas elastoplásticos y de flujo.
- Se puede emplear una formulación convencional de deformaciones para la mayoría de las posibilidades de carga.
- Se han desarrollado formulaciones especiales para incluir el análisis del agua subterránea. (Suárez, 2003)
- Existe mucha experiencia sobre el uso de estos modelos y los programas de software han sido actualizados teniendo en cuenta esas experiencias.

3.6.3.2 Desventajas de los métodos de elementos finitos.

- Debido a que el sistema de ecuaciones es muy grande, se requieren tiempos prolongados y capacidades altas de memoria dependiendo de la estructura general de los taludes y la implementación de los algoritmos del código de elementos finitos.
- Algunos modelos requieren de algoritmos sofisticados de acuerdo con el tipo de material constitutivo utilizado.
- El método no es apropiado para rocas muy fracturadas o suelos altamente fisurados cuando las discontinuidades se encuentran distribuidas en forma no uniforme y controlan el comportamiento mecánico de los taludes.

Las anteriores desventajas son mucho más pronunciadas en el análisis 3D y menos fuertes en el análisis 2D. Sin embargo, teniendo en cuenta la tendencia a utilizar modelos 3D, el manejo de los modelos de elementos finitos, relativamente es complejo. (Suárez, 2003)

3.6.4 Análisis de las diferentes metodologías

Dentro de las metodologías disponibles, se encuentran los métodos de límite de equilibrio, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. Los métodos numéricos son la técnica que muestra la mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad en la mayoría de los casos de evaluación de estabilidad de taludes.

Sin embargo, los métodos de límite de equilibrio, son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”) y las fallas en cuña.

Igualmente, los métodos de límite de equilibrio permiten el análisis combinado con técnicas probabilísticas (Stead y otros, 2000).

En el caso de los sistemas de falla complejos, es conveniente utilizar metodologías de modelación que tengan en cuenta los factores que producen los movimientos.

Los factores que generan el deslizamiento pueden ser complejos y muy difíciles de modelar; no obstante, con el objeto de analizar esas situaciones complejas, existen algunas herramientas utilizando elementos finitos, diferencias finitas, elementos discretos y modelos dinámicos.

Como es de conocimiento general, los métodos de equilibrio límite son los primeros en ser utilizados y según el avance de los tiempos han sido perfeccionados, con una utilización sencilla son los más aptos para un análisis de estabilidad de taludes. Pero en la actualidad gracias al avance tecnológico los métodos de cálculo que conciernen a los modelos numéricos ganan aceptación rápidamente ya que nos dan un análisis más objetivo y acercándonos a la realidad

En el cuadro 3.1 se muestra los diferentes métodos para el análisis de la estabilización de taludes, aunque en la presente investigación utilizará el método de Modelación Numérica o Elementos Finitos definidos especialmente por el programa PLAXIS, además se utilizará métodos tradicionales de límite de equilibrio, para realizar un análisis más cercano a la realidad.

CAPÍTULO IV

4. MODELACIÓN NUMÉRICA

4.1 Área de estudio

4.1.1 Localización y características generales

La Provincia de Loja está ubicada entre las latitudes Sur: 03°19'49" y 04°45'00", constituye la provincia más austral del Ecuador. Tiene una superficie aproximada de 10.790 km² equivalente al 4% de la superficie del país. El 45% del territorio lojano es de topografía accidentada conformada por rocas, peñones y terrenos muchas veces de difícil acceso. A pesar de presentarse alturas de hasta 4.107 m, no existen nevados. La línea divisoria continental separa la capital del resto de la provincia drenando sus alrededores hacia el Amazonas. (Tamay Granda, 2004)

La línea de conducción del plan maestro de agua potable de la ciudad de Loja se ha caracterizado por pasar por una zona muy grande de deslizamientos, ya que los suelos en su mayoría son residuales. Sus características geotécnicas acompañadas con pendientes elevadas y otros factores son determinantes en la inestabilidad geológica de la zona, en la cual se han generado deslizamientos, afectando la tubería colocada. Por lo que es necesaria la realización de estudios que garanticen la culminación de esta importante obra de nuestra ciudad.

La zona considerada para el estudio contempla parte del plan maestro de agua potable y se localiza al Norte de la ciudad de Loja, cerca a la vía antigua a Cuenca, aproximadamente a 5Km del sector de Sauces Norte. Se analizará una longitud de 240 m, divididas en 4 taludes, con su respectivo perfil estratigráfico representativo, en la figura 4.1 se muestra la localización geográfica del área en estudio.

Cada talud se lo analizará por separado en los programas computacionales previstos, variando los niveles freáticos a diferentes alturas, con lo cuál se analizará la repercusión del nivel freático en los círculos de falla y factor de seguridad.

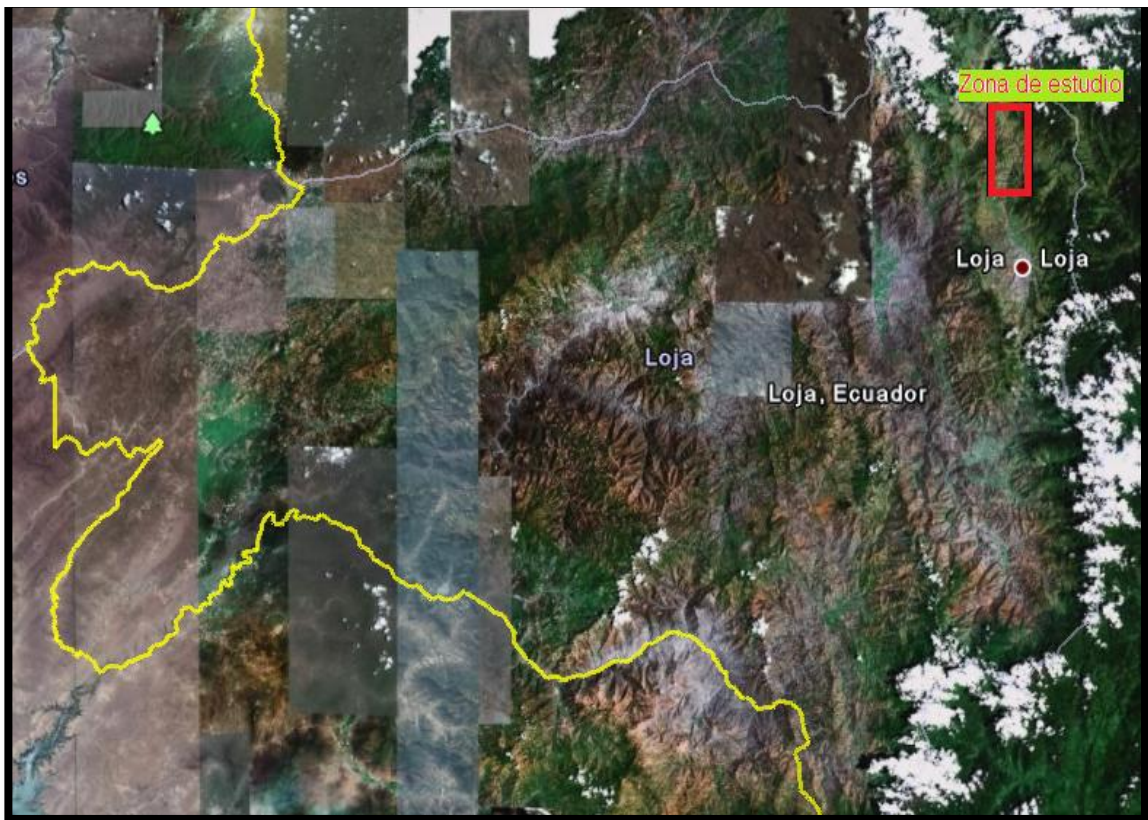


Fig. 4.1: Implantación de la zona de estudio

Fuente: Google Earth

4.1.2 Topografía

El área en estudio presenta una irregularidad en su topografía con pendientes que varían de medias a altas, aportando de manera especial a la inestabilidad de taludes.

El levantamiento topográfico se lo realizó con ayuda de una ESTACIÓN TOTAL, el cual permitió realizar un trabajo mucho más rápido y con un grado de mayor precisión para cada uno de los fines perseguidos.

Primero se establece un punto de Estación en donde se ubico el equipo, se estableció un punto al norte, el cual sirve para insertar el azimut con un valor correspondiente a $0^{\circ}0'0''$. Previamente se establece un punto de coordenadas conocidas tomado como referencia.

Todo el Levantamiento se realizó radialmente (con un sólo punto de estación), debido a la topografía del lugar. El área levantada corresponde a un valor de 21600 m². (Anexo 3.1)

4.1.3 Datos geotécnicos

En el presente proyecto se realizó una visita preliminar con el objetivo de realizar una clasificación visual que determine las características físicas, geológicas y geotécnicas.

El aspecto físico natural de la Provincia de Loja favorece el desarrollo de una fuerte erosión, la cual se manifiesta en la ocurrencia de movimientos en masa y en una acción de descotarse por escurrimiento difuso y concentrado.

La provincia se divide desde el punto de vista geomorfológico en: áreas montañosas, colinosas y onduladas.

La influencia de los cambios bruscos de temperatura, como también los períodos seco y lluvioso, son factores que ayudan a que los diferentes tipos de roca se meteoricen ya sea mecánica (física), química, o biológicamente. Como consecuencia se observa que se forman capas de suelo con espesores que varían desde algunos centímetros hasta metros.

Como la finalidad del presente proyecto es la modelación numérica, no se recalca las propiedades geotécnicas, para lo cual se ha usado parámetros descritos en el libro "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica", del autor Braja M. Das. (2001)

4.2 Modelación en el programa SLOPE

4.2.1 Generalidades

Slope es un programa para el análisis de estabilidad de taludes en tierra con los métodos del Equilibrio Límite (Fellenius, Bishop, Janbu, Bell, Sarma, Spencer, Morgenstern e Price) y el método DEM (Elementos discretos). Permite analizar ya sea superficies de rotura circular que de forma genérica, en presencia de nivel freático, sismo y terreno pluriestratificado.

El software prevé también la agregación de obras de refuerzo como muros, anclajes, pilotes, terrenos reforzados y estructuras escalonadas. Se compone de una ventana de trabajo de tamaño variable según las exigencias, en el interno de la cual se muestra el talud en las diversas fases de cálculo. Las características geométricas del talud, los elementos con el mismo relacionados (sobrecargas, obras de contención) y los parámetros geotécnicos del terreno pueden ser introducidos y modificados al interno del área de trabajo, activando las opciones respectivas en los menús en cascada del programa y/o en las barras de las herramientas.

4.2.2 Modelación

A continuación se presenta la secuencia seguida para la modelación mediante el programa SLOPEW_2007:

1. Ingresar al programa y realizamos las especificaciones para el análisis, como se muestra en la figura 4.2 y 4.3.

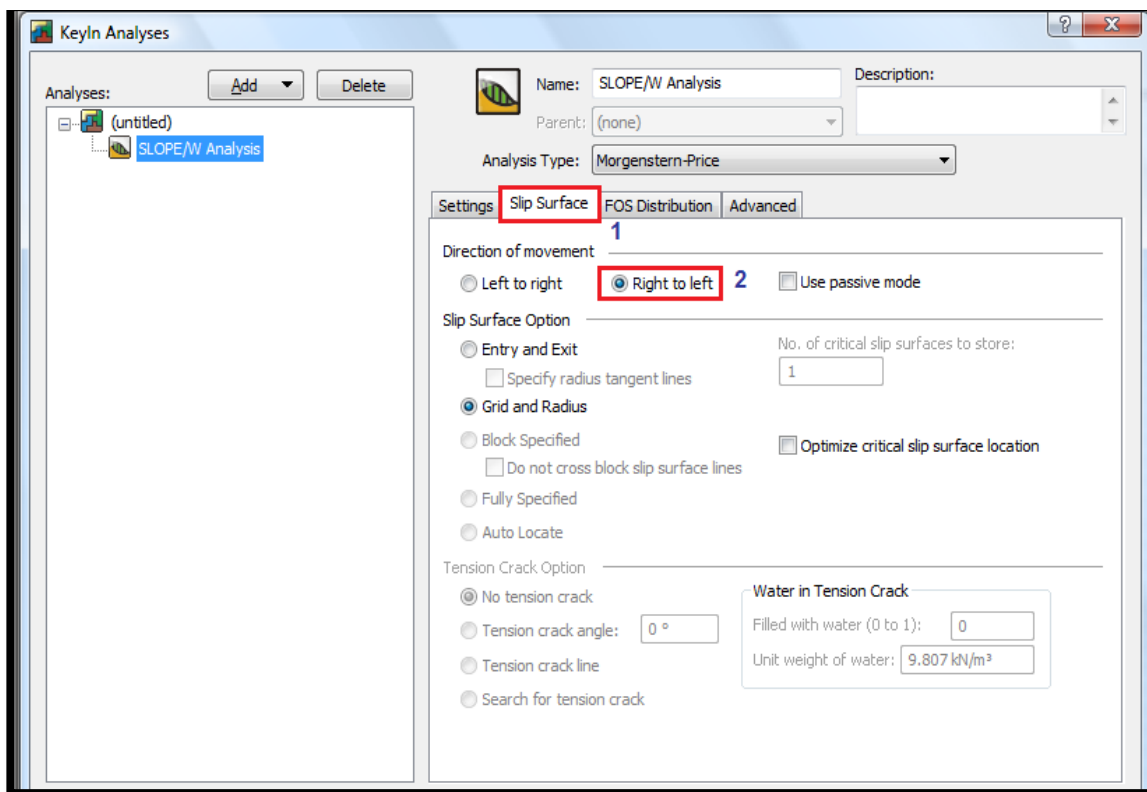


Fig. 4.2: Especificación de las opciones de análisis

Fuente: El Autor

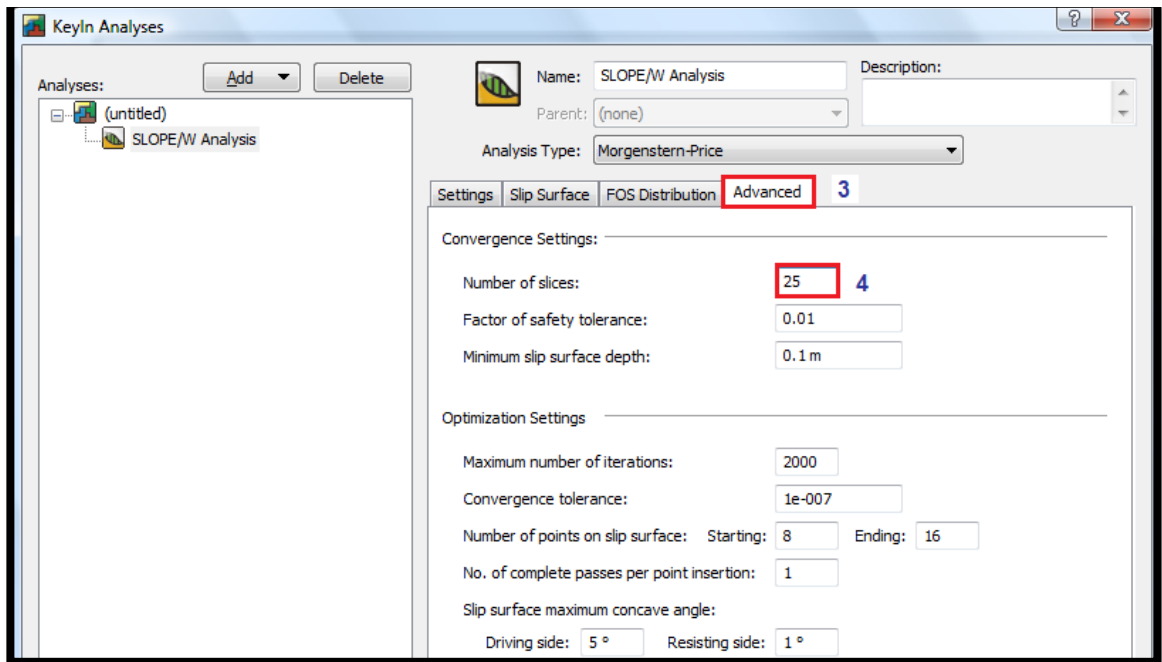


Fig. 4.3: Especificación avanzadas de las opciones de análisis

Fuente: El Autor

2. Fijar el área de trazado, seleccionando las unidades métricas tanto para ancho(260 mm) y altura(190 mm), lo representamos en la figura 4.4:

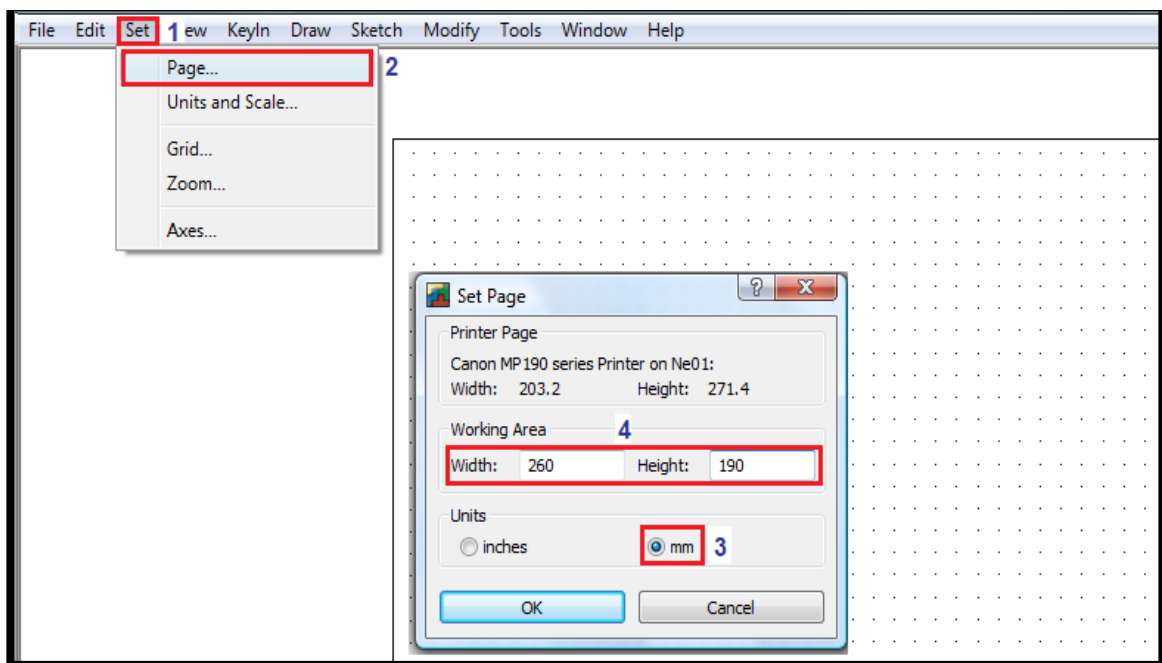


Fig. 4.4: Fijación del área de trazado

Fuente: El Autor

3. Fijar la escala, al momento de elegir las escalas horizontal y vertical tomar en cuenta que abarque a toda la extensión del problema, ver la figura 4.5:

