



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ingeniería Civil y Geomática

**ANÁLISIS DE TALUDES POR EL
MÉTODO DE BISHOP**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Domínguez Grajales Martín de Jesús

DIRECTOR(A) DE TESIS

M.I. Agustín Deméneghi Colina



Ciudad Universitaria, Cd. Mx, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a dios porque sin su apoyo y amor desde lo más básico que puedo necesitar como humano hasta lo más grandioso como es el amor de mis seres queridos. Sin él no hubiese dado cada paso que he dado.

A mis abuelos, Arnulfa, Alberto y Oralia, ya que con su apoyo y su ejemplo han hecho, que día a con día, no solo intenten ser un mejor profesionista sino un mejor ser humano.

Agradezco a mi madre, Norma, que con su amor, paciencia y constante apoyo ha logrado cada éxito de mí vida. Cada día que se despertaba antes de mí para poder ofrecerme los alimentos antes de irme a la escuela, cada vez que tenía una derrota y me enseñaba que de eso tenía que aprender y volverme más fuerte, por eso y más mi madre es mi gran héroe y le agradezco por todo el apoyo brindado.

A mi padre, Gustavo, que a través de sus experiencias me ha enseñado de lo bueno y lo malo de muchos aspectos de la vida, por enseñarme el valor de la honestidad y de la responsabilidad.

A mi hermano, Emmanuel, quién es mi motivación para poder seguir aprendiendo y superándome cada día más, es ese motor que toda persona necesita y que soy un privilegiado en que sea mi hermano.

A mi novia, Luz, que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas en las diferentes etapas de mi vida, por su amor y apoyo incondicional, por ser quién me acompañó a lo largo de toda mi etapa de la universidad y me apoyo para esforzarme y ser cada día mejor.

A mi mejor amigo, Borrego, quién le prometí que le haría una dedicatoria especial en mi tesis por enseñarme el valor del esfuerzo, de no rendirme, aunque a veces las cosas pueden parecer

difíciles e imposibles de hacer, por recordarme que el trabajo constante da frutos, por sus consejos y por cada una de las experiencias que tuvimos juntos en este tiempo que lo conozco. A mi amigo, Cisniega, quién siempre estuvo conmigo para apoyarme, para estudiar juntos, para enojarnos y también para divertirnos juntos en el deporte como en las pláticas que hemos tenido, por todos sus conocimientos, aunque a veces errados pero que nos daba la oportunidad de reír y aprender.

A mi asesor de tesis, el Ing. Agustín Deméneghi, quién con sus conocimientos, apoyo y experiencia me apoyo en la realización de esta presente tesis, por sus consejos y por la orientación que siempre me dio, además de la paciencia que tuvo conmigo.

A la UNAM, y en especial a la Facultad de Ingeniería por todo lo que me enseñó no solo en conocimientos para poder ejercer mi profesión sino también en los valores que me transmitió para ser un buen ser humano, con ética, responsabilidad y empatía; y con esto poder ejercer mi profesión de la mejor manera.

Gracias infinitas a cada persona que ha estado conmigo pues han sido tantas que sería complicado ponerlas a todas, por su apoyo siempre incondicional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....	3
I.I. Definición de un talud.	3
I.II. Tipos de fallas en un talud.	5
I.III. Factor de seguridad en un talud.....	9
I.IV. Métodos de análisis para estabilidad de taludes.....	10
I.IV. I. Método de Janbú.	10
I.IV. II. Método de Bishop y Morgenstern.	13
I.IV. III. Método simplificado del Ing. Deméneghi.	15
I.IV. IV.Método de Fellenius.	16
CAPÍTULO II. MÉTODO BISHOP.....	20
II.I Análisis de la metodología de Bishop.	22
CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL ANÁLISIS DE UN TALUD.	27
III.I. Métodos de análisis.	27
III.II. Variables.....	32
III.III. Interfaz del programa y cada una de sus partes.	37
CAPÍTULO IV. EJEMPLOS Y COMPARACIONES ENTRE LOS MÉTODOS COMUNES PARA ANÁLISIS DE TALUDES.	46
IV.I. Ejemplo del nuevo método, utilizando suelos heterogéneos.....	46
IV.II. Ejemplo comparativo con los otros métodos.	50
IV.II. I. Método de Janbú.	50

IV.II. II.Método de Bishop y Morgenstern.	51
IV.II. III. Método simplificado del Ingeniero Agustín Deméneghi.	51
IV. II. IV. Método programado en Excel por Domínguez Martín.....	52
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.	56

FIGURAS

1.1 Partes de un talud.....	4
1.2 Falla por traslación	6
1.3 Falla rotacional.	7
1.4 Falla por volteo.....	7
1.5 Fallo del talud, en la Ciudad de Caldera, Chile. Junio 2015.....	9
1.6 Centro y superficie de falla crítica. Janbu, 1954.	12
1.7 Superficie supuesta de falla, Agustín Deméneghi.....	15
1.8 Diagrama de fuerzas.....	17
2.1 Dovelas del método de Bishop.....	21
2.2 Diagrama de cuerpo libre de una dovela. Deméneghi C., (2006).....	24
3.1 Cálculo de la sobrecarga.	29
3.2 Talud con suelo heterogéneo (4 estratos)	32
3.3 Círculo crítico	33
3.4 Software Excel.....	34
3.5 Coordenadas del talud.	39
3.6 Sobrecarga casi nula.....	39
3.7 Ley de cosenos.....	41

4.1 Geometría del talud.	47
4.2 Ejemplo talud homogéneo.	50

TABLAS

Tabla 1.1 Coeficientes de estabilidad para esfuerzo efectivo.....	14
Tabla 1.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes	18
Tabla 3.1 Tabla de variables a introducir.....	36
Tabla 3.2 Características de cada estrato.....	44
Tabla 3.3 Ejemplo de tabla resumen.....	45
Tabla 4.1 Características de diferentes tobas.....	47
Tabla 4.2 Resumen de estrato 1.....	48
Tabla 4.3 Resumen de estrato 2.....	48
Tabla 4.4 Resumen de estrato 3.....	48
Tabla 4.5 Resumen de estrato 4.....	49
Tabla 4.6 Resumen de resumen de 4 estratos.....	49
Tabla 4.7 Datos del estrato del talud homogéneo	52
Tabla 4.8 Resultados de talud homogéneo.....	53
Tabla 4.9 Resumen de análisis de talud homogéneo.....	54
Tabla 4.10 Resumen de resultados de diferentes métodos para un talud homogéneo.....	54

INTRODUCCIÓN

La presente tesis tiene como objetivo principal facilitar y agilizar el cálculo del factor de seguridad de un talud heterogéneo, esto con ayuda de un programa digitalizado y programado en el software “Excel”. Para llegar a este valor, se utilizará el método de Bishop, para suelos cohesivos-friccionantes. Lo que se intentó hacer es utilizar un método muy complejo y detallado como es el “Método de Bishop” y posteriormente programarlo en Excel, de tal manera que sea de utilidad en la práctica profesional, ya que el programa está diseñado para únicamente pedir datos básicos relacionadas al talud, como las características intrínsecas y extrínsecas relacionadas al suelo, y de esta manera calcular el factor de seguridad.