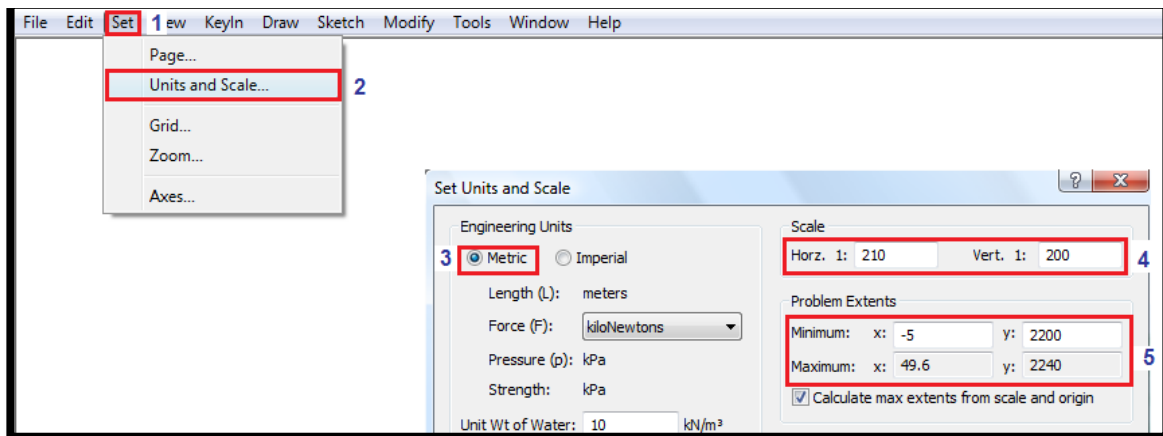


Fig. 4.5: Fijación de la escala del problema

Fuente: El Autor

4. Perfilar el problema, con las coordenadas de los puntos que componen el perfil de terreno y las propiedades de los suelos, tal como se observa en la figura 4.6:

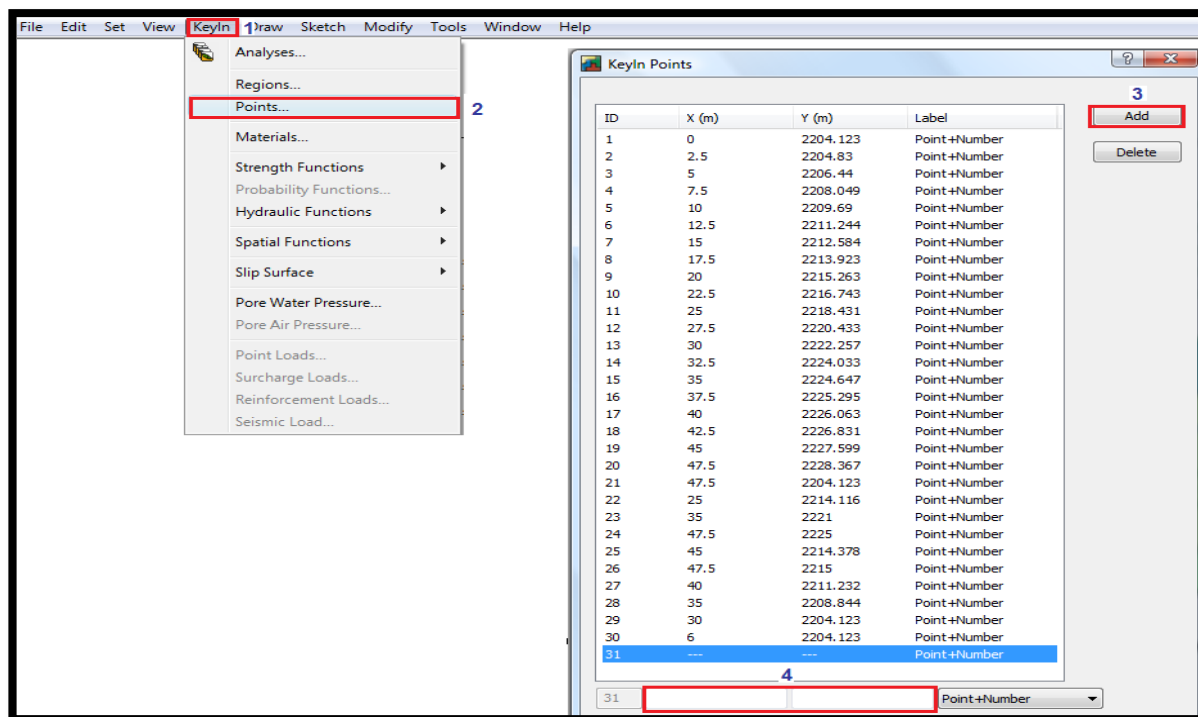


Fig. 4.6: Perfilación del problema

Fuente: El Autor

5. Especificar las opciones de análisis, para una mayor análisis de resultados se ha modelado por 3 métodos (Morgenster-Price, Bishop y Yambú), ver la figura 4.7:

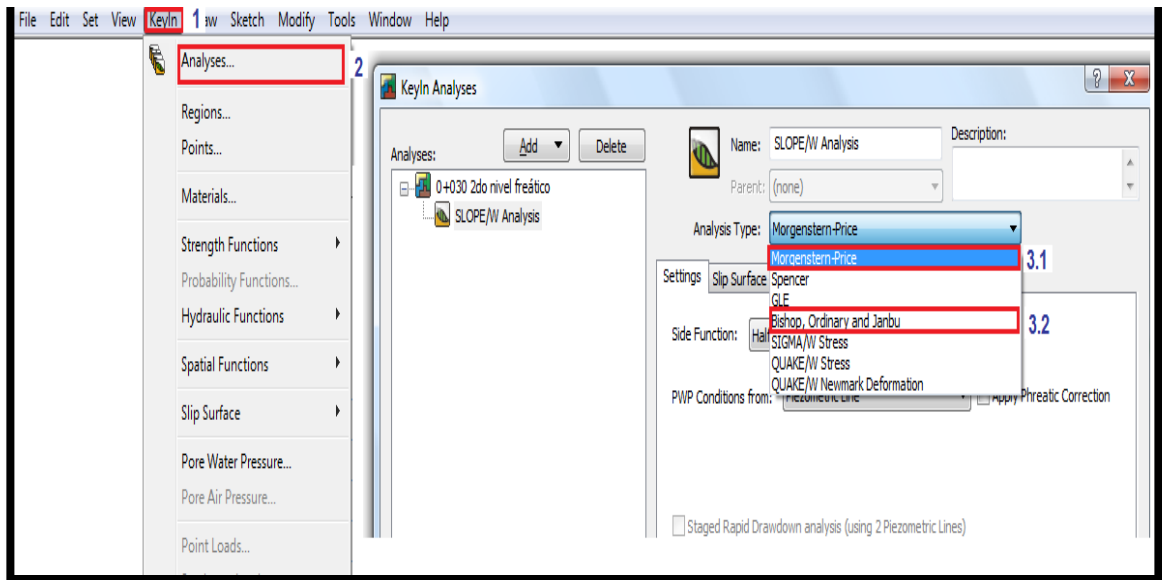


Fig. 4.7: Opciones de Análisis

Fuente: El Autor

6. Definir las propiedades del suelo, con las características presentadas en cada uno, como muestra la figura 4.8:

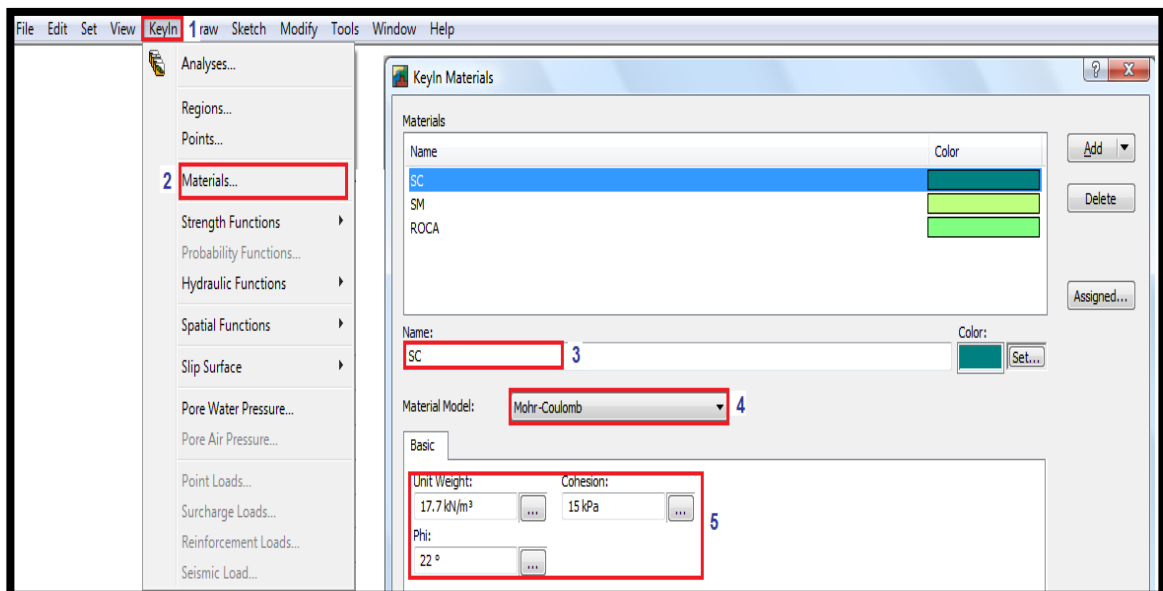


Fig. 4.8: Propiedades de los suelos

Fuente: El Autor

7. Dibujar las líneas del suelo, se agrega el número de capas de suelos(en este caso son 3) y se introducen los puntos pertenecientes a cada capa, este proceso se aplica a todas las capas, ver figura 4.9:

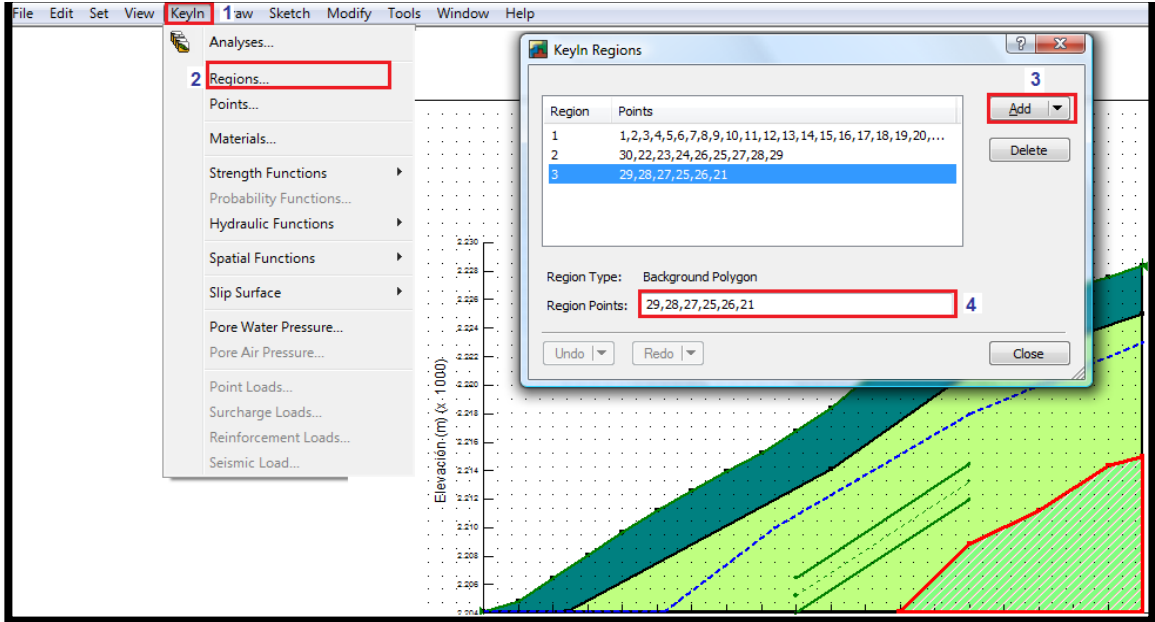


Fig. 4.9: Regiones del suelo

Fuente: El Autor

8. Dibujar la línea piezométrica, uniendo las coordenadas que conforman la misma, tal como se observa en la figura 4.10:

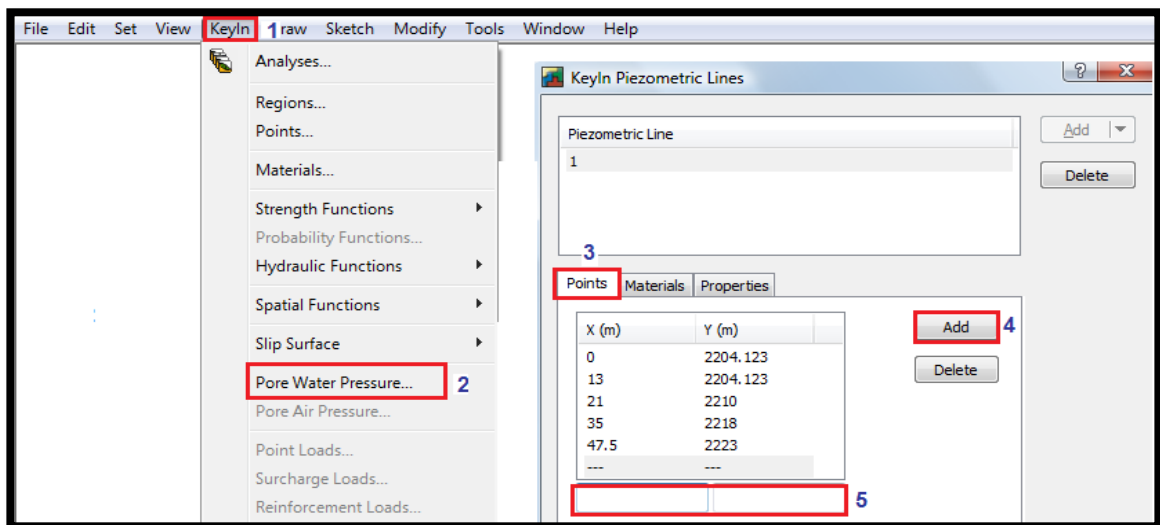


Fig. 4.10: Dibujar la línea piezométrica

Fuente: El Autor

9. Dibujar el radio de la superficie de deslizamiento, también llamado línea de radios. Las líneas de tangencia y la malla de radios deben ser colocados de tal manera que proporcionen superficies de falla semejantes a los que se observan en el talud, ver figura 4.11:

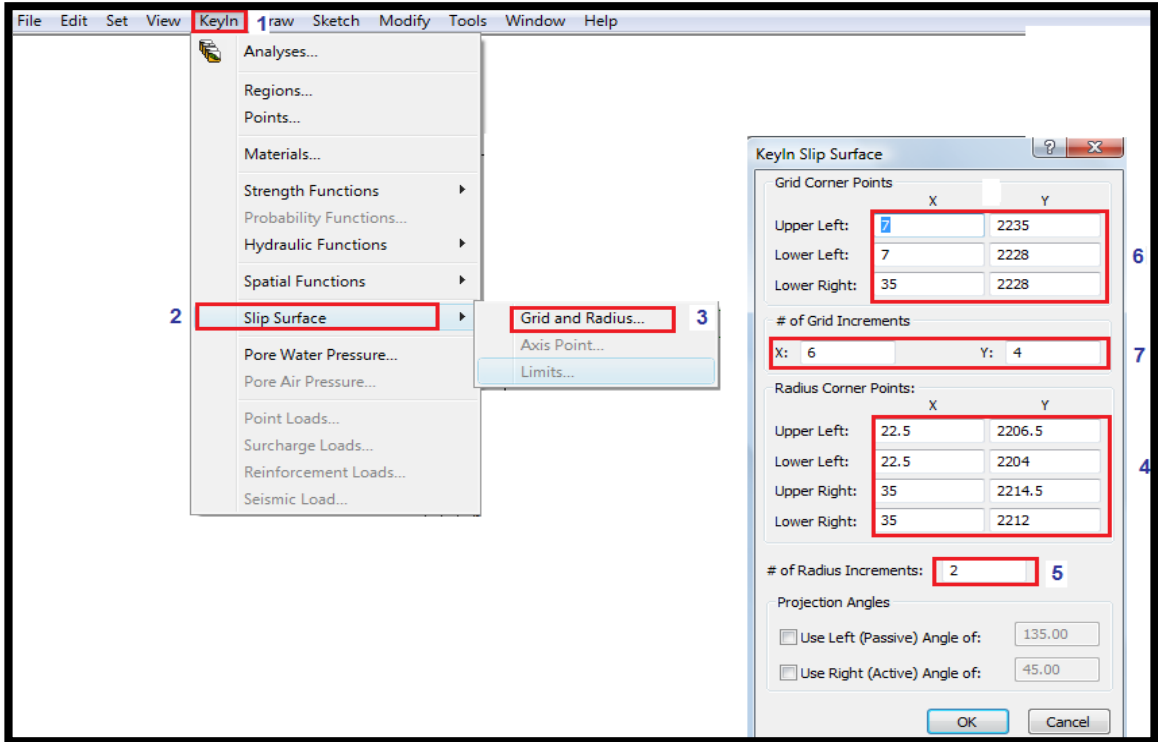


Fig. 4.11: Línea de radios

Fuente: El Autor

10. Verificamos los datos ingresados, en caso de existir procedemos a revisar, minuciosamente la fuente del error. Una vez que no existan errores realizamos el análisis respectivo, ver la figura 4.12 y 4.13:

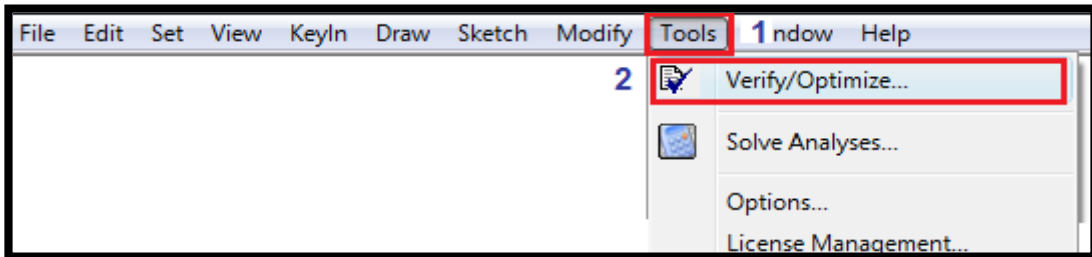


Fig. 4.12: Verificación General

Fuente: El Autor

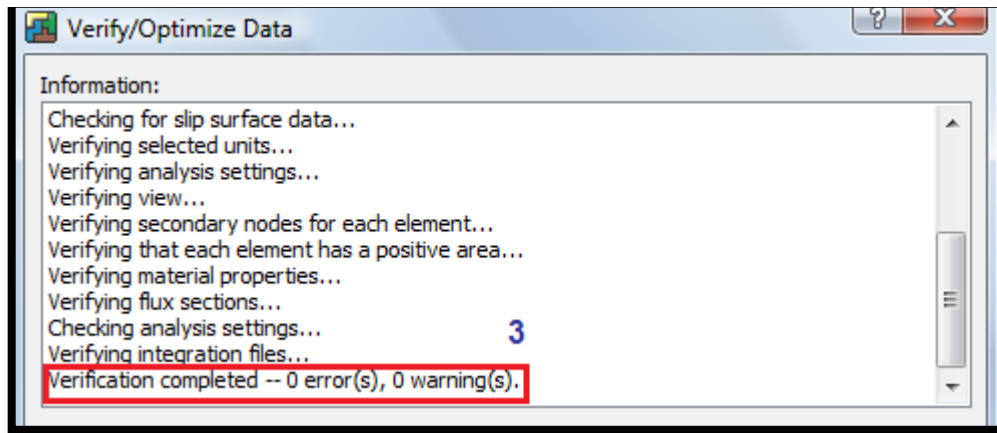


Fig. 4.13: Verificación de datos de entrada
Fuente: El Autor

11. Evaluación del factor de seguridad, una vez realizado la verificación de datos, tal como se observa en la figura 4.14:

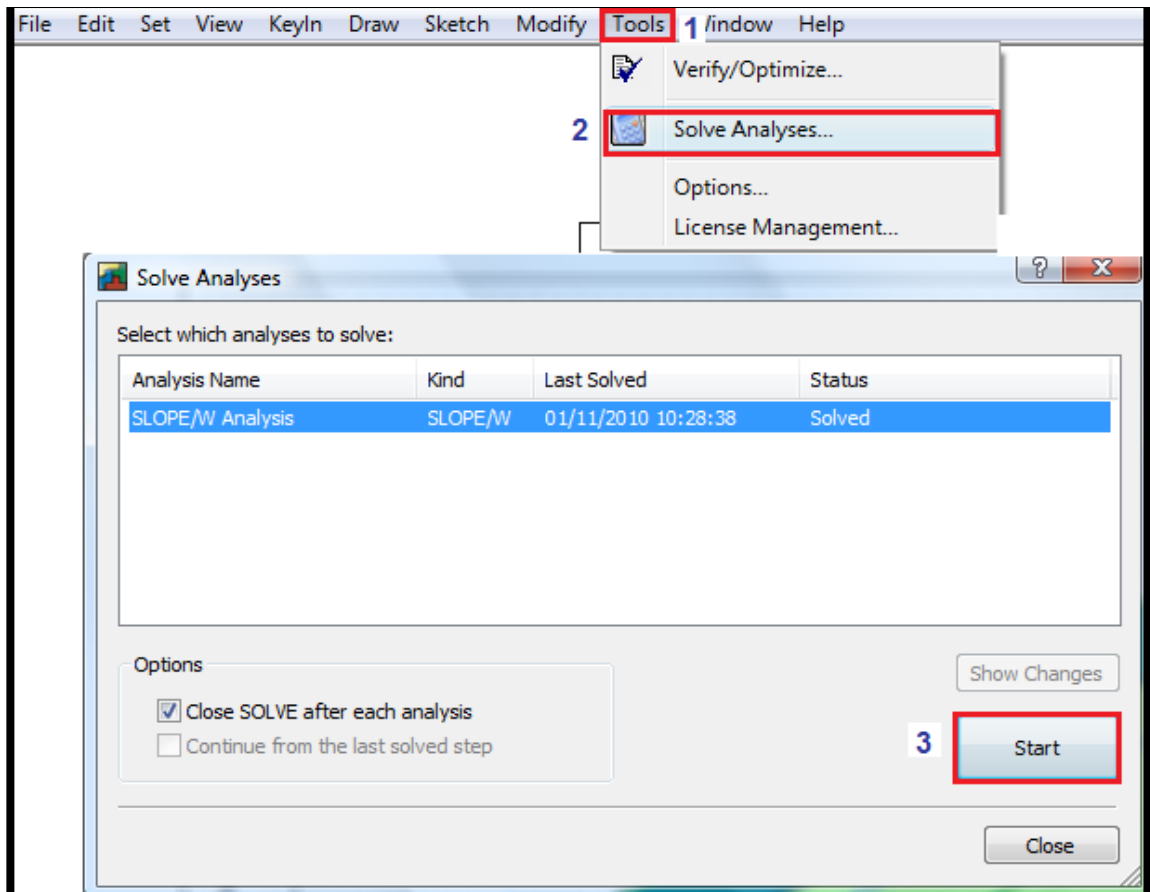


Fig. 4.14: Evaluación del factor de seguridad
Fuente: El Autor

12. Obtención de resultados, además se realiza la visualización del factor de seguridad por cada método propuesto, ver figura 4.15:

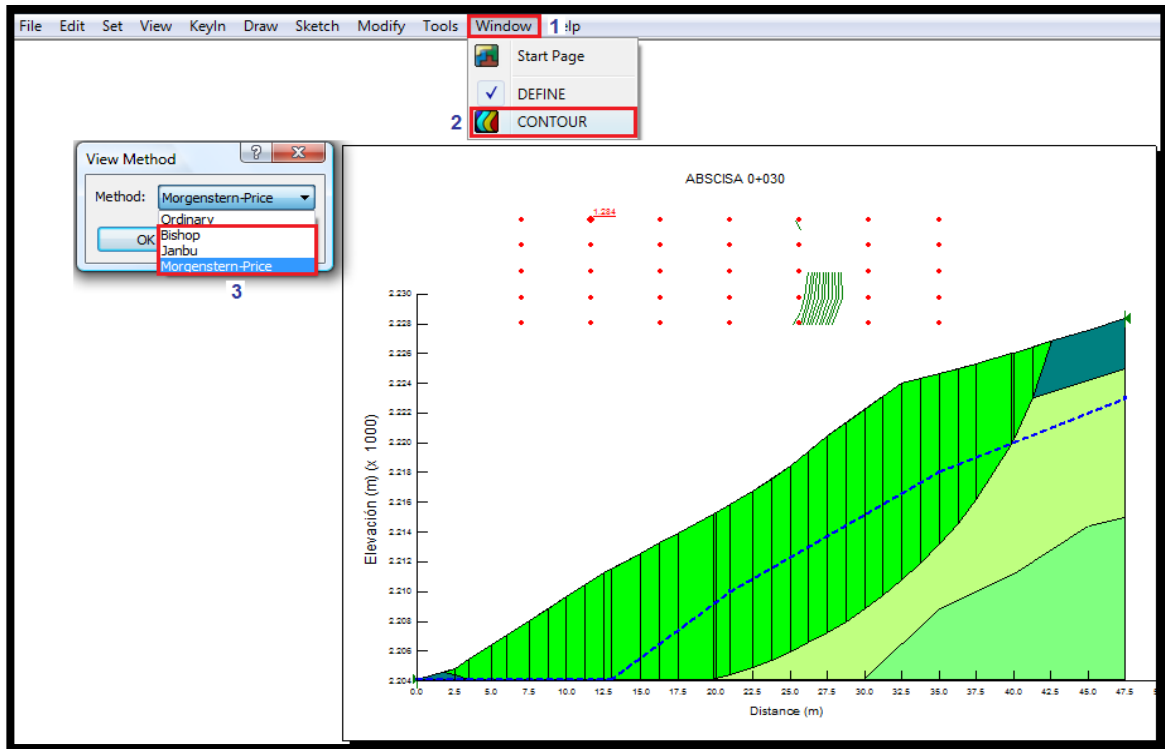


Fig. 4.15: Obtención de resultados

Fuente: El Autor

13. Reporte de resultados de análisis, ver figura 4.16:

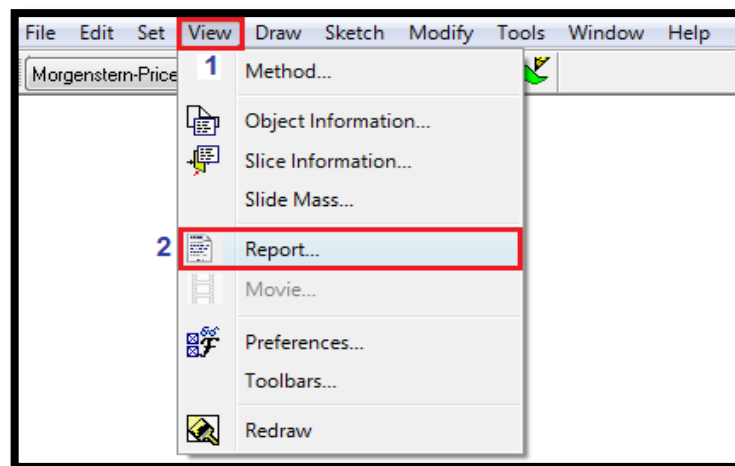


Fig. 4.16: Reporte de resultados

Fuente: El Autor

4.3 Modelación en el programa PLAXIS

4.2.1 Generalidades

PLAXIS es un programa de ordenador de elementos finitos bidimensionales diseñado específicamente para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos. Las situaciones modelizables corresponden a problemas de deformación plana o con axisimetría. 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 trate.

4.2.2 Modelación

A continuación se presenta la secuencia seguida para la modelación mediante el programa PLAXIS:

1. Características iniciales del proyecto, se toma en cuenta la aceleración de la gravedad en nuestra ciudad, además para mayor comprensión de los resultados se trabaja con unidades métricas, como se observa en la figura 4.17:

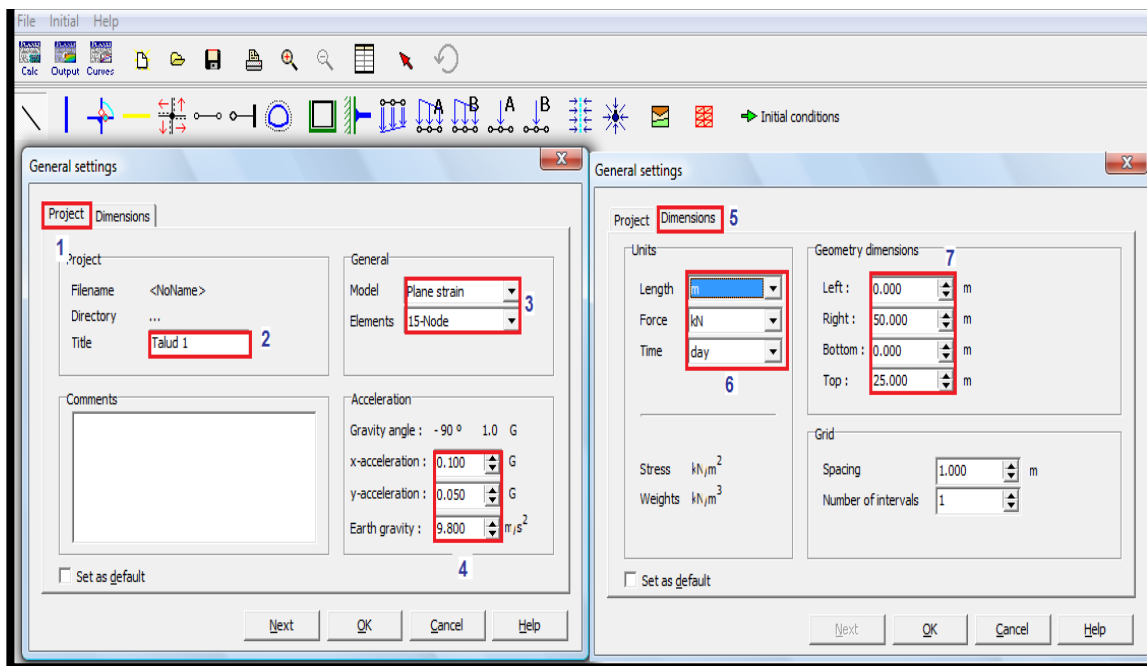


Fig. 4.17: Características iniciales

Fuente: El Autor

2. Perfilar el problema, incluyendo todas las capas de suelo existentes, como se muestra en la figura 4.18:

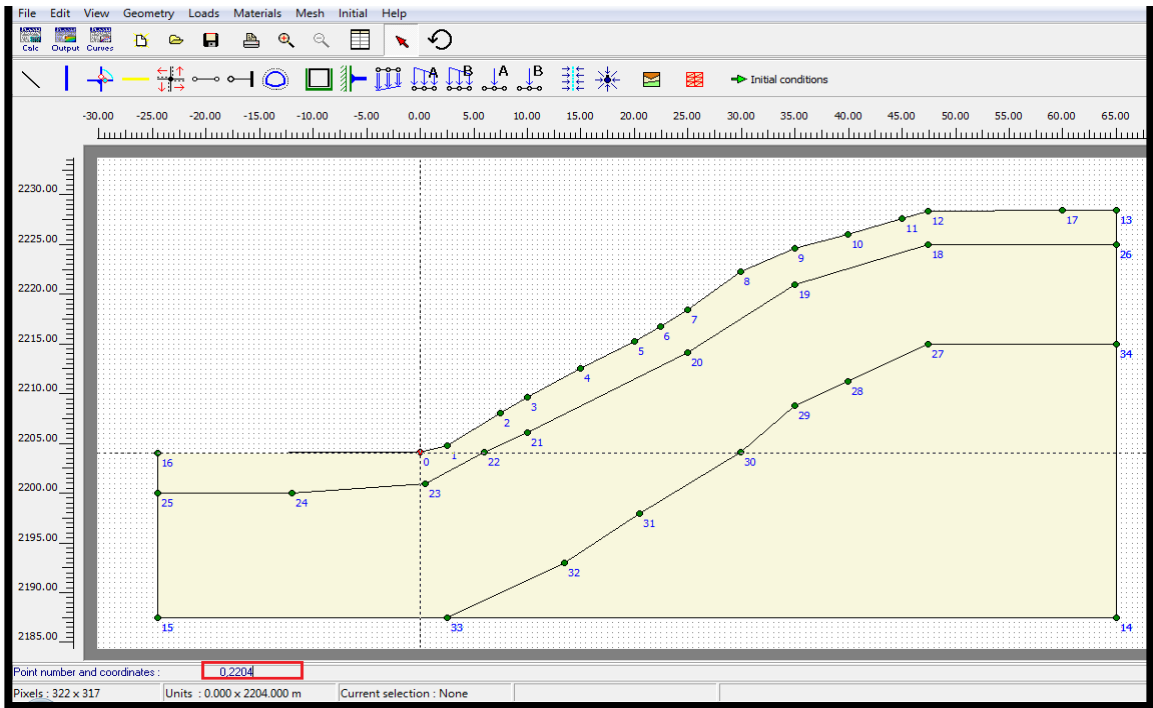


Fig. 4.18: Perfilar el problema

Fuente: El Autor

3. Rigidizar la estructura, esto impide fuerzas externas, ver figura 4.19:

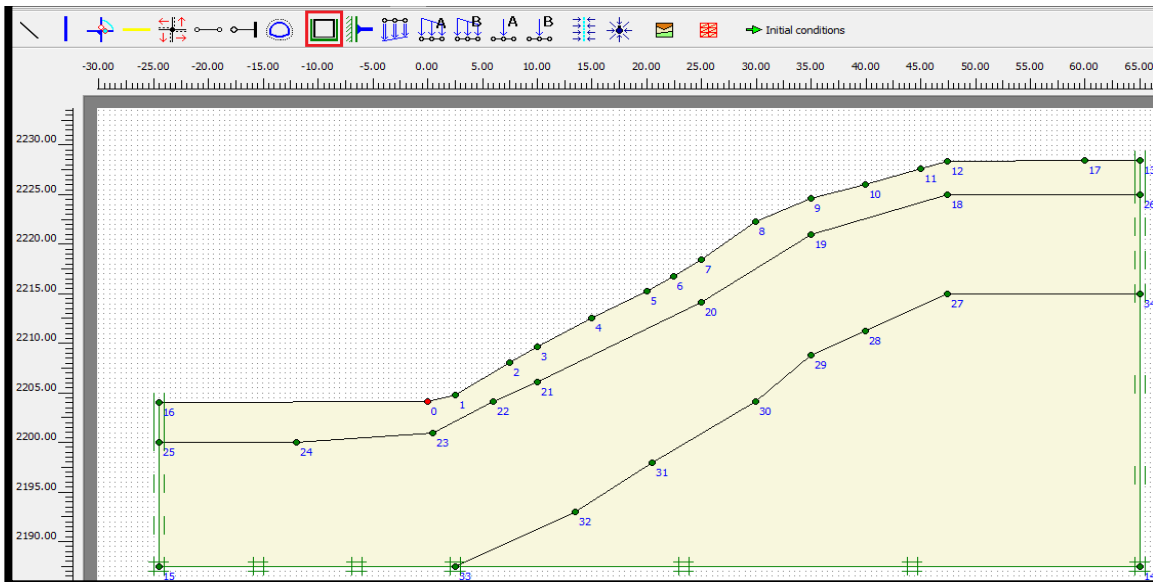


Fig. 4.19: Rigidizar la estructura

Fuente: El Autor

4. Propiedades de los suelos, se sigue la secuencia mostrada en la figura 4.20:

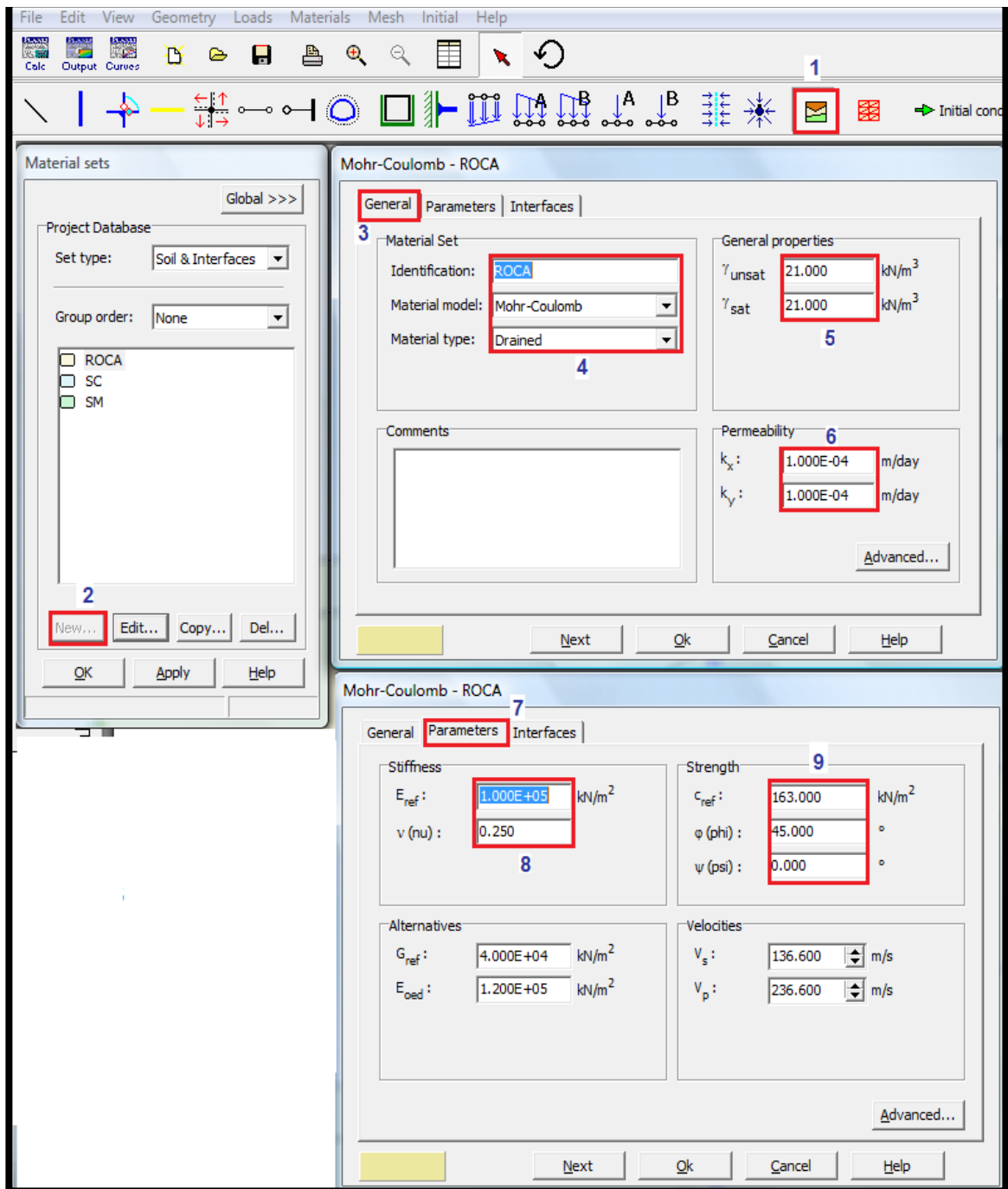


Fig. 4.20: Propiedades de los suelos

Fuente: El Autor

5. Una vez designado los tipos de suelo, procedemos asignarlos a las diferentes capas respectivamente.
6. Generar un mesh, mientras la malla de elementos finitos sea más finas el análisis es más minucioso, se opta por una malla FINA, ver la figura 4.21:

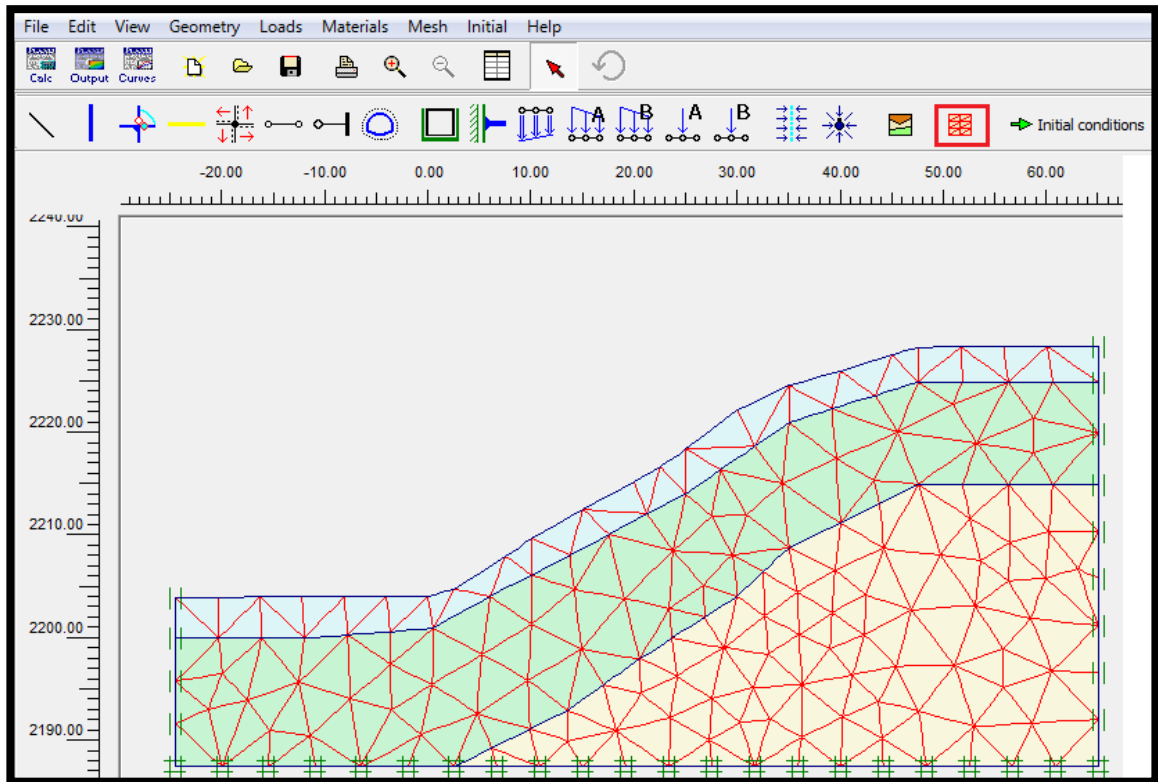


Fig. 4.21: Generación del mesh

Fuente: El Autor

7. Dar las condiciones iniciales, dentro de este punto se procede a dibujar la línea piezométrica y dar paso al cálculo, como se observa en la figura 4.22:

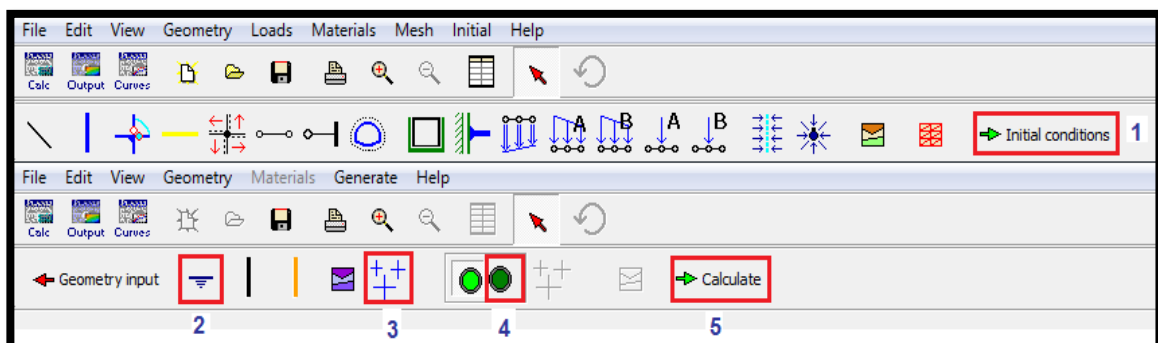


Fig. 4.22: Condiciones iniciales

Fuente: El Autor

8. Opciones de cálculo, se realizará un análisis de reducción de la resistencia de corte del suelo constante, ver la figura 4.23

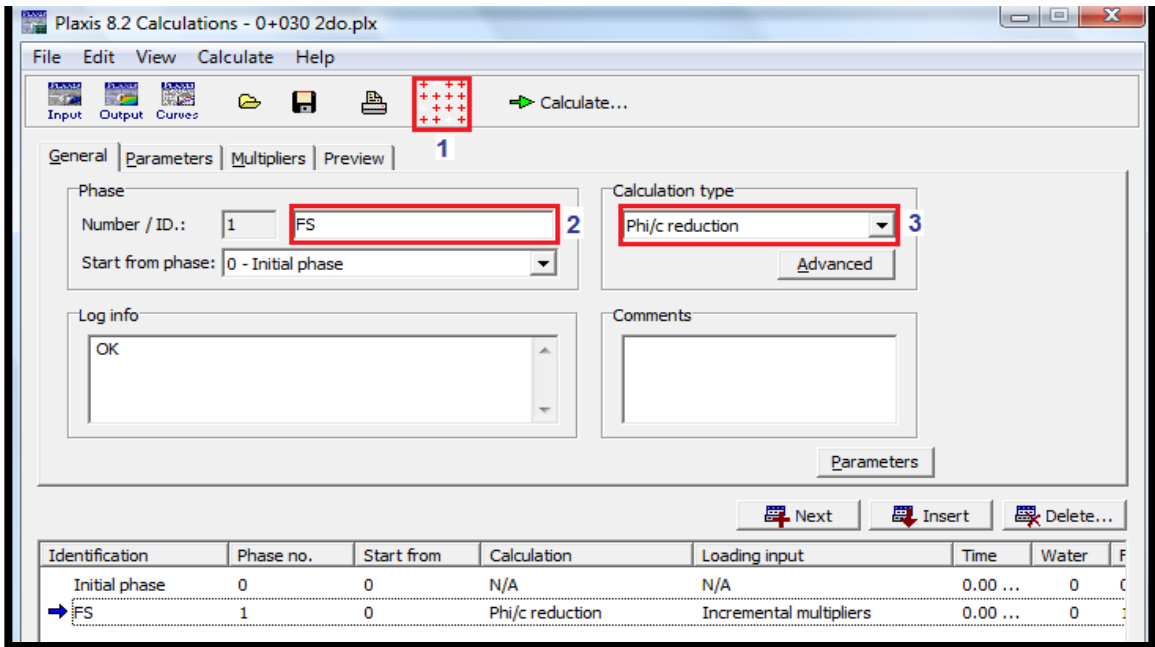


Fig. 4.23: Características del cálculo

Fuente: El Autor

9. Cálculo, se realizan las iteraciones necesarias para llegar al punto de falla, ver figura 4.24:

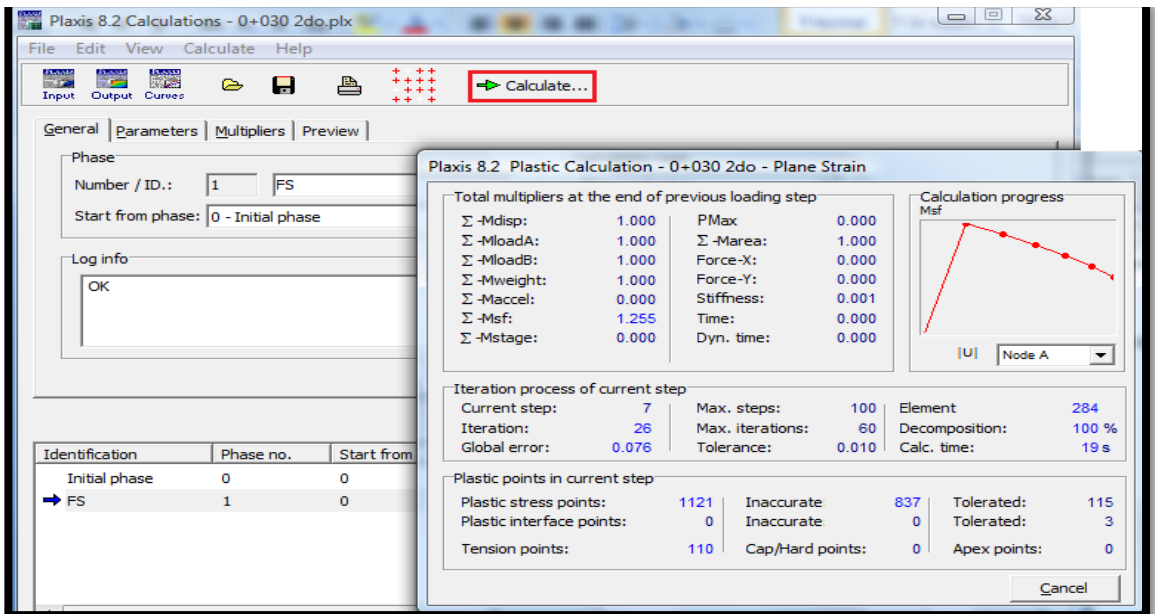


Fig. 4.24: Cálculo

Fuente: El Autor

10. Visualización de resultados, se observa el factor de seguridad y la forma en la que se ha producido la falla, como se muestra en la figura 4.25 y 4.26:

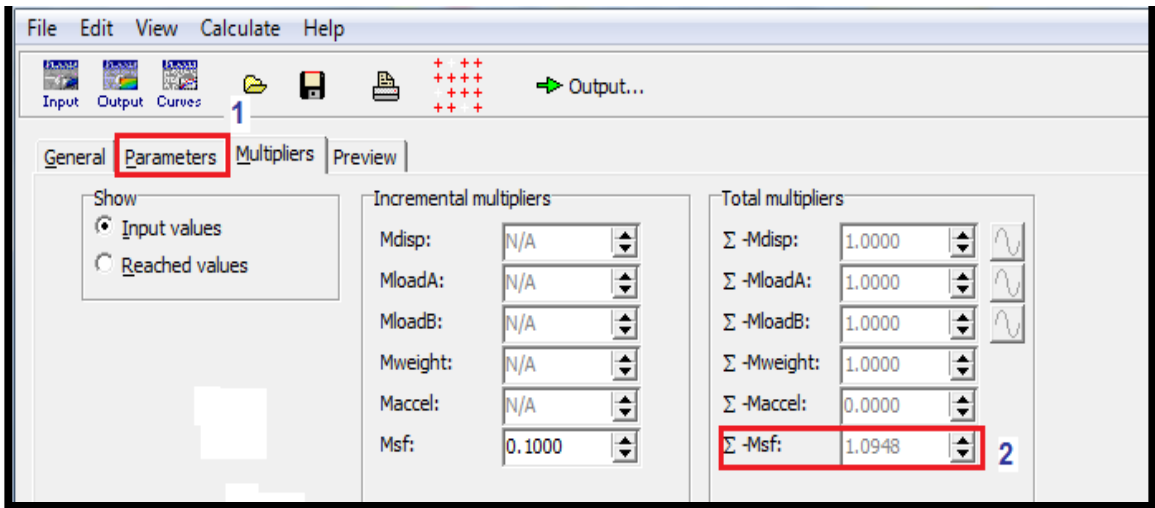


Fig. 4.25: Factor de seguridad

Fuente: El Autor

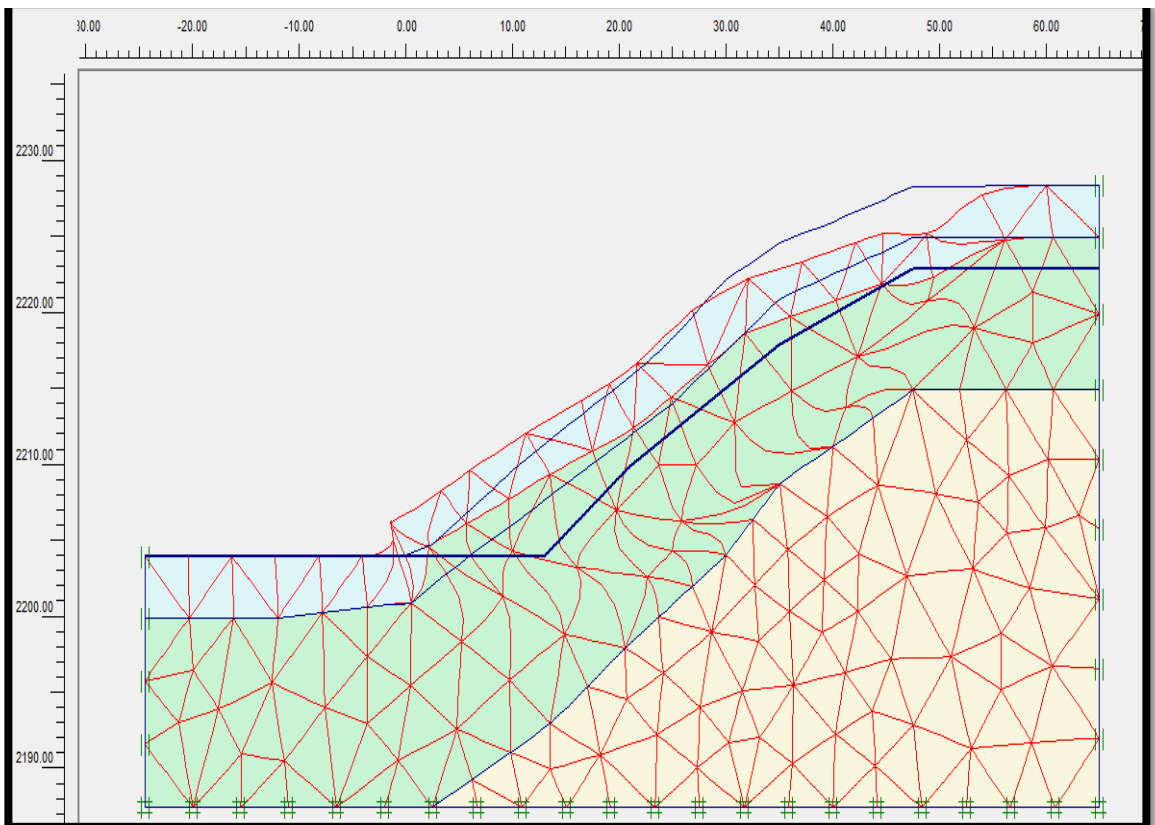


Fig. 4.26: Magnitud de la falla

Fuente: El Autor

CAPÍTULO V

5. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

5.1 SLOPEW_2007

5.1.1 Resultados

5.1.1.1 Tablas

Una vez realizada las simulaciones correspondientes de los taludes por los diferentes métodos, se procede a mostrar los resultados por medio de la siguiente tabla para su posterior análisis:

Tabla 5.1: Resultados del programa SLOPEW_2007

SLOPE					
MÉTODO	TALUD	POSICIÓN	ESTADO		
			NATURAL	1er NIVEL FREÁTICO	2do NIVEL FREÁTICO
Morgenstern - Price	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.488	1.284	1.072
	Talud 2	ABSCISA 0+090	1.264	1.104	0.848
	Talud 3	ABSCISA 0+150	1.500	1.291	0.982
	Talud 4	ABSCISA 0+210	2.166	1.969	1.641
Bishop	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.495	1.270	1.072
	Talud 2	ABSCISA 0+090	1.270	1.106	0.845
	Talud 3	ABSCISA 0+150	1.497	1.286	0.973
	Talud 4	ABSCISA 0+210	2.169	1.972	1.642
Jambu	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.345	1.135	0.957
	Talud 2	ABSCISA 0+090	1.133	0.982	0.741
	Talud 3	ABSCISA 0+150	1.303	1.120	0.837
	Talud 4	ABSCISA 0+210	1.940	1.766	1.479

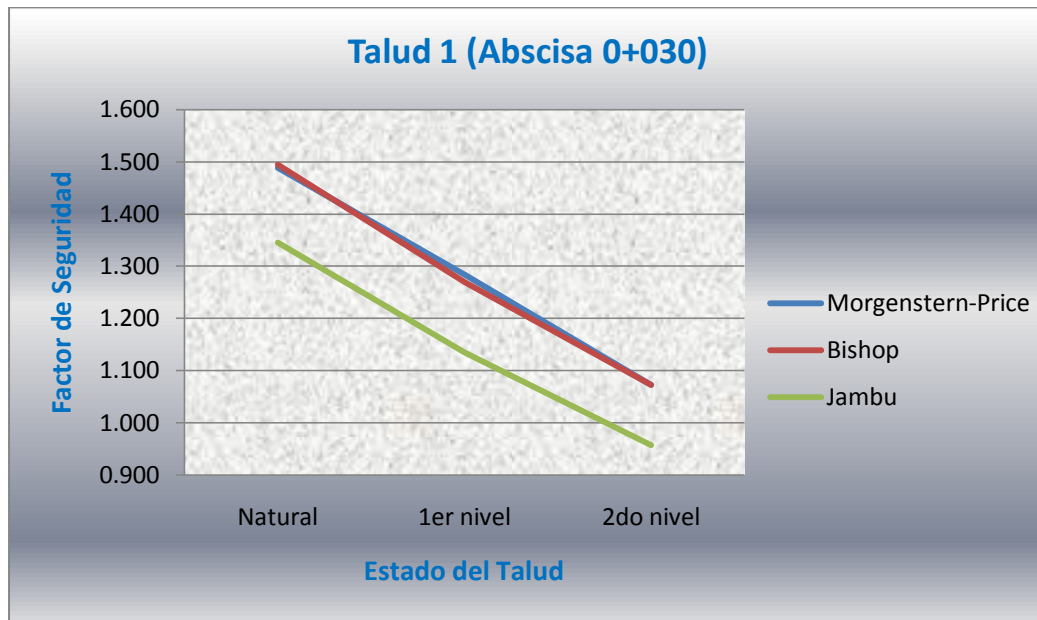
Fuente: El Autor

5.1.1.2 Gráficas

Realizamos las gráficas correspondientes de la variación de Factor de Seguridad vs Niveles de carga freática, correspondiente a cada perfil, analizados los 3 diferentes

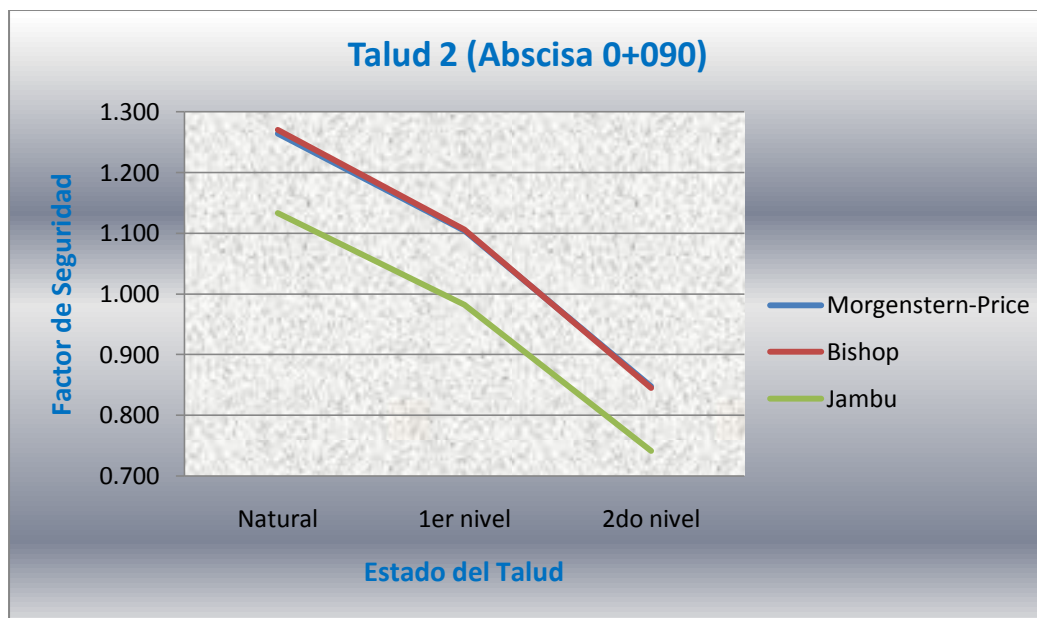
métodos utilizados, para su posterior análisis, los resultados se muestran a continuación:

Figura 5.1: Gráfica del talud 1 (Abscisa 0+030)



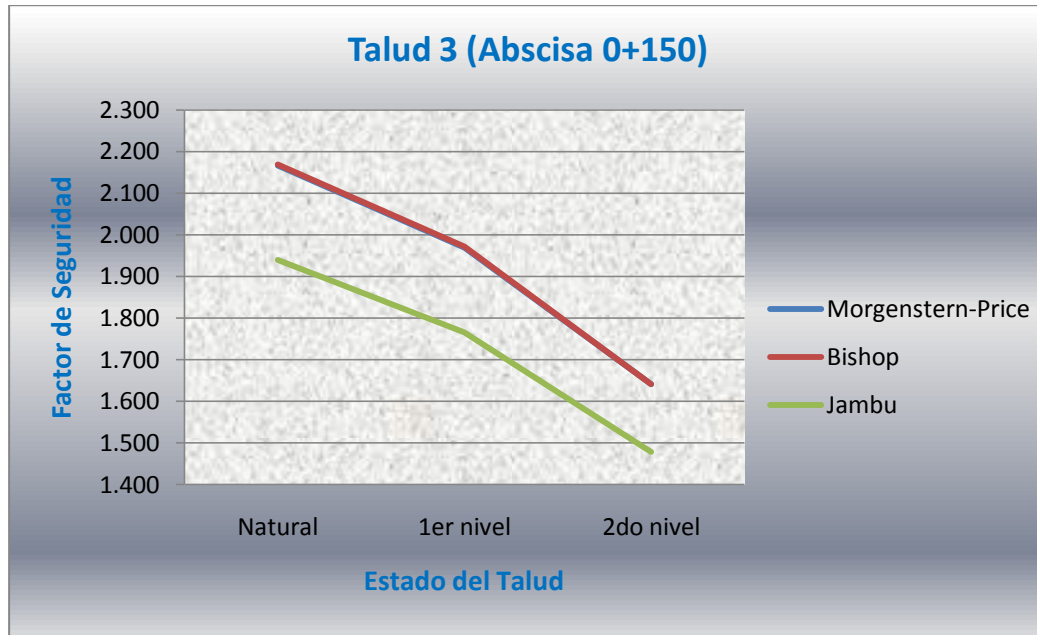
Fuente: El Autor

Figura 5.2: Gráfica del talud 2 (Abscisa 0+090)



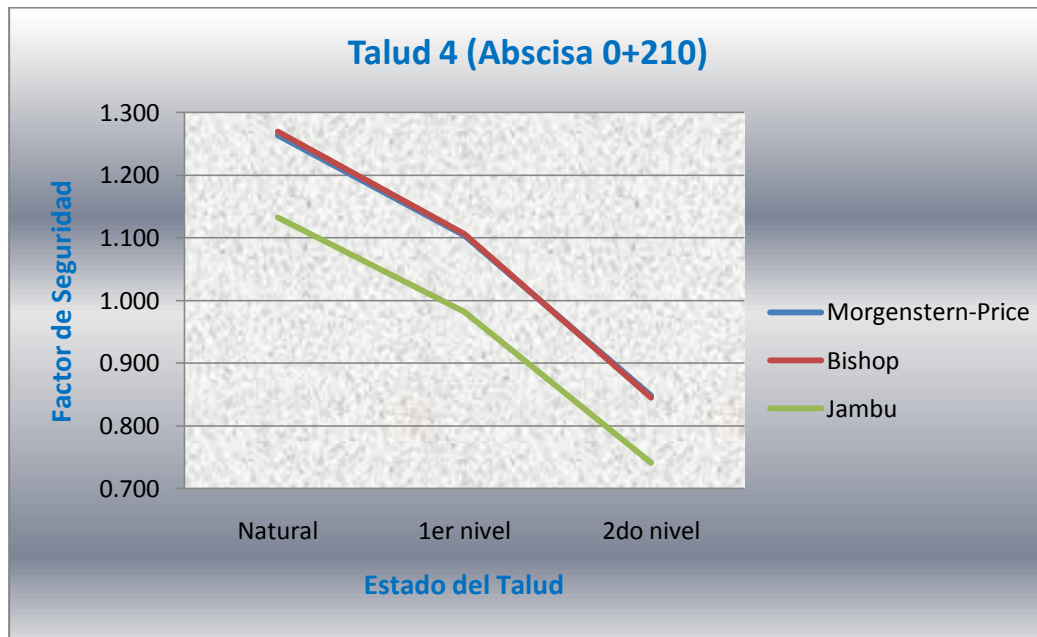
Fuente: El Autor

Figura 5.3: Gráfica del talud 3 (Abscisa 0+150)



Fuente: El Autor

Figura 5.4: Gráfica del talud 4 (Abscisa 0+210)



Fuente: El Autor

5.2 PLAXIS

5.2.1 Resultados

5.2.1.1 Tablas

Una vez realizada las simulaciones correspondientes de los taludes, se procede a mostrar los resultados por medio de tablas para su posterior análisis:

Tabla 5.2: Resultados del programa PLAXIS

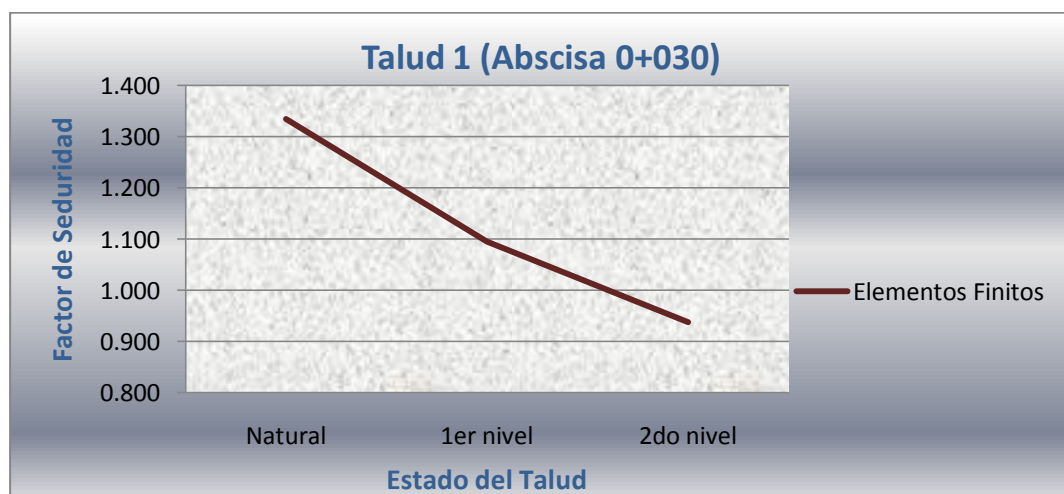
PLAXIS					
MÉTODO	TALUD	POSICIÓN	ESTADO		
			NATURAL	1er NIVEL FREÁTICO	2do NIVEL FREÁTICO
Elementos Finitos	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.335	1.095	0.937
	Talud 2	ABSCISA 0+090	0.895	0.896	0.733
	Talud 3	ABSCISA 0+150	0.973	0.958	0.753
	Talud 4	ABSCISA 0+210	1.341	1.298	1.187

Fuente: El Autor

5.2.1.2 Gráficas

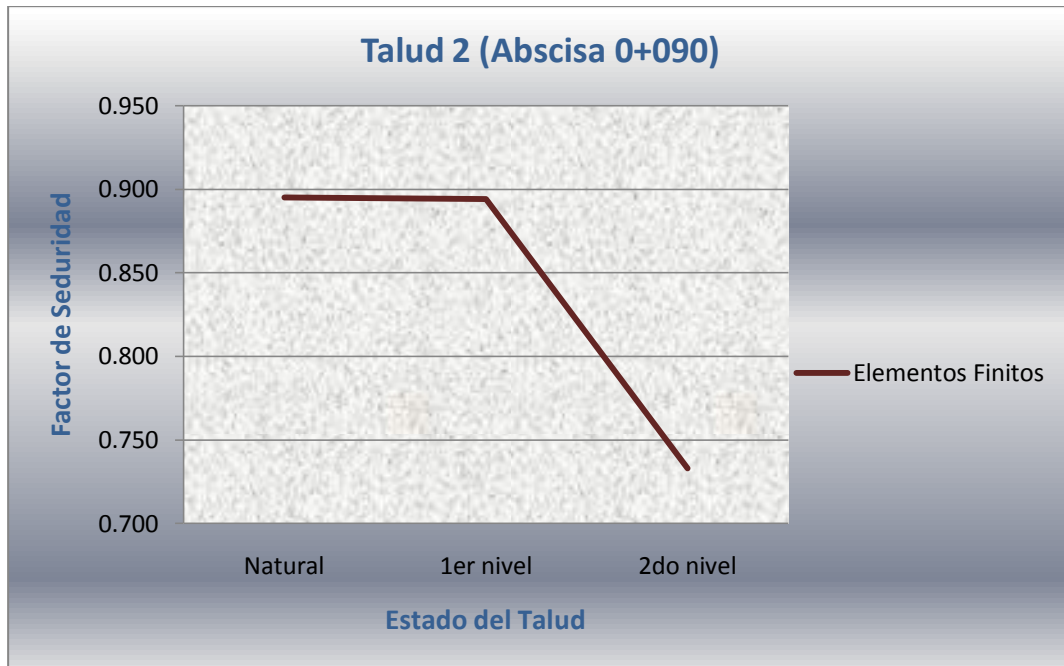
Realizamos las gráficas correspondientes de la variación de Factor de Seguridad vs Niveles de carga freática, como se muestran a continuación:

Figura 5.5: Gráfica del talud 1 (Abscisa 0+030) PLAXIS



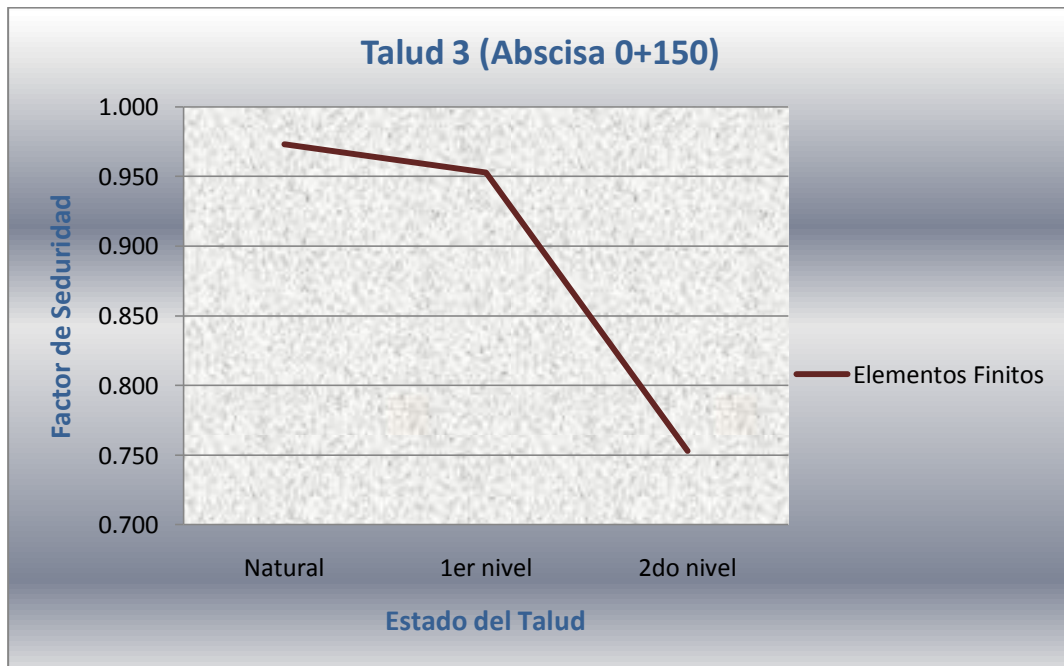
Fuente: El Autor

Figura 5.6: Gráfica del talud 2 (Abscisa 0+090) PLAXIS



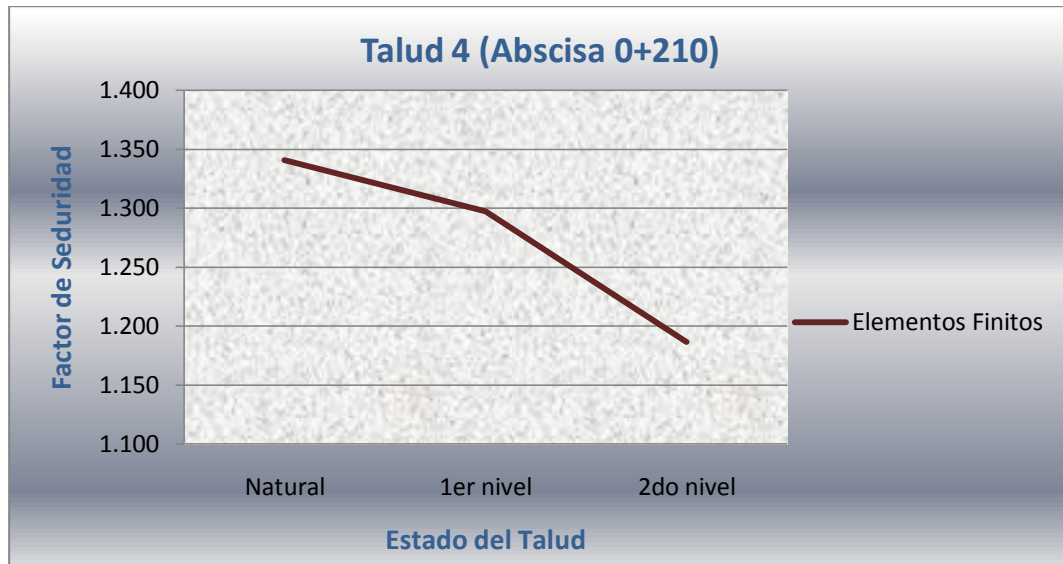
Fuente: El Autor

Figura 5.7: Gráfica del talud 3 (Abscisa 0+150) PLAXIS



Fuente: El Autor

Figura 5.8: Gráfica del talud 4 (Abscisa 0+210) PLAXIS



Fuente: El Autor

5.3 Análisis de resultados

5.3.1 Resumen

Una vez terminada la modelación numérica de las diferentes metodologías, se ha obtenido los siguientes datos:

Tabla 5.3: Tabla de resumen de programación

PROGRAMA	MÉTODO	TALUD	POSICIÓN	ESTADO		
				Natural	1er nivel freático	2do nivel freático
SLOPE	Morgenstern-Price	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.488	1.284	1.072
		Talud 2	ABSCISA 0+090	1.264	1.104	0.848
		Talud 3	ABSCISA 0+150	1.500	1.291	0.982
		Talud 4	ABSCISA 0+210	2.166	1.969	1.641
	Bishop	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.495	1.270	1.072
		Talud 2	ABSCISA 0+090	1.270	1.106	0.845
		Talud 3	ABSCISA 0+150	1.497	1.286	0.973
		Talud 4	ABSCISA 0+210	2.169	1.972	1.642
	Jambu	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.345	1.135	0.957
		Talud 2	ABSCISA 0+090	1.133	0.982	0.741
		Talud 3	ABSCISA 0+150	1.303	1.120	0.837
		Talud 4	ABSCISA 0+210	1.940	1.766	1.479

PLAXIS	Elementos Finitos	Talud 1	ABSCISA 0+030	1.335	1.095	0.937
		Talud 2	ABSCISA 0+090	0.895	0.896	0.733
		Talud 3	ABSCISA 0+150	0.973	0.958	0.753
		Talud 4	ABSCISA 0+210	1.341	1.298	1.187

Fuente: El Autor

5.3.2 Metodología de análisis

Para proceder al análisis y comparación de resultados se tomarán los valores obtenidos por los 2 programas propuestos. En lo que respecta a la metodología de equilibrio límite (Slope), se toma como representativo el método Bishop; mientras que la metodología de elementos finitos (Plaxis), se caracteriza por un análisis de reducción constante de la resistencia cortante del suelo.

Uno de los factores principales que ocasionan esta falla es la deficiente características geotécnicas del suelo que no ayudan a dar soporte a la masa del suelo y producen fallas sistemáticas. Por otra parte las lluvias constantes que en el sector ocurren provocan la saturación del suelo lo cual contribuye a un deslizamiento.

La gran pendiente y la clara evidencia de suelo suelto en la parte baja nos da una pauta de deslizamientos anteriores que provocan deslizamientos debido a la erosión del terreno.

5.3.2.1 Talud 1

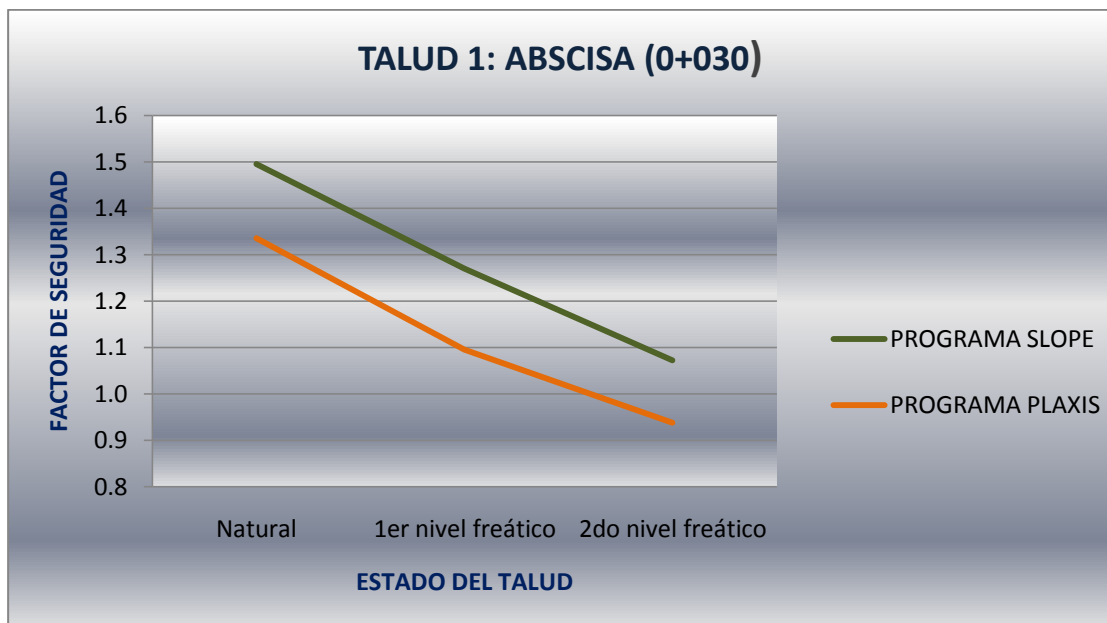
A continuación se presenta los resultados pertenecientes al talud 1, correspondientes a los 2 tipos de metodologías en análisis.

Tabla 5.4: Tabla de resumen de programación, talud 1

ESTADO	PROGRAMA	
	SLOPE	PLAXIS
Natural	1.495	1.335
1er nivel freático	1.27	1.095
2do nivel freático	1.072	0.937

Fuente: El Autor

Figura 5.9: Gráfica de análisis, talud 1 (Abscisa 0+030)



Fuente: El Autor

- **Comparación entre los métodos de equilibrio límite y elementos finitos**

Observando los resultados precisamos que las 2 metodologías realizan un análisis similar en lo que se refiere a la elevación del nivel freático, ya que afecta directamente a la estabilidad del talud porque afecta directamente a las características geotécnicas del suelo.

Los factores de seguridad bajan constantemente con relación a las cargas freáticas de una manera lineal.

Las superficies de falla mostradas por el programa de elementos finitos (Plaxis) son semejantes a las que tenemos presentes en el talud, la cual podemos observar en el Anexo 1.2

- **Factor de seguridad presente**

El factor de seguridad que tenemos presente en el talud es de 1.3 para el estado natural, 1.1 para el 1er nivel freático y 0.9 para el 2do nivel. Tomando en cuenta las ocurrencias de las diferentes cargas freáticas podemos concluir un factor de seguridad general de 0.9, por ser el más crítico registrado en el análisis, por lo que es necesario proponer una alternativa correctiva que tenga una repercusión económica baja y ayude a la estabilización del talud.

5.3.2.2 Talud 2

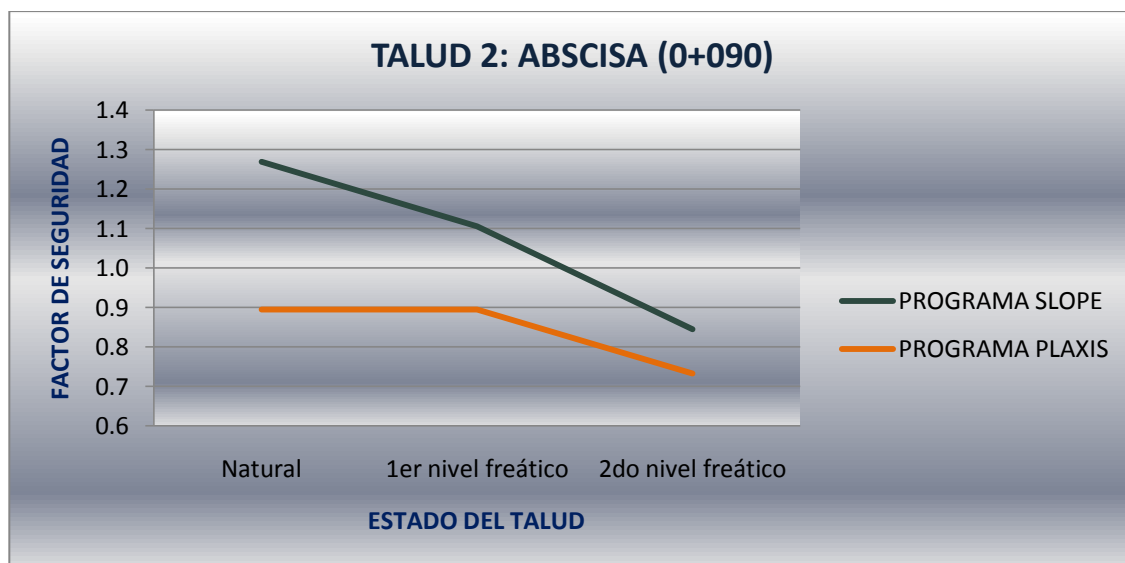
A continuación se presenta los resultados pertenecientes al talud 2, correspondientes a los 2 tipos de metodologías en análisis:

Tabla 5.5: Tabla de resumen de programación, talud 2

ESTADO	PROGRAMA	
	SLOPE	PLAXIS
Natural	1.27	0.895
1er nivel freático	1.106	0.895
2do nivel freático	0.845	0.733

Fuente: El Autor

Figura 5.10: Gráfica de análisis, talud 2 (Abscisa 0+190)



Fuente: El Autor

- **Comparación entre los métodos de equilibrio límite y elementos finitos**

En lo que se refiere a la metodología de equilibrio límite, los factores de seguridad bajan constantemente con relación a las cargas freáticas de una manera lineal. Mientras que por la metodología de elementos finitos hay una pequeña disminución del factor de seguridad en el primer tramo analizado.

Las superficies de falla mostradas por el programa de elementos finitos (Plaxis) son semejantes a las que tenemos presentes en el talud, la cual podemos observar en el Anexo 1.3

- **Factor de seguridad presente**

El factor de seguridad que tenemos presente en el talud es de 1.0 para el estado natural, 0.9 para el 1er nivel freático y 0.75 para el 2do nivel freático. Tomando en cuenta las ocurrencias de las diferentes cargas freáticas podemos concluir un factor de seguridad general de 0.75, por ser el más crítico registrado en el análisis, por lo que es necesario proponer una alternativa correctiva que tenga una repercusión económica baja y ayude a la estabilización del talud.

5.3.2.2 Talud 3

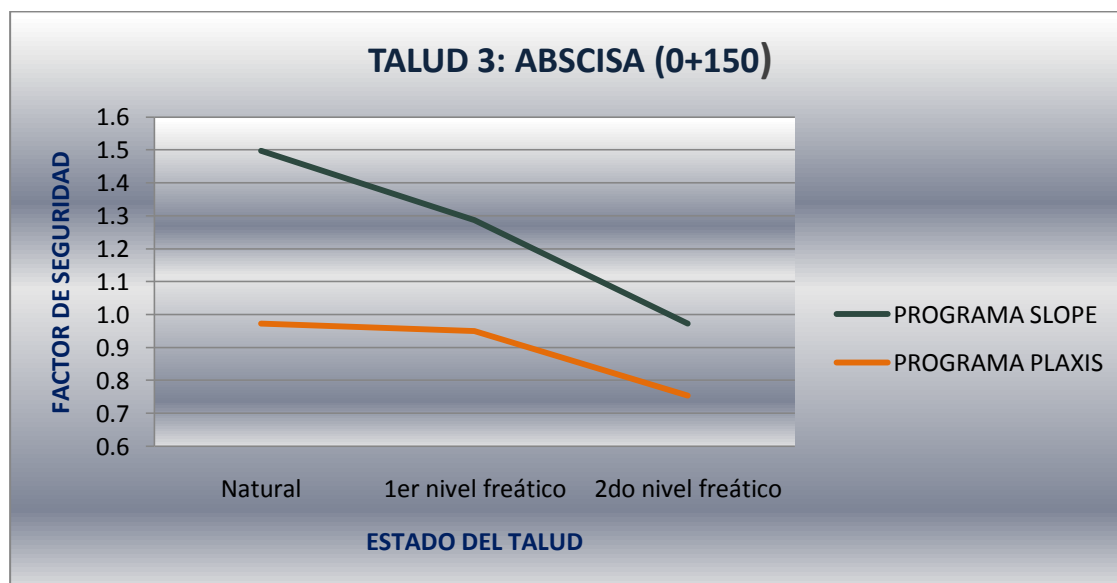
A continuación se presenta los resultados pertenecientes al talud 3, correspondientes a los 2 tipos de metodologías en análisis:

Tabla 5.6: Tabla de resumen de programación, talud 3

ESTADO	PROGRAMA	
	SLOPE	PLAXIS
Natural	1.497	0.973
1er nivel freático	1.286	0.950
2do nivel freático	0.973	0.753

Fuente: El Autor

Figura 5.11: Gráfica de análisis, talud 3 (Abscisa 0+150)



Fuente: El Autor

- **Comparación entre los métodos de equilibrio límite y elementos finitos**

En lo que se refiere a la metodología de equilibrio límite, los factores de seguridad bajan constantemente con relación a las cargas freáticas de una manera constante. Mientras que por la metodología de elementos finitos hay una pequeña disminución, casi nula del factor de seguridad en el primer tramo analizado.

Las superficies de falla mostradas por el programa de elementos finitos (Plaxis) son semejantes a las que tenemos presentes en el talud, la cual podemos observar en el Anexo 1.4

- **Factor de seguridad presente**

El factor de seguridad que tenemos presente en el talud es de 1.1 para el estado natural, 1.0 para el 1er nivel freático y 0.75 para el 2do nivel freático. Tomando en cuenta las ocurrencias de las diferentes cargas freáticas podemos concluir un factor de seguridad general de 0.75, por ser el más crítico registrado en el análisis, por lo que es necesario proponer una alternativa correctiva que tenga una repercusión económica baja y ayude a la estabilización del talud. En caso de ser necesario utilizar varios métodos de estabilización, realizar un análisis después de la aplicación de cada uno.