En el capítulo I se presenta una breve explicación de la utilidad que tiene el deducir el factor de seguridad de un talud para la práctica profesional de un ingeniero. Así mismo se mencionan los métodos tradicionales y convencionales de la vida laboral, y su impacto en el buen desarrollo constructivo. Por último, se hará un análisis de las consideraciones de cada uno de los métodos vistos, como el hecho de considerar el sismo y la zona en la que se encuentra ubicado dicho talud.

En el capítulo II se presentará y expondrá con detalle el método de Bishop para suelos cohesivos-friccionantes, el cual considera un arco de circunferencia como la posible falla de un talud, dividiendo a este arco en dovelas para su correcto análisis. Además, se explicará cómo el método introduce la fuerza sísmica horizontal y vertical dentro de su análisis.

Por su parte en el capítulo III se desarrollará el punto principal por el cual fue realizada el presente trabajo de tesis, ya que es aquí donde se explicará a detalle el procedimiento numérico que se llevó a cabo en el software EXCEL y que dio como resultado un programa capaz de analizar un talud de suelo heterogéneo, específicamente se consideraron 4 estratos; un suelo

cohesivo friccionante, que considera la fuerza sísmica dependiendo la ubicación geográfica del talud y que finalmente arroja un factor de seguridad de manera sencilla y práctica, ya que sólo necesita de datos básicos que el usuario debe introducir al programa.

En el capítulo IV se harán comparaciones entre los métodos existentes y el método que se propone, el cual como ya se ha mencionado se apoya en un software para mayor precisión y sobre todo para mayor facilidad. Cabe resaltar que muchos de los ejemplos que se mostrarán serán para suelos homogéneos ya que los métodos tradicionales no consideran un suelo heterogéneo. Posteriormente se demostrará el potencial de dicho programa con ejemplos de taludes no homogéneos; llegando aquí a la parte más elemental de esta tesis y por lo cual se ha hecho este trabajo arduo de investigación.

Finalmente, en el capítulo V se hará un resumen de lo visto a lo largo de la tesis, así mismo se revisará si se cumplieron los objetivos de la misma y por último se explicarán las ventajas y las aplicaciones que este programa tiene en comparación de un método convencional, y así mismo se evidenciará las limitaciones y alcances que puede tener el método propuesto. El contenido de este trabajo intenta demostrar situaciones reales y soluciones prácticas, que se apoyan en elementos básicos como lo es la tecnología para de esta forma dar resultados con mayor precisión y por consecuencia más confiables.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

En este capítulo se define lo que es un talud y sus características. Para posteriormente poder explicar las fallas que se pueden presentar en algunos de ellos y las causas que lo originan. Después se explicará qué es el factor de seguridad en un talud. Una vez teniendo estas bases se procederá a presentar diversos métodos de análisis de un talud, lo que en el lenguaje tradicional de la ingeniería se conoce como Estabilidad de taludes. Y finalmente se dará detalles de las consideraciones que tiene cada uno de los métodos dentro de su análisis para encontrar el factor de seguridad de un talud.

I.I. Definición de un talud.

Existen muchas definiciones para describir y detallar que es de manera física un talud, sin embargo, si tomamos como referencia la tesis de la ingeniera Castañón G. (2011) donde define de manera breve a un talud, “como una masa de suelo con una superficie externa inclinada con respecto a la horizontal. Cuando el talud se forma de manera natural, sin la intervención del hombre, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando la inclinación en la masa de suelo es generada por la intervención de la actividad humana, excavaciones o rellenos, se denomina talud”.

Dejando entre ver que no toda masa con cierta inclinación se puede considerar como un talud, y por el contrario sí podemos aseverar que el nombre depende de la participación que tenga o no el hombre en su realización.

Un talud se compone al menos de las siguientes partes:

- *La cabeza o cima, que es donde hay un cambio muy marcado en la pendiente del talud.
- *El pie o la base del talud.
- *La pendiente, que de manera sencilla es la inclinación que hay entre la cabeza o cima y la base del talud.

*La altura misma del talud, que es la distancia en vertical de la cima a la base.

*Y finalmente muchas variantes que pueden estar o no presente dependiendo de las condiciones del talud, tal como: la altura del nivel freático, la sobrecarga que se considerará, las características propias del suelo que compone al talud, etc. Ahora bien, el hecho de conocer cada uno de los componentes de un talud y además de estudiar la estabilidad de los mismos, radica su importancia en tratar de predecir una posible falla en procesos como excavaciones y rellenos. Por lo que un correcto análisis ofrece mayor confiabilidad en los procesos constructivos y en muchos casos un ahorro económico.

Es importante resaltar que todos los métodos de análisis son empíricos por lo que siempre hay un grado de incertidumbre en el resultado final, ya que hay muchos parámetros que suelen ser muy variables e introducirlos a una fórmula sería complicado, tal y como la capacidad de resistencia a esfuerzos cortantes en un talud a lo largo del tiempo.



Figura 1.1 Partes de un talud

I.II. Tipos de fallas en un talud.

Una vez explicado qué es un talud y las partes principales que lo componen, es momento de explicar un poco el motivo de análisis y estudio de un talud, ya que de otra manera no tendría relevancia dedicar tiempo en investigaciones y en experimentaciones a este tema.

Como ya se ha comentado con anterioridad, los suelos suelen ser difíciles de analizar ya que sufren cambios constantemente y por lo tanto nada en su estructura es constante con el tiempo, ya sea por motivos naturales o por modificaciones que el hombre genera a su paso, y provoca cambios drásticos en los espacios en los que se encuentra. Este último el más importante en el ámbito de la ingeniería civil, ya que las constantes alteraciones a los espacios naturales y en su caso a los generados de manera artificial, provocan la necesidad de estudiar las consecuencias de esas acciones. En este caso concretamente hablamos sobre la “Estabilidad de los taludes”, ya que es un tema de suma importancia dentro de las necesidades constructivas de la ingeniería, esto porque un talud mal analizado y/o mal diseñado; dará como resultado un talud mal construido que puede traer serias repercusiones graves como la pérdida de vidas, pérdidas económicas e incluso la pérdida de ecosistemas (dependiendo de la magnitud del daño).

Ante estas situaciones y el constante estudio que se tiene sobre el tema “Estabilidad de taludes”, se ha tratado de identificar los tipos de fallas y sus posibles causas, esto con el fin de poder esclarecer y prevenir los posibles errores que se pueden presentar ya en la práctica. Existen varios tipos de fallas en un talud, sin embargo, los más comunes son: las fallas traslacionales, rotacionales y por volteo, existen algunos otros que son de menor importancia ya que suelen ser menos comunes. Cada tipo de falla hace referencia a la forma en que se presenta el movimiento de la masa de suelo que está fallando, así, por ejemplo:

*La falla traslacional, según se explica Castañón G. (2011), esta falla se presenta como un movimiento importante del cuerpo del talud, sobre una superficie relativamente plana asociada a estratos poco resistente localizada en las cercanías del pie del talud.

La superficie de falla se desarrolla paralela a la estratificación de suelos débiles, terminando generalmente sobre planos de agrietamientos verticales. Y según este mismo artículo el factor que provoca este tipo de falla es un aumento en las condiciones de presión de poro en el estrato débil.

Este tipo de falla, es común en laderas naturales formadas por materiales arcillosos, producto de la meteorización de las formaciones originales.

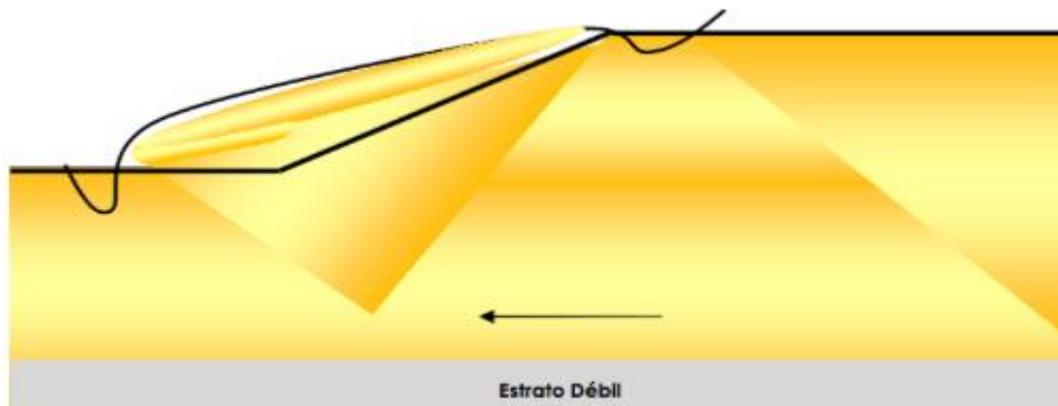


Figura 1.2 Falla por traslación (Montoya, 2009)

*La falla rotacional, según Payan A. (2015), es una falla con movimiento rápidos e instantáneos que se dan en los taludes y que llegan a afectar a masas profundas de los mismos con deslizamientos a lo largo de una superficie de falla curva que se desarrolla en el interior del cuerpo de un talud, sin importar el tipo de cimentación. Se ha descubierto que la superficie de falla se crea cuando actúan esfuerzos cortantes que superan la resistencia del material.

Las fallas de tipo rotacional se pueden producir a lo largo de superficies de fallas identificables con superficies cilíndricas o conoidales.

Este tipo de fallas ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo comportamiento mecánico esté regido básicamente por su fracción arcillosa.

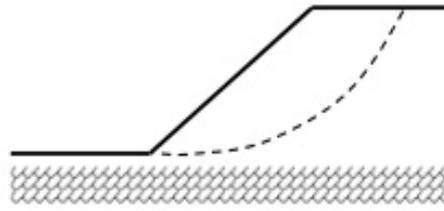


Figura 1.3 Falla rotacional.

*Y finalmente, la falla por volteo, es una falla generada en gran medida por la fuerza de gravedad y se caracteriza por la inclinación del talud que generalmente está semi-inclinado. En este tipo de falla generalmente un estrato tiende a quedar colgado y soportado solamente por la resistencia pasiva de las capas del talud.

Esta falla es muy común en macizos de roca

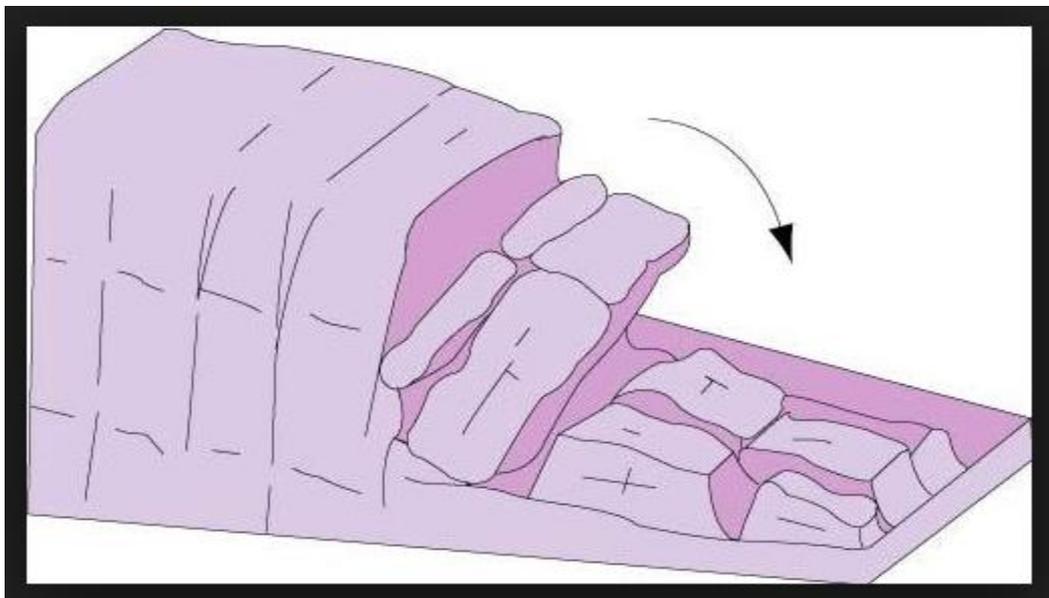


Figura 1.4 Falla por volteo

Como ya se mencionó con anterioridad, además de estas fallas existen otras menos comunes pero que en la teoría forman un complemento de gran importancia, y algunas de ellas son:

*Fallas por deslizamiento superficial.