5.3.2.2 Talud 4

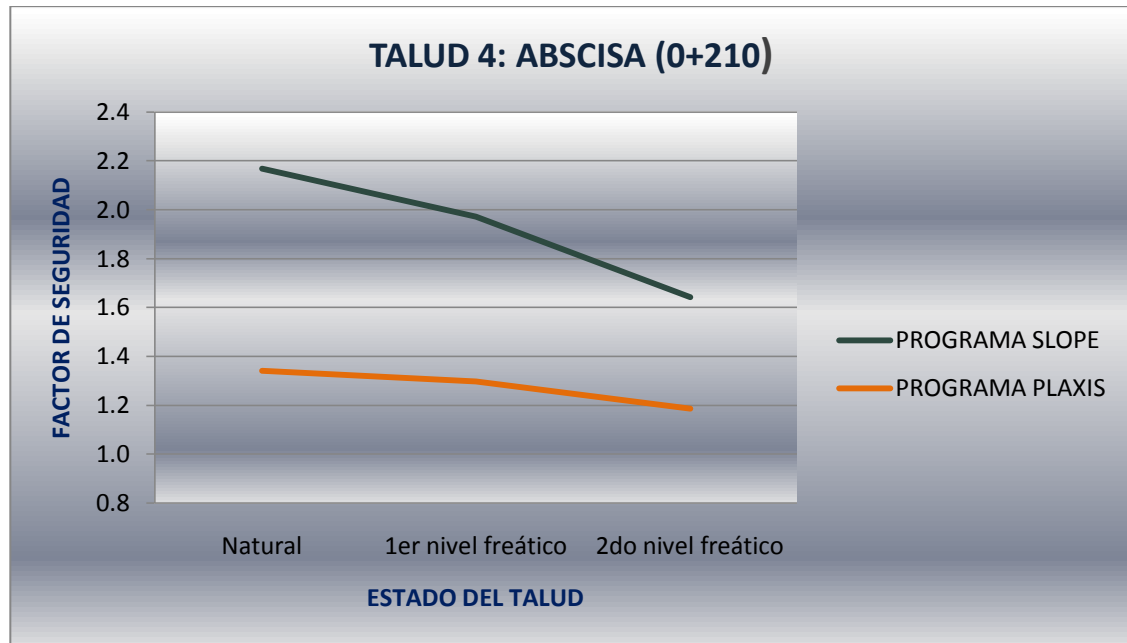
A continuación se presenta los resultados pertenecientes al talud 4, correspondientes a los 2 tipos de metodologías en análisis:

Tabla 5.7: Tabla de resumen de programación, talud 4

ESTADO	PROGRAMA	
	SLOPE	PLAXIS
Natural	2.169	1.341
1er nivel freático	1.972	1.298
2do nivel freático	1.642	1.187

Fuente: El Autor

Figura 5.12: Gráfica de análisis, talud 4 (Abscisa 0+150)



Fuente: El Autor

- **Comparación entre los métodos de equilibrio límite y elementos finitos**

En lo que se refiere a la metodología de equilibrio límite, los factores de seguridad bajan constantemente con relación a las cargas freáticas de una manera constante, asemejándose a una forma lineal. Mientras que por la metodología de elementos finitos hay una pequeña disminución, casi nula del factor de seguridad.

Las superficies de falla mostradas por el programa de elementos finitos (Plaxis) son semejantes a las que tenemos presentes en el talud, la cual podemos observar en el Anexo 1.5

- **Factor de seguridad presente**

El factor de seguridad que tenemos presente en el talud es de 1.5 para el estado natural, 1.4 para el 1er nivel freático y 1.2 para el 2do nivel freático. Tomando en cuenta las ocurrencias de las diferentes cargas freáticas podemos concluir un factor de seguridad general de 1.2, por ser el más crítico registrado en el análisis. Debido a que el factor de seguridad supera el valor de estabilidad (1), no requiere un método de estabilización urgente, pero podemos mejorarlo con la inclusión de una de ellas.

5.3.3 Alternativas correctivas

En la siguiente tabla se muestran los factores críticos presentes en los 4 taludes y sus alternativas de estabilización.

Tabla 5.8: Alternativas de estabilización

Talud	Posición	F.S. crítico	Alternativas de estabilización
Talud 1	Abscisa 0+030	0.90	Reposición de material vegetal en zonas en las que la presencia de material suelto, de lo posible incrustar vegetación con raíces largas que den un mayor soporte al suelo.
Talud 2	Abscisa 0+090	0.75	Perfilar el talud, además utilizar cunetas de coronación u otro sistema de drenaje que ayude a controlar la sobresaturación del suelo. Otra alternativa es la construcción de una obra de retención como un muro.
Talud 3	Abscisa 0+150	0.75	Perfilar el talud, además utilizar cunetas de coronación u otro sistema de drenaje que ayude a controlar la sobresaturación del suelo. Otra alternativa es la construcción de una obra de retención como un muro.
Talud 4	Abscisa 0+210	1.20	El talud se mantiene con un valor estable, pero puede ser más seguro con la reposición de material vegetal en zonas en las que la presencia de material suelto

Fuente: El Autor

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Tomando en cuenta la inclinación promedio de los 4 taludes que se encuentra en un rango de 30° - 45° , su fricción interna es mayor a los 5° , el tipo de falla de los taludes es por círculo de pie.
- Entre las dos metodologías utilizadas en el proyecto, sobresale el método de elementos finitos, ya que sus resultados de superficie de falla son semejantes a los que se presenta actualmente en el talud. Mientras que el método de equilibrio límite sobredimensiona tales superficies, ya que la superficie de falla es propuesta por el modelador.
- La presencia del nivel freático es uno de los factores más importantes en consideración dentro del análisis de estabilidad de taludes ya que influye potencialmente en la reducción del factor de seguridad, especialmente mientras más cerca de la superficie se encuentre.
- En el talud 1 (Abscisa 0+030), el círculo de falla producido por la metodología de equilibrio límite es muy superficial, la cual tiende a ser una falla por cuerpo de talud; mientras que la falla producida por elementos finitos es mas profunda, proporcional a una falla por pie de talud.
- En el talud 2 (Abscisa 0+090), el círculo de falla producido por la metodología de equilibrio límite es profunda, la cual tiende a ser una falla por pie de talud; mientras que la falla producida por elementos finitos es muy crítica, proporcional a una falla por base de talud.
- En el talud 3 (Abscisa 0+150), el círculo de falla producido por la metodología de equilibrio límite es poco profunda, tiende a ser una falla por cuerpo de talud; mientras que la falla producida por elementos finitos es muy profunda afectando los 2 estratos y asemejandose a una falla por base de talud.
- En el talud 4 (Abscisa 0+210), el círculo de falla producido por la metodología de equilibrio límite es muy superficial, tiende a ser una falla por cuerpo de talud; mientras que la falla producida por elementos finitos es muy profunda afectando los 2 estratos y asemejandose a una falla por base de talud.

- El programa Plaxis que realiza el análisis por elementos finitos proporciona una superficie de falla más profunda que los círculos de falla analizados por el programa Slope perteneciente al método de equilibrio límite.

6.2 Recomendaciones

- Al momento de dar solución a la inestabilidad de un talud, es necesario para cualquier obra de estabilización tener en cuenta tres factores primordiales como son: la seguridad, funcionalidad y la economía.
- Para un mejor análisis de estabilidad es necesario realizar una visualización en campo de la geometría y tipo de movimiento de masas para tener criterio al momento de realizar las modelaciones en los diferentes programas
- Construcción de cunetas de coronación u otro sistema de drenaje que ayuden a controlar el exceso de agua y así proteger al cuerpo del talud, las cuales deben tener un mantenimiento adecuado para que cumpla satisfactoriamente y evitar deslizamientos.
- Realizar en lo que sea posible la reposición de material vegetal en zonas en las que la presencia de material suelto, las cuales son focos para posibles deslizamientos por efecto de la erosión. En lo posible plantar vegetación propia de la zona con raíces largas que den un mayor soporte al suelo.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Angeli, Pontoni, & Gasparetto. (1996). *Estructuras de Contención o Anclaje Cap. 14*.
- Barrera V., S., & Campaña Z., J. (2003). *Análisis de estabilidad de presas de relave-práctica chilena*. Cataluña.
- Carvajal, J. C., & Ventura, C. E. (2005). *Modelo de la berma de cortante para análisis de estabilidad a corto plazo en condiciones no drenadas de taludes homogéneos y verticales*.
- Da Costa García, A. (2004). *Inestabilidad por degradación superficial de taludes en suelos, corrección de refuerzos anclados*. Santander.
- F. de Matteis, Á. (2003). *Geología y Geotécnia*. Rosario, Argentina.
- F.B. de Mello, V. (1988). *Adelantos Sugeridos de Estabilidad de pendientes por Escaleras*. Argentina.
- Galera, J. M., & Velasco, P. (2004). *Taludes*. Alicante.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1975). *Mecánica de Suelos Tomo II*. México: Editores Técnicos Asociados, S.A.
- Pita Olalla, E., & Vásquez, J. (2007). *Análisis de Estructuras Bidimensionales mediante programas de estabilidad de taludes*. Madrid.
- Plaza Díaz, O. (2007). *Geología Aplicada*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, F. H. (2000). *Análisis de estabilidad de taludes*. Madrid, España: U.C.M.
- Suárez, J. (2003). *Método para el análisis de estabilidad, Cap4*.
- Tamay Granda, J. (2004). Mapa Geológico preliminar de la hoya de Loja. *Escuela de Geología y Minas UTPL*, 1-3.

- Unidad de Ingeniería Civil Geominera. (2006). *Informe de Ingeniería, Tambo Blanco*. Anexo A.2 y Anexo A.3
- Vargas Delgado, M. (2008). *Ingeniería de Fundaciones*. Bogota, Colombia.
- Zuloaga Fábrega, I. (2009). *Casos prácticos de aplicación del método de los elementos finitos en la reducción del riesgo geotécnico*. Madrid.

ANEXOS

A.1.- Material Fotográfico



Figura A.1.1: Talud Chirimoyo, parte izquierda

Fuente: El Autor



Figura A.1.2: Talud Chirimoyo, parte derecha

Fuente: El Autor



Figura A.1.3: Vista frontal del talud 1 y talud 2

Fuente: El Autor

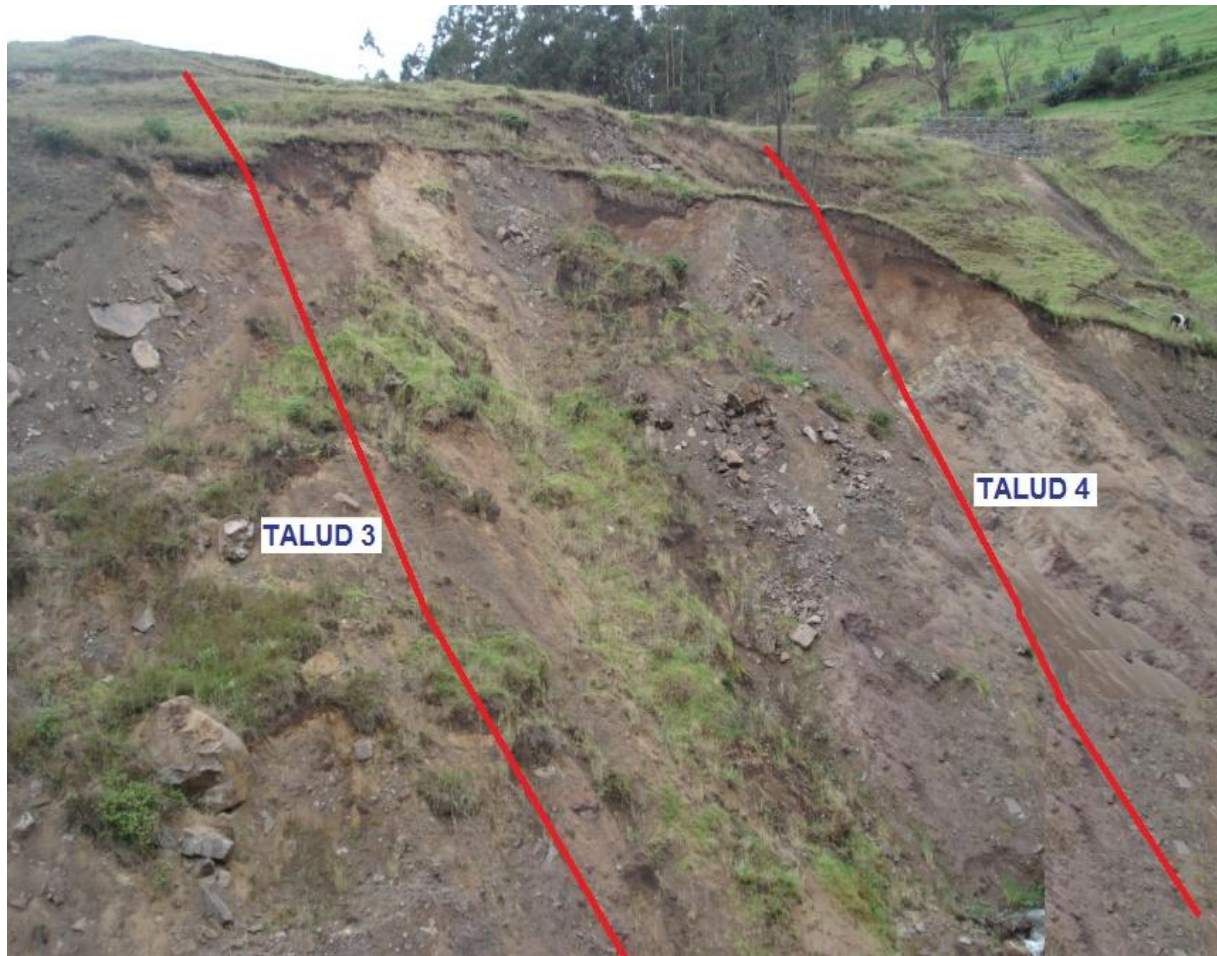


Figura A.1.4: Vista frontal del talud 3 y talud 4

Fuente: El Autor



Figura A.1.5: Morfología del terreno

Fuente: El Autor

A.2.- Datos Topográficos

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Anexo 2.1 Coordenadas del levantamiento topográfico del área de estudio

Punto	x	y	z
1	2000.000	2000.000	2200.000
2	2009.593	2000.000	2199.924
3	1968.542	2125.949	2201.035
4	1954.886	2124.691	2205.870
5	1952.649	2124.406	2206.704
6	1944.105	2128.075	2209.803
7	1934.296	2131.543	2211.427
8	1928.490	2130.683	2212.506
9	1912.846	2124.985	2216.916
10	1975.735	2103.565	2199.186
11	1912.865	2125.015	2216.907
12	1962.765	2111.159	2200.795
13	1905.403	2120.669	2218.713
14	1949.550	2119.270	2206.469
15	1948.441	2119.336	2207.116
16	1905.829	2110.760	2219.228
17	1944.442	2109.274	2207.310
18	1945.039	2108.982	2206.717
19	1921.100	2116.092	2214.644
20	1951.853	2102.886	2203.951
21	1933.511	2114.291	2211.408
22	1961.143	2099.046	2200.264
23	1939.632	2106.189	2209.005
24	1974.026	2089.596	2198.845
25	1937.408	2098.602	2210.072
26	1959.982	2091.217	2201.047
27	1924.187	2097.518	2214.380
28	1954.542	2095.198	2202.042
29	1950.408	2093.253	2205.184
30	1904.843	2091.634	2220.687
31	1938.693	2091.767	2209.399
32	1917.480	2088.724	2217.627
33	1931.983	2080.861	2213.812
34	1930.203	2084.341	2214.725
35	1942.398	2075.027	2208.942
36	1926.262	2078.649	2216.125
37	1958.238	2078.387	2202.402
38	1924.590	2077.618	2217.246
39	1967.944	2058.633	2201.159

Sigue.....

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Anexo 2.1 Coordenadas del levantamiento topográfico del área de estudio

	Punto	x	y	z
.....Viene	40	1906.398	2078.603	2221.674
	41	1941.609	2066.514	2209.304
	42	1904.888	2068.976	2222.785
	43	1926.371	2059.890	2216.566
	44	1917.175	2068.637	2219.870
	45	1935.961	2050.565	2212.741
	46	1909.530	2057.729	2222.164
	47	1961.768	2041.688	2203.777
	48	1908.980	2046.603	2223.004
	49	1942.477	2033.827	2209.984
	50	1906.420	2043.878	2226.028
	51	1940.646	2034.410	2211.126
	52	1911.960	2031.897	2225.837
	53	1924.531	2047.011	2216.697
	54	1918.926	2021.804	2224.386
	55	1916.941	2032.409	2220.640
	56	1923.777	2012.581	2222.959
	57	1928.956	2021.700	2215.928
	58	1925.614	2008.470	2221.916
	59	1938.597	2025.004	2212.603
	60	1912.089	2005.311	2226.143
	61	1948.859	2016.602	2211.358
	62	1909.801	1989.495	2227.819
	63	1935.004	2006.655	2215.975
	64	1923.293	1991.885	2224.203
	65	1933.491	1989.183	2220.053
	66	1928.584	1993.207	2222.017
	67	1943.905	1997.559	2215.061
	68	1930.458	1983.119	2223.440
	69	1950.186	1978.214	2214.907
	70	1917.845	1971.487	2226.353
	71	1943.500	1977.193	2218.246
	72	1922.322	1960.684	2224.882
	73	1943.482	1977.200	2218.232
	74	1931.634	1960.055	2222.222
	75	1952.603	1969.326	2213.893
	76	1943.840	1964.680	2219.371
	77	1948.014	1966.775	2214.728
	78	1932.350	1950.069	2222.195

Sigue.....

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Anexo 2.1 Coordenadas del levantamiento topográfico del área de estudio

.....Viene	Punto	x	y	z
	79	1941.562	1955.933	2216.333
	80	1920.003	1946.694	2225.573
	81	1939.453	1938.777	2216.001
	82	1915.368	1933.551	2227.134
	83	1939.080	1926.622	2217.544
	84	1928.672	1937.481	2224.422
	85	1950.190	1936.135	2211.613
	86	1954.207	1942.341	2208.780
	87	1933.828	1932.204	2221.167
	88	1963.650	1954.092	2207.744
	89	1930.323	1921.413	2224.129
	90	1954.238	1931.984	2210.224
	91	1927.840	1910.300	2224.675
	92	1954.234	1932.003	2210.212
	93	1948.558	1918.060	2211.185
	94	1912.884	1913.250	2230.556
	95	1936.766	1912.315	2218.566
	96	1921.789	1907.550	2230.087
	97	1936.829	1921.380	2218.876
	98	1928.708	1897.361	2229.803
	99	1939.554	1903.899	2221.419
	100	1934.702	1898.038	2227.397
	101	1947.716	1908.815	2216.234
	102	1942.264	1901.230	2223.314
	103	1947.593	1905.076	2219.963
	104	1960.761	1932.907	2206.025
	105	1963.477	1946.208	2206.937
	106	1968.210	1928.705	2200.465
	107	1965.831	1940.715	2203.830
	108	1974.893	1945.060	2194.501
	109	1976.206	1951.344	2193.513
	110	1978.328	1957.751	2192.513
	111	1980.170	1966.976	2191.717
	112	1977.828	1973.341	2190.759
	113	1981.472	1980.520	2188.873
	114	1983.609	1991.146	2187.494
	115	1981.298	1998.753	2186.254
	116	1983.582	2006.841	2185.249
	117	1987.311	2011.931	2184.534

Sigue.....