*Fallas locales.

*Fallas de pie.

*Fallas de base.

*Fallas por flujo.

*Fallas por licuación

Si bien conocer los tipos de fallas es importante, entender los factores que influyen de manera concreta en la estabilidad de un talud, son de mayor relevancia sobre todo en la práctica ya que generalmente un suelo disminuye considerablemente su capacidad para resistir esfuerzos cortantes, ya sea por modificaciones artificiales hechas por el hombre o por situaciones naturales. Algunos de estos factores, según Budhu (2007) son la:

- 1) **Erosión**, esto debido al viento y al agua que provocan modificaciones al talud origen
- 2) **Lluvia**, esta va aunado a la erosión ya que la lluvia puede ser quien ocasiono esto. Además, la lluvia provoca un mayor peso al talud, ya que dependiendo del material puede absorber más o menos cantidad de agua, lo cual modificaría las fuerzas consideradas en un principio. Pudiendo provocar un deslave.
- 3) **Sismo**, al igual que en una estructura común, los sismos también provocan daños en los taludes, ya que en el momento que suceden provocan esfuerzos cortantes que provocan la inestabilidad del talud y rompen el equilibrio de fuerzas.
- 4) **Cargas externas**, en este caso esta situación muchas veces se presenta debido a la mala planeación, ya que dentro de las cargas que se consideran en un principio para el diseño del talud, no se contempló el margen para posibles construcciones sobre el talud o para posibles variaciones que se presente de manera natural.
- 5) **Excavaciones y/o rellenos**, esta problemática se debe a los trabajos que se realizan en las cercanías del talud, incluso sobre el mismo. Por lo que provoca una sobrecarga en el talud que puede ocasionar su falla.

6) Aspectos geológicos, este último se debe más a las condiciones naturales del suelo y del terreno en general, y el cual puede resultar mucho más peligroso que cualquiera de los factores anteriores, ya que muchas veces en los estudios de suelo que se realizan no se detectan fallas, por lo que al momento de realizar el diseño no son considerados y por consecuencia se vuelve un peligro latente.

I.III. Factor de seguridad en un talud.

Hablar de seguridad implica hablar de confianza y de sentir certeza de algo o alguien, es decir que se conoce. En el área de geotecnia el concepto es similar, y específicamente en el análisis de taludes el resultado debe de ofrecer confianza para el analista, ya que este valor muchas veces determinará el costo de la obra que se realizará y también de la seguridad o confianza que se le ofrece a quien(es) utilizará(n) dicha obra, así como el garantizar el bienestar tanto de quien pudiera utilizarla como de la misma construcción; un ejemplo claro se ve en el diseño de taludes a los costados de muchas autopistas, donde un error en su fabricación puede provocar la pérdida de muchas vidas y además la pérdida parcial o total de la vía, tal y como se ve en la imagen.



Figura 1.5 Fallo del talud, en la Ciudad de Caldera, Chile. Junio 2015

Ahora bien, de manera técnica, el factor de seguridad no es más que un factor que contempla la posibilidad de falla, en este caso para un talud, considerando que en un mismo instante se pudieran presentar las peores condiciones de falla para lo que fue diseñado el talud.

Esto se explica también en la fórmula donde hay una relación de fuerzas resistentes y las actuantes, es decir, las que apoyan a la estabilidad del talud y las que hacen todo lo contrario provocando su inestabilidad.

I.IV. Métodos de análisis para estabilidad de taludes.

Una vez visto tanto los tipos de fallas en un talud, así como los factores que las propician, se puede proceder a explicar los métodos que se encargan de analizar a detalle estos tipos de fallas con sus respectivos parámetros, con el fin de proporcionar un valor que básicamente es como una calificación para el tipo de suelo, y que dentro de la ingeniería civil se conoce como factor de seguridad, y el cual puede dar un indicio de si se están haciendo las consideraciones de diseño correctas o se deberían mejorar.

Para este tipo de análisis contamos con los siguientes métodos:

- I.IV. I. Método de Janbú.

Este método según Deméneghi C. (2006) permite obtener el factor de seguridad de un suelo cohesivo-friccionante en forma relativamente sencilla y rápida. En él se toman en cuenta: la presencia de una sobrecarga sobre la corona del talud, las grietas de tensión y las condiciones hidráulicas en el talud. Este método considera la fuerza horizontal entre dovelas, pero no la fuerza por cortante.

De acuerdo a este método, el factor de seguridad está dado por la siguiente fórmula

$$FS = Ncf * c / pd$$

donde:

$$p_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_d}$$

$$\mu_d = \mu_w \mu_q \mu_t$$

μ_w, μ_q y μ_t se obtienen de unas figuras realizadas por el mismo Janbú y que al igual que todo su método son muy aproximados a valores confiables, sobre todo si se considera que el método fue hecho en los años 50 del siglo pasado.

Sin embargo, este método tiene algunas limitaciones ya que únicamente es para suelos homogéneos y la falla que analiza es por rotación.

Dentro de las consideraciones generales hechas por Janbu podemos resaltar las publicadas en la tesis de Castañón G (2011), quien explica las hipótesis que se toman para poder utilizar este método y son:

- a) no existe un tirante de agua al pie del talud.
- b) no se aplican sobrecargas.
- c) no hay grietas de tensión.
- d) el suelo es homogéneo y su resistencia se debe solamente a la cohesión.
- e) la cohesión es constante con la profundidad.
- f) la falla se produce por rotación.

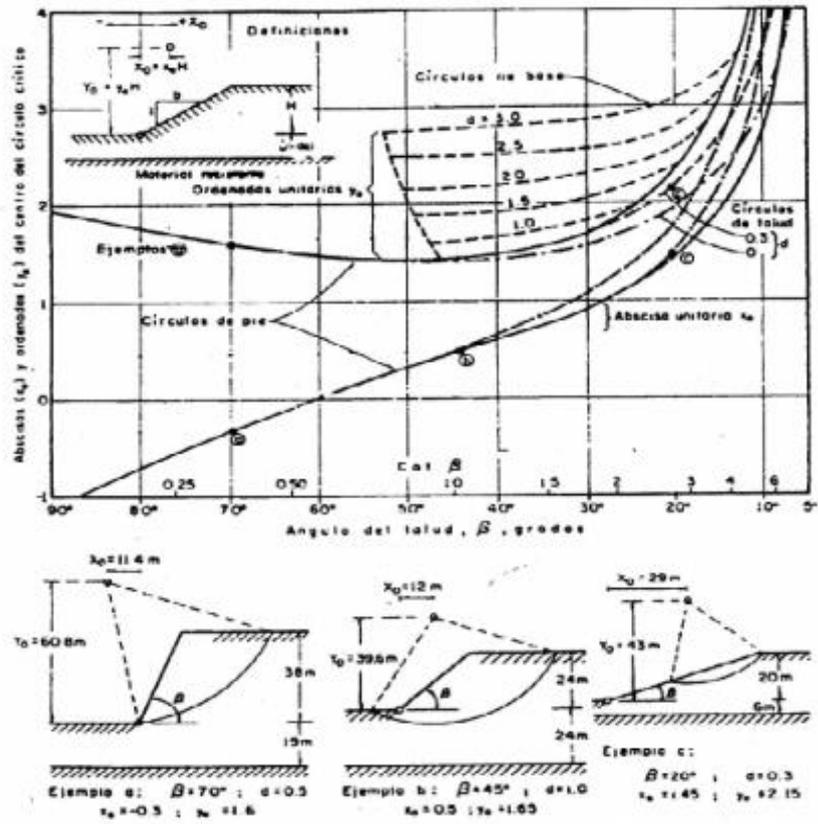


Figura 1.6 Centro y superficie de falla crítica. Janbu, 1954.

- I.IV. II. Método de Bishop y Morgenstern.

Este método al igual que el anterior es un método que intenta ser sencillo, práctico y se basa en tablas hechas por los mismos autores del método. El cual a su vez se basó en el método realizado con anterioridad, por Bishop.

Para el cálculo del factor de seguridad mínimo, se utiliza la fórmula siguiente:

$$FS = m - n(r_u)$$

donde m y n vienen en las tablas que se mencionaron con anterioridad y r_u es la presión de poro.

Para este método se suele interpolar según sea los requerimientos. Sin embargo, pese a que es un método mucho más completo que el anterior, sigue teniendo la limitación de solo poder analizar suelos homogéneos y además no considera la fuerza sísmica dentro de su análisis.

El método se explica correctamente en los “Apuntes de Mecánica de suelos” de Deméneghi C. (2006), el procedimiento consiste en a partir de los datos del suelo y de la pendiente del talud, se calcula primero el valor de $c'/\gamma H$. Se selecciona entonces una parte de la TABLA 1 para la cual $D = 1.00$, y $c'/\gamma H$ sea un poco mayor que el del problema que se está resolviendo. Mediante interpolación lineal se obtienen valores de m y n que corresponden a los valores de $\cot \beta$ y ϕ . Si se encuentra que n está subrayado, eso significa que puede existir un círculo más crítico (con menor FS) a mayor profundidad. En este caso se usa la sección de la tabla para $D = 1.25$, y si es necesario, para $D = 1.50$, hasta que se obtenga una magnitud de n que no esté subrayada”.

Básicamente las tablas que se deben de utilizar para el método de Bishop y Morgenstern, son iguales a la siguiente tabla:

TABLA 1.1 Coeficientes de estabilidad para esfuerzo efectivo.

$c' \gamma/H = 0$													
cot β													
de la pendiente:													
		0.5:1		1:1		2:1		3:1		4:1		5:1	
D	φ°	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
TODOS	20	0.18	0.90	0.36	0.72	0.73	0.90	1.08	1.21	1.45	1.54	1.81	1.88
	25	0.23	1.16	0.47	0.92	0.92	1.16	1.40	1.55	1.86	1.97	2.32	2.41
	30	0.29	1.43	0.58	1.15	1.15	1.43	1.72	1.91	2.30	2.44	2.88	2.98
	35	0.35	1.74	0.70	1.39	1.39	1.74	2.10	2.32	2.79	2.97	3.48	3.62
	40	0.42	2.09	0.83	1.67	1.67	2.09	2.51	2.79	3.34	3.55	4.18	4.34

$c' \gamma/H = 0.025$													
cot β													
de la pendiente:													
		0.5:1		1:1		2:1		3:1		4:1		5:1	
D	φ°	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
1.00	20	0.52	0.72	0.70	0.76	1.11	1.01	1.53	1.34	1.95	1.69	2.37	2.04
	25	0.59	0.79	0.83	0.96	1.35	1.27	1.87	1.69	2.39	2.13	2.91	2.59
	30	0.67	0.88	0.97	1.19	1.60	1.56	2.23	2.07	2.86	2.61	3.41	3.17
	35	0.76	1.00	1.13	1.44	1.87	1.88	2.63	2.50	3.38	3.15	4.14	3.83
	40	0.86	1.17	1.30	1.72	2.18	2.24	3.07	2.98	3.95	3.76	4.86	4.56
1.25	20	1.00	0.93	1.07	1.02	1.29	1.20	1.60	1.45	1.93	1.76	2.30	2.06
	25	1.22	1.18	1.31	1.30	1.60	1.53	1.97	1.87	2.42	2.25	2.87	2.65
	30	1.46	1.47	1.59	1.62	1.95	1.91	2.41	2.33	2.93	2.80	3.49	3.28
	35	1.74	1.76	1.90	1.96	2.32	2.31	2.89	2.83	3.50	3.38	4.17	3.98
	40	2.04	2.11	2.23	2.35	2.74	2.75	3.43	3.39	4.14	4.04	4.93	4.75

$c' \gamma/H = 0.050$													
cot β													
de la pendiente:													
		0.5:1		1:1		2:1		3:1		4:1		5:1	
D	φ°	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n	m	n
1.00	20	0.69	0.78	0.90	0.83	1.37	1.06	1.83	1.38	2.32	1.77	2.77	2.08
	25	0.80	0.98	1.05	1.03	1.61	1.33	2.18	1.75	2.77	2.20	3.33	2.64
	30	0.91	1.21	1.21	1.24	1.88	1.62	2.56	2.15	3.24	2.68	3.91	3.24
	35	1.02	1.40	1.37	1.46	2.17	1.95	2.99	3.78	3.58	3.25	4.57	3.96
	40	1.14	1.61	1.55	1.71	2.50	2.32	3.44	3.06	4.40	3.91	5.30	4.64
1.25	20	1.16	0.98	1.24	1.07	1.50	1.26	1.82	1.48	2.22	1.79	2.63	2.10
	25	1.40	1.23	1.50	1.35	1.81	1.59	2.21	1.89	2.70	2.28	3.19	2.67
	30	1.65	1.51	1.77	1.66	2.14	1.94	2.63	2.33	3.20	2.81	3.81	3.30
	35	1.93	1.82	2.08	2.00	2.53	2.33	3.10	2.84	3.78	3.39	4.48	4.01
	40	2.24	2.16	2.42	2.38	2.94	2.78	3.63	3.38	4.41	4.07	5.22	4.78
1.50	20	1.48	1.28	1.55	1.33	1.74	1.49	2.00	1.69	2.33	1.98	2.68	2.27
	25	1.82	1.63	1.90	1.70	2.13	1.89	2.46	2.17	2.85	2.52	3.28	2.88
	30	2.18	2.01	2.28	2.09	2.56	2.33	2.95	2.69	3.42	3.10	3.95	3.56
	35	2.57	2.42	2.68	2.52	3.02	2.82	3.50	3.25	4.05	3.75	4.69	4.31
	40	3.02	2.91	3.16	3.02	3.55	3.37	4.11	3.90	4.77	4.48	5.50	5.12

- I.IV. III. Método simplificado del Ing. Deméneghi.