Anexo 2.1 Coordenadas del levantamiento topográfico del área de estudio

.....Viene	Punto	x	y	z
	118	1986.200	2021.515	2182.808
	119	1986.505	2028.375	2182.467
	120	1988.658	2037.646	2181.353
	121	1988.104	2050.135	2179.357
	122	1991.575	2061.307	2178.003
	123	1996.759	2072.229	2179.742
	124	1992.523	2087.211	2181.935

A.3.- Planos

A. 4.- Resultados de Corridas

A.4.1- SLOPE

Anexo 4.1.1. - Perfil 1 (Abscisa 0+030), estado natural

Number of Slices: 25

Optimization Tolerance: 0.01

Minimum Slip Surface Depth: 0.1 m

Optimization Maximum Iterations: 2000

Optimization Convergence Tolerance: 1e-007

Starting Optimization Points: 8

Ending Optimization Points: 16

Complete Passes per Insertion: 1

Driving Side Maximum Convex Angle: 5 °

Resisting Side Maximum Convex Angle: 1 °

Materials

SC

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 17.7 kN/m³

Cohesion: 15 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

SM

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 16.1 kN/m³

Cohesion: 25 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

ROCA

Model: Bedrock (Impenetrable)

Slip Surface Grid

Upper Left: (7, 2235) m

Lower Left: (7, 2228) m

Lower Right: (35, 2228) m

Grid Horizontal Increment: 6

Grid Vertical Increment: 4

Left Projection Angle: 0 °

Right Projection Angle: 0 °

Slip Surface Radius

Upper Left Coordinate: (22.5, 2206.5) m

Upper Right Coordinate: (35, 2214.5) m

Lower Left Coordinate: (22.5, 2204) m

Lower Right Coordinate: (35, 2212) m

Number of Increments: 2

Left Projection: No

Left Projection Angle: 135 °

Right Projection: No

Right Projection Angle: 45 °

UsePoints: 0

Slip Surface Limits

Left Coordinate: (0, 2204.123) m

Right Coordinate: (47.5, 2228.367) m

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Critical Slip Surfaces

Slip Surface	FOS	Center (m)	Radius (m)	Entry (m)	Exit (m)
1 89	1.488	(11.667, 2235)	30.897	(41.3669, 2226.48)	(3.20491, 2205.28)

Slices of Slip Surface: 89

Slip Surface	X (m)	Y (m)	PWP (kPa)	Base Normal Stress (kPa)	Frictional Strength (kPa)	Cohesive Strength (kPa)
1 89	4.1024525	2205.057	0	19.736547	7.9740827	15
2 89	5.859671	2204.6655	0	52.620214	21.259947	15
3 89	7.109671	2204.443	0	77.630371	31.364706	25
4 89	8.125	2204.313	0	94.659687	38.244996	25
5 89	9.375	2204.1945	0	114.31612	46.186711	25
6 89	10.27311	2204.1355	0	127.08231	51.344588	25
7 89	11.52311	2204.123	0	140.99811	56.966936	25
8 89	12.64356	2204.123	0	156.79953	63.351124	25
9 89	13.89356	2204.203	0	159.97952	64.635921	25
10 89	15.625	2204.364	0	166.51989	67.278401	25
11 89	16.875	2204.5515	0	168.04728	67.895509	25
12 89	18.125	2204.792	0	167.44781	67.653308	25
13 89	19.375	2205.087	0	165.05595	66.686933	25
14 89	20.625	2205.437	0	161.77563	65.361596	25
15 89	21.875	2205.845	0	157.8513	63.776066	25
16 89	23.125	2206.3135	0	153.79301	62.136408	25
17 89	24.375	2206.8455	0	149.755	60.504948	25
18 89	25.625	2207.4445	0	146.11522	59.034379	25
19 89	26.875	2208.1145	0	142.93971	57.75139	25
20 89	28.125	2208.8615	0	138.76008	56.062709	25
21 89	29.375	2209.6925	0	133.68991	54.01423	25
22 89	30.625	2210.616	0	128.18416	51.789761	25
23 89	31.875	2211.6425	0	122.19197	49.368759	25
24 89	33.125	2212.7865	0	112.23904	45.347517	25
25 89	34.375	2214.0685	0	98.241798	39.692263	25
26 89	35.625	2215.5155	0	83.554043	33.758024	25
27 89	36.875	2217.1675	0	67.46839	27.258999	25
28 89	38.11528	2219.0725	0	49.075403	19.82775	25
29 89	39.36528	2221.3855	0	26.116575	10.551781	25
30 89	40.68345	2224.58	0	1.3114416	0.5298568	15

Anexo 4.1.2. - Perfil 2 (Abscisa 0+090), estado natural

Number of Slices: 25

Optimization Tolerance: 0.01

Minimum Slip Surface Depth: 0.1 m

Optimization Maximum Iterations: 2000

Optimization Convergence Tolerance: 1e-007

Starting Optimization Points: 8

Ending Optimization Points: 16

Complete Passes per Insertion: 1

Driving Side Maximum Convex Angle: 5 °

Resisting Side Maximum Convex Angle: 1 °

Materials

SC

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 18 kN/m³

Cohesion: 15 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

Arena Arcillosa

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 16.1 kN/m³

Cohesion: 25 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

ROCA

Model: Bedrock (Impenetrable)

Slip Surface Grid

Upper Left: (15, 2238) m

Lower Left: (15, 2229) m

Lower Right: (43, 2229) m

Grid Horizontal Increment: 6

Grid Vertical Increment: 4

Left Projection Angle: 0 °

Right Projection Angle: 0 °

Slip Surface Radius

Upper Left Coordinate: (35, 2193) m

Upper Right Coordinate: (52.5, 2203) m

Lower Left Coordinate: (35, 2189) m

Lower Right Coordinate: (52.5, 2199) m

Number of Increments: 2

Left Projection: No

Left Projection Angle: 135 °

Right Projection: No

Right Projection Angle: 45 °

UsePoints: 0

Slip Surface Limits

Left Coordinate: (0, 2188.546) m

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Right Coordinate: (70, 2227.409) m

Critical Slip Surfaces

Slip Surface	FOS	Center (m)	Radius (m)	Entry (m)	Exit (m)
1 85	1.264	(15, 2238)	48.994	(62.3488, 2225.41)	(2.49518, 2190.63)

Slices of Slip Surface: 85

Slip Surface	X (m)	Y (m)	PWP (kPa)	Base Normal Stress (kPa)	Frictional Strength (kPa)	Cohesive Strength (kPa)
1 85	2.497589	2190.6285	0	3.473795	1.4035043	15
2 85	3.75	2190.333	0	31.478388	12.718094	15
3 85	6.25	2189.811	0	88.512711	35.761457	15
4 85	8.1521035	2189.492	0	131.9148	53.29704	15
5 85	9.4021035	2189.331	0	161.70451	65.332863	25
6 85	11.25	2189.166	0	198.51557	80.205497	25
7 85	13.75	2189.038	0	243.90049	98.542194	25
8 85	16.25	2189.038	0	279.29295	112.84168	25
9 85	18.75	2189.166	0	302.72478	122.30875	25
10 85	21.25	2189.423	0	317.12996	128.12882	25
11 85	23.75	2189.811	0	325.90703	131.67499	25
12 85	26.25	2190.333	0	329.53463	133.14063	25
13 85	28.75	2190.9935	0	327.45064	132.29865	25
14 85	31.25	2191.7985	0	321.24498	129.7914	25
15 85	33.75	2192.756	0	309.75767	125.15022	25
16 85	36.25	2193.876	0	291.44964	117.7533	25
17 85	38.75	2195.1715	0	268.74111	108.57846	25
18 85	41.25	2196.6585	0	244.52772	98.795613	25
19 85	43.75	2198.3585	0	220.65392	89.149973	25
20 85	46.25	2200.3015	0	200.27069	80.914611	25
21 85	48.75	2202.527	0	182.22806	73.624913	25
22 85	51.25	2205.093	0	162.76803	65.762554	25
23 85	53.75	2208.0895	0	136.17151	55.01686	25
24 85	56.25	2211.667	0	100.90753	40.769288	25
25 85	58.75	2216.125	0	57.429093	23.20286	25
26 85	60.55742	2220.039	0	19.655244	7.9412339	25
27 85	61.7318	2223.432	0	-2.1804971	-0.880978	15

Anexo 4.1.3. - Perfil 3 (Abscisa 0+150), estado natural

Number of Slices: 25

Optimization Tolerance: 0.01

Minimum Slip Surface Depth: 0.1 m

Optimization Maximum Iterations: 2000

Optimization Convergence Tolerance: 1e-007

Starting Optimization Points: 8

Ending Optimization Points: 16

Complete Passes per Insertion: 1

Driving Side Maximum Convex Angle: 5 °

Resisting Side Maximum Convex Angle: 1 °

Materials

SW (Arena Arcillosa)

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 18 kN/m³

Cohesion: 20 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

SM (Arena Limosa)

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 16.1 kN/m³

Cohesion: 25 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

Roca

Model: Bedrock (Impenetrable)

Slip Surface Grid

Upper Left: (15, 2232) m

Lower Left: (15, 2223) m

Lower Right: (50, 2223) m

Grid Horizontal Increment: 6

Grid Vertical Increment: 4

Left Projection Angle: 0 °

Right Projection Angle: 0 °

Slip Surface Radius

Upper Left Coordinate: (45, 2185) m

Upper Right Coordinate: (65, 2196.5) m

Lower Left Coordinate: (45, 2181) m

Lower Right Coordinate: (65, 2192.5) m

Number of Increments: 2

Left Projection Angle: 135 °

Right Projection: No

Right Projection Angle: 45 °

Slip Surface Limits

Left Coordinate: (0, 2180.267) m

Right Coordinate: (80, 2224.199) m

Critical Slip Surfaces

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Slip Surface	FOS	Center (m)	Radius (m)	Entry (m)	Exit (m)
1 88		1.500 (20.833, 2232)	52.791	(72.2984, 2220.24)	(2.61332, 2182.45)

Slices of Slip Surface: 88

Slip Surface	X (m)	Y (m)	PWP (kPa)	Base Normal Stress (kPa)	Frictional Strength (kPa)	Cohesive Strength (kPa)
1 88	3.8066595	2182.046	0	35.51204	14.347796	20
2 88	6.25	2181.28	0	98.147571	39.654193	20
3 88	8.75	2180.627	0	162.2446	65.551075	20
4 88	10.034985	2180.3255	0	194.79064	78.700528	20
5 88	10.193695	2180.2925	0	199.91901	80.772525	25
6 88	11.488065	2180.267	0	201.04293	81.226616	25
7 88	13.829355	2180.267	0	242.96424	98.163927	25
8 88	16.25	2180.267	0	288.436	116.53571	25
9 88	18.75	2180.267	0	337.192	136.23441	25
10 88	21.25	2180.267	0	387.876	156.71208	25
11 88	23.75	2180.267	0	439.96	177.75538	25
12 88	26.25	2180.267	0	478.12	193.17302	25
13 88	28.75	2180.267	0	497.48	200.99497	25
14 88	30.674625	2180.267	0	508.11267	205.29084	25
15 88	31.924625	2180.3905	0	429.31932	173.45626	25
16 88	33.75	2180.8295	0	415.52595	167.88338	25
17 88	36.25	2181.527	0	394.33501	159.32169	25
18 88	38.75	2182.36	0	371.11854	149.94162	25
19 88	41.25	2183.3355	0	347.31582	140.3247	25
20 88	43.75	2184.4625	0	323.4418	130.67897	25
21 88	46.25	2185.752	0	300.3503	121.3494	25
22 88	48.75	2187.2185	0	278.11279	112.36486	25
23 88	51.25	2188.8795	0	256.89485	103.79226	25
24 88	53.75	2190.759	0	236.42565	95.522163	25
25 88	56.25	2192.8885	0	214.95407	86.847081	25
26 88	58.75	2195.312	0	191.9231	77.541967	25
27 88	61.25	2198.094	0	167.62129	67.723397	25
28 88	63.75	2201.3335	0	140.56925	56.793663	25
29 88	66.25	2205.2015	0	107.88008	43.586381	25
30 88	68.75	2210.0485	0	64.971543	26.250207	25
31 88	70.269205	2213.496	0	33.802331	13.657028	25
32 88	71.41839	2217.229	0	1.3264945	0.53593858	20

Anexo 4.1.4. - Perfil 4 (Abscisa 0+210), estado natural

Number of Slices: 25

Optimization Tolerance: 0.01

Minimum Slip Surface Depth: 0.1 m

Optimization Maximum Iterations: 2000

Optimization Convergence Tolerance: 1e-007

Starting Optimization Points: 8

Ending Optimization Points: 16

Complete Passes per Insertion: 1

Driving Side Maximum Convex Angle: 5 °

Resisting Side Maximum Convex Angle: 1 °

Materials

SC

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 18 kN/m³

Cohesion: 15 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

SM

Model: Mohr-Coulomb

Unit Weight: 16.1 kN/m³

Cohesion: 25 kPa

Phi: 22 °

Phi-B: 0 °

Roca

Model: Bedrock (Impenetrable)

Slip Surface Grid

Upper Left: (17.5, 2236) m

Lower Left: (17.5, 2220) m

Lower Right: (60, 2220) m

Grid Horizontal Increment: 6

Grid Vertical Increment: 4

Left Projection Angle: 0 °

Right Projection Angle: 0 °

Slip Surface Radius

Upper Left Coordinate: (30, 2194) m

Upper Right Coordinate: (52, 2201) m

Lower Left Coordinate: (30, 2192) m

Lower Right Coordinate: (52, 2199) m

Number of Increments: 2

Left Projection: No

Left Projection Angle: 135 °

Right Projection: No

Right Projection Angle: 45 °

UsePoints: 0

Slip Surface Limits

Left Coordinate: (0, 2190.909) m

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Right Coordinate: (75, 2219.401) m

Critical Slip Surfaces

Slip Surface	FOS	Center (m)	Radius (m)	Entry (m)	Exit (m)
1	87	2.166 (17.5, 2236)	45.719	(57.7445, 2214.31)	(1.61146, 2193.13)

Slices of Slip Surface: 87

Slip Surface	X (m)	Y (m)	PWP (kPa)	Base Normal Stress (kPa)	Frictional Strength (kPa)	Cohesive Strength (kPa)	
1	87	2.0557305	2192.9715	0	17.889057	7.2276483	15
2	87	3.75	2192.4175	0	76.048934	30.725764	15
3	87	6.25	2191.7055	0	143.41852	57.944843	15
4	87	8.75	2191.1485	0	175.56693	70.933643	25
5	87	11.25	2190.909	0	170.94	69.064243	25
6	87	13.75	2190.909	0	174.28	70.413691	25
7	87	16.25	2190.909	0	178.496	72.117065	25
8	87	18.75	2190.909	0	184.436	74.516981	25
9	87	21.25	2190.909	0	195.82	79.116416	25
10	87	23.75	2190.909	0	211.668	85.519423	25
11	87	26.2626	2191.1515	0	196.67566	79.462126	25
12	87	28.7626	2191.7085	0	191.66598	77.438082	25
13	87	31.25	2192.4175	0	185.21669	74.832401	25
14	87	33.75	2193.2875	0	177.44398	71.692022	25
15	87	36.25	2194.3255	0	168.87134	68.228449	25
16	87	38.75	2195.5445	0	159.69398	64.520557	25
17	87	41.25	2196.9615	0	148.43307	59.970854	25
18	87	43.75	2198.5995	0	135.03559	54.557918	25
19	87	46.25	2200.489	0	119.92754	48.453871	25
20	87	48.75	2202.673	0	102.44167	41.389121	25
21	87	50.96559	2204.8835	0	84.088489	33.973955	25
22	87	52.896775	2207.1045	0	64.384365	26.012972	25
23	87	54.431185	2209.067	0	50.005335	20.203467	15
24	87	56.372275	2212.077	0	16.270622	6.5737581	15

A.4.2- PLAXIS

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Anexo 4.2.1. - Perfil 1 (Abscisa 0+030), estado natural

Table [1] List of phases

Phase	Ph-No.	Start phase	Calculation type	Load input	First step	Last step
Initial phase	0	0		-	0	0
FS	1	0	Phi/c reduction	Incremental multipliers	1	100

Table [2] Staged construction info

Ph-No.	Active clusters	Inactive clusters	Active beams	Active geotextiles	Active anchors
0	1, 2, 3.				

Table [3] Control parameters 1

Ph-No.	Additional steps	Reset displacements to zero	Ignore undrained behaviour	Delete intermediate steps
1	100	No	No	No

Table [4] Control parameters 2

Ph-No.	Iterative procedure	Tolerated error	Over relaxation	Max. iterations	Desired min.	Desired max.	Arc-Length control
1	Standard	0.010	1.200	60	6	15	Yes

Table [5] Incremental multipliers (input values)

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000

Table [6] Total multipliers - input values

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.3350

Table [7] Total multipliers - reached values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.3350

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Table [6] Total multipliers - input values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.8952

Table [7] Total multipliers - reached values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.8952

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Table [6] Total multipliers - input values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.9730

Table [7] Total multipliers - reached values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.9730

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Table [6] Total multipliers - input values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.3405

Table [7] Total multipliers - reached values

Ph-No.	Displ.	Load A	Load B	Weight	Accel	Time	s-f
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.3405