Este método ha sido un gran avance respecto a las tradicionales metodologías que se han venido utilizado por muchos años. Fue hecho por el ingeniero Deméneghi C. en 2010, para suelos cohesivos-friccionantes, el cual tiene una ventaja muy importante respecto a los demás métodos, y es que sí toma en cuenta las fuerzas sísmicas dentro de la estabilidad del talud, así como la fuerza hidráulica que se ejerce por la localización del nivel freático. Según el mismo autor, Deméneghi C. (2010), el método se basa en la siguiente ley de resistencia:

$$s = c + \tan(\phi).$$

La única limitación que tiene el método simplificado es que solo se debe utilizar para fallas por pie del talud, esto lo explica el autor de la siguiente manera, “Debido a que este método da valores del factor de seguridad mayores que los que se obtienen usando otros métodos más elaborados, se recomienda calibrarlo con alguno o algunos de estos”.

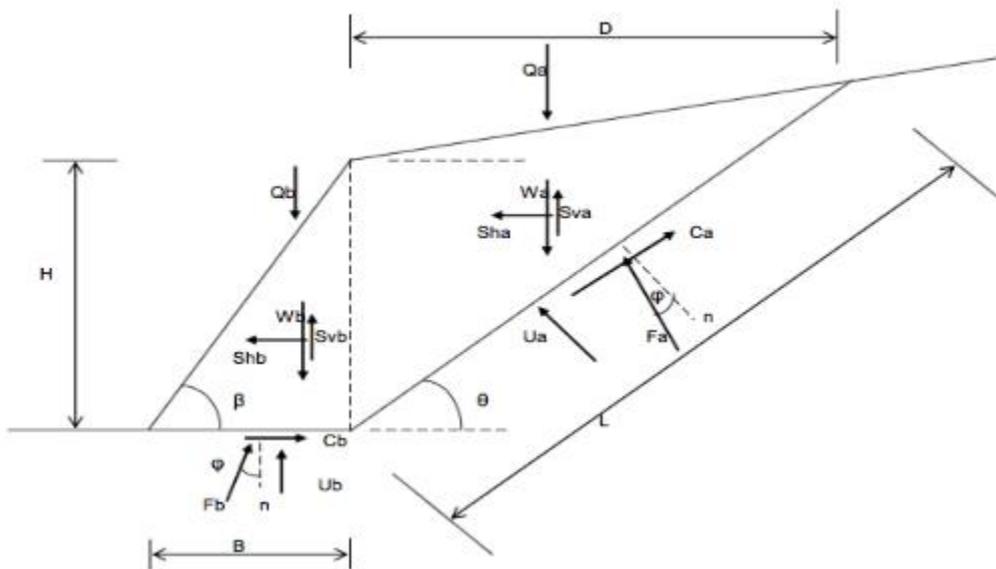


Figura 1.7 Superficie supuesta de falla, Agustín Deméneghi

Donde:

W = peso de la cuña

Q = sobrecarga sobre la cuña

Sh = fuerza sísmica horizontal

Sv = fuerza sísmica vertical

C = fuerza resistente debida a la cohesión del suelo

F = fuerza resistente debida a la fricción del suelo

U = fuerza de supresión hidráulica

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo

Este método se basa en la siguiente relación:

$$FS = FR / FA$$

Una relación entre las fuerzas resistentes (FR) y las fuerzas actuantes (FA) que convergen en el talud.

Además de las notorias mejoras que ha venido ofreciendo dicha metodología. también tiene la ventaja que puede ser fácilmente programable en hoja de Excel u otro programa con características similares.

- I.IV. IV.Método de Fellenius.

Este método ha sido el punto de partida en el análisis de la estabilidad de un talud, ya que es el primero en considerar las fuerzas que actúan en el mismo talud. Tal y como se ve en la imagen “Diagrama de fuerzas”, extraída de la tesis de Castañón G (2011).

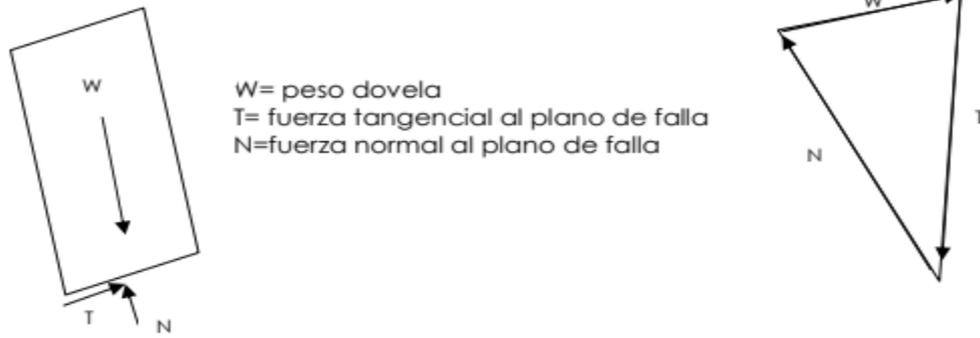


Figura 1.8 Diagrama de fuerzas

También conocido como Método Sueco. Este método fue el primero que consideró la estabilidad del talud a través del análisis de fuerzas que actúan en este, dividiendo a la masa de suelo en dovelas.

Según se explica en el artículo “Estabilidad de taludes”, el método considera una superficie de falla cilíndrica, la cual tiene rotación considerando un punto de giro que corresponde al centro del círculo que define la superficie de falla. Se ignora la fricción entre dovelas y solo se consideran las fuerzas tangenciales a lo largo de la superficie de falla que actúan en cada una de ellas.

El factor de seguridad al igual que la mayor parte de los métodos relaciona las fuerzas resistentes y actuantes de cada dovela, respecto al centro del círculo de falla

El factor de seguridad se obtiene de la siguiente manera:

$$F.S. = \frac{\sum(cb + N \cdot \tan(\phi))}{\sum(W \cdot \sin \alpha)}$$

Donde:

C: Cohesión del suelo,

ϕ : Ángulo de fricción del suelo,

β : Ángulo de inclinación del talud,

N: Fuerza normal ($W \cos \alpha$),

W: Peso de la dovela,

α : Ángulo de la inclinación de la superficie de falla.

Ahora, una tabla resumen de los métodos ya mencionados y algunos más, tomada del libro del Suárez J. (2009).

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 (Frohlich, 1953)	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, 1922)	Circulares	Momentos	Círculo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi = 0$).
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, sea asume, que varían de acuerdo con una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

TABLA 1.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Estos son tan sólo alguno de los tantos métodos que se han creado para el análisis de un talud, ya que como se ha tratado de explicar, el análisis de la estabilidad de un talud es una actividad

muy importante que hay considerar en actividades que pueden generar un gran impacto social y económico, como: excavaciones, diseño de presas, trazado de vías, obras de protección contra inundaciones, entre muchas más posibles obras que requieren de un talud.; las cuales además pueden provocar grandes pérdidas humanas.

Finalmente, alguna de las limitaciones que se puede encontrar de forma general en cada uno es estos métodos son:

- 1) En los métodos que considera la sobrecarga, se comete el error de considerar los esfuerzos uniformemente distribuidos.
- 2) Consideran en muchos casos únicamente fuerzas estáticas, lo cual no es cierto.
- 3) Se considera que el material que se utiliza en la construcción de un talud es isotrópico, cuando es evidente que las propiedades son distintas en cualquiera de sus direcciones.
- 4) No considera el cambio en la calidad de los materiales con el paso del tiempo, de manera que el análisis sólo es efectivo para un determinado tiempo que incluso no se conoce con exactitud.
- 5) En muchos casos no se analiza la variación que puede existir en el nivel freático lo cual puede provocar la variación de estado de un suelo, como por ejemplo estar saturado o sumergido.

CAPÍTULO II. MÉTODO BISHOP

El presente capítulo intentará explicar a detalle el método de Bishop, ya que es la base del método que se convirtió en programa, en la presente tesis, por lo cual es trascendental conocer las características y consideraciones que posee el método. Posteriormente se explicará el tratamiento teórico que se le dio al programa diseñado en Excel y el alcance que tendrá.

Como ya se había visto en el capítulo anterior, Bishop ya había formado parte de la realización de un método para el análisis de taludes, sin embargo es importante aclarar que el método que realizó en compañía de Morgenstern fue realizado posteriormente al método que hizo de manera individual, se menciona sobre esto para tener un punto de referencia de la utilidad que tiene el “Método de las dovelas” realizado por Bishop pese a la longevidad del mismo y además para resaltar el potencial que este primer método tiene, ahora que la tecnología ha avanzado con una gran cantidad de softwares que hacen cálculos de manera instantánea y por consecuencia puede facilitar el largo cálculo que se tenía que realizar al momento de usar dicha metodología.

Es quizá este último punto la razón principal por la que muchos investigadores se empeñaban en deducir nuevas fórmulas y nuevas metodologías que pudieran facilitar el desarrollo matemático, y por consecuencia sacrificaban un poco la exactitud del resultado (aclarando que no por eso es que el resultado que arrojan estos métodos está mal, simplemente muchas veces las consideraciones que se toman son menores con tal simplificar el cálculo, como por ejemplo no se considera la fuerza del sismo, en algunos otros no toma en cuenta el nivel freático o incluso la sobrecarga).

El primer método realizado por Bishop se apoyó en la utilización de las dovelas y tomaba en cuenta el efecto de las fuerzas entre ellas, pero únicamente la fuerza horizontal que se ejerce entre las mismas por lo que consideraba nula la fuerza cortante, caso similar al método de Janbú.

Ahora bien, la razón por la cual la metodología hecha por Bishop es un tanto elaborada, es debido a que el método trata de incluir la mayor cantidad de información dentro de su análisis, desde las características básicas del suelo como el peso volumétrico, la cohesión y el ángulo de fricción interna hasta características más elaboradas como la fuerza debida al sismo, la presión hidrostática y la sobrecarga que se debe de considerar por cada porción de suelo (a esta porción de ahora en adelante se le llamará dovela). Estos puntos se explican con mayor claridad en los “Apuntes de Mecánica de suelos”, Deméneghi C. (2006), en donde:

“Considera que una posible superficie de falla es aquella cuya traza en el plano es el arco de circunferencia tal y como se ve en la imagen, donde además divide el cuerpo del talud en dovelas”.

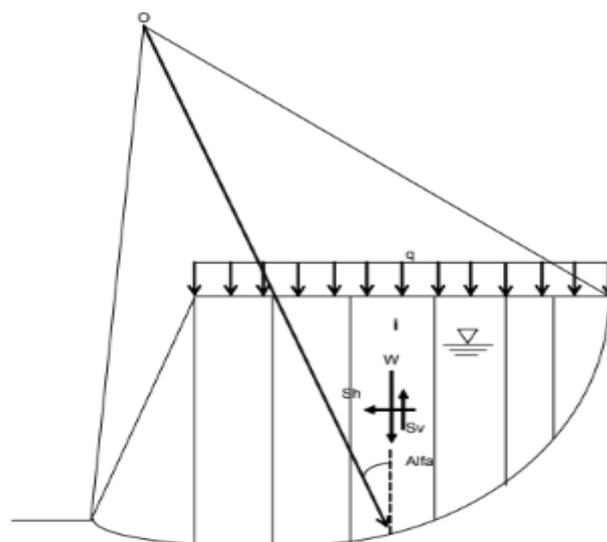


Figura 2.1 Dovelas del método de Bishop

Una gran cantidad de métodos que dentro de su análisis de falla consideran un círculo de falla, suelen fraccionar al suelo en las ya conocidas dovelas, las cuales dependen de la geometría del talud y también de la exactitud del resultado que se desea obtener. Se supone que el grado de confiabilidad del resultado aumenta en la medida de que el suelo se divida en un mayor número de dovelas. Es importante aclarar primero que el resultado no variará tanto entre una cierta cantidad de dovelas y otra, sólo se debe de considerar un número proporcional a las dimensiones del talud.

II.I Análisis de la metodología de Bishop.

Primero que nada, hay que establecer que el alcance de este método está delimitado en que es únicamente para suelos cohesivos-friccionantes, por lo que si los requerimientos son distintos se tendrá que buscar otro método que se adapte a las necesidades.

Para el análisis de este tipo de suelo, el método de Bishop se basa en la siguiente expresión:

$$s=c+\sigma\tan(\phi)$$

La cuál como se mencionó antes es únicamente para suelos cohesivos-friccionantes, pero con resistencia drenada.

Respecto a la metodología y las fórmulas que utiliza el método de Bishop como se pueden ver son bastante elaboradas, por lo que cada autor que explica dicha metodología le da una presentación diferente con el fin de sintetizar más la información y con ello ayudar al lector a entender de manera más sencilla y práctica la información, para este trabajo de tesis haré referencia a los “Apuntes de mecánica de suelos” de Deméneghi C. (2006), el cual desarrolla el tema de la siguiente forma:

- 1) Al igual que todos los métodos relaciona la fuerza resistente contra la fuerza actuante, las cuales a su vez depende de los siguientes parámetros:

$$F_a = V \cdot \sin(\alpha) + S_h \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_R = \sum s_l = \sum s_b \cdot \sec(\alpha)$$

Y como el factor de seguridad es igual a $F.S. = F_R / F_a$, y además las consideraciones son por dovela, entonces el factor de seguridad es igual a:

$$F.S. = \frac{\sum s_b \cdot \sec(\alpha)}{\sum V \cdot \sin(\alpha) + S_h \cdot \cos(\alpha)}$$

- 2) V , a su vez es igual a:

$$V = W + Q - S_v$$

Donde:

Q = Sobrecarga sobre la dovela

W = Peso propio de la dovela

S_v = Sismo vertical

- 3) Para el caso de este método si se considera la fuerza cortante (s), y se puede ver claro en el diagrama de cuerpo libre siguiente:

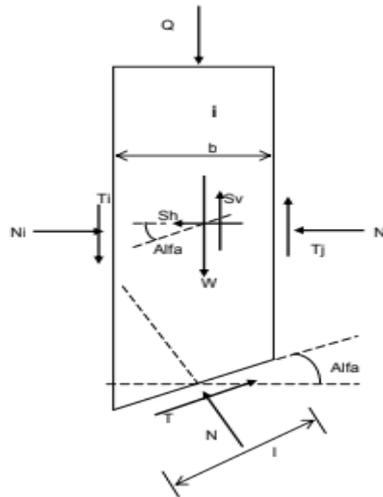


Figura 2.2 Diagrama de cuerpo libre de una dovela. Deméneghi C., (2006)

4) Esta **fuerza cortante** (s) se encuentra a partir de la geometría vista en la dovela, y se

llega a:

$$\sigma = \frac{N'}{l}$$

5) Y para encontrar N' se debe de hacer un análisis de fuerzas verticales, según Deméneghi

C. (2006), y se obtiene:

$$V = T \cdot \sin(\alpha) + N \cdot \cos(\alpha)$$

$$\text{Donde; } N = N' + UW \cdot l$$

Posteriormente se despeja N' y se llega a la siguiente expresión:

$$N' = V / \cos(\alpha) - T \cdot \tan(\alpha) - UW \cdot l$$

6) Sin embargo, por geometría se puede llegar a hacer algunas simplificaciones, como las debidas a las siguientes expresiones:

$$b = l \cdot \cos(\alpha)$$

$$T = sl / FS = sb \cdot \sec(\alpha) / FS$$

Las cuales, al ser sustituidas, en la fórmula de fuerza cortante, se llega a:

$$\sigma = V/b - s \cdot \tan(\alpha) / FS - UW$$

- 7) Si esto a su vez se sustituye en la expresión para suelos cohesivos-friccionantes, resulta la siguiente ecuación:

$$s = \frac{c + (V/b - UW) \tan(\varphi)}{1 + \tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha) / FS}$$

- 8) Y finalmente, se sustituyen todas las expresiones anteriores, en la ecuación para encontrar el factor de seguridad, y se obtiene la expresión final siguiente:

$$FS = \frac{\sum(c + (V - UW \cdot B) \tan(\varphi)) \cdot \sec(\alpha) / (1 + \tan(\alpha) \cdot \tan(\alpha) / FS)}{\sum(V \cdot \sec(\alpha) + Sh \cdot \cos(\alpha))}$$

Es evidente que la metodología implica una serie de iteraciones, ya que dentro de la misma fórmula se encuentra la incógnita, por lo que la solución se deberá aproximar en primera instancia. Una forma práctica para facilitar la aproximación es utilizar un valor típico, como lo puede ser un rango entre 1 y 2.5, incluso hasta 3. De tal manera de empezar con valores mucho más reales. Posteriormente, como es muy probable que no se obtenga un valor igual entre el factor de seguridad propuesto y el obtenido, se recomienda usar en una segunda iteración el valor obtenido de la primera iteración, y si en esta segunda etapa no se vuelve a obtener el mismo valor, se recomienda nuevamente utilizar como factor de seguridad propuesto el valor obtenido de la segunda iteración. De ser necesario un mayor número de iteraciones, siempre es recomendable volver a utilizar el FS (el propuesto) obtenido en una iteración anterior, de esta forma cada vez el error será menor, entre uno y otro hasta llegar a la respuesta correcta.

Para cuestiones prácticas los valores entre el factor de seguridad propuesto y el obtenido pueden tener hasta un 5% de error, ya que realmente no existirá una variación significativa que pueda repercutir en mayor medida.

CAPÍTULO III. PROCEDIMIENTO NUMÉRICO PARA EL ANÁLISIS DE UN TALUD.

En este tercer capítulo se desarrollará a detalle el tema principal de este trabajo de tesis, el cual intenta ser un aporte para el desarrollo del análisis de estabilidad de taludes. Se explicará la metodología y las consideraciones que se tomaron de diferentes métodos, así como del criterio personal para la creación de este nuevo método, que tiene un mayor potencial y alcance en comparación con los métodos ya existentes. Posteriormente se explicará el tratamiento que se le dio a cada uno de los pasos antes mencionados para la realización del método, el cual posteriormente fue programado con el fin de simplificar aún más el nuevo método que se ha intentado implementar.

III.I. Métodos de análisis.

Dentro de este apartado se retomará algunos puntos claves de dos métodos vistos en los capítulos anteriores, el método de Bishop y el método simplificado del ingeniero Deméneghi.

Este nuevo método se sustenta en su mayoría en el método de Bishop, el cual como antes se explicó es un método muy preciso pero muy largo y tedioso en la elaboración de cálculos por lo que muchas veces resulta poco práctico su utilización, sobre todo si estos cálculos se realizan de manera manual. Sin embargo, con la ayuda de un software como lo es Excel, resulta mucho más fácil desarrollar un sistema más rápido y dinámico, es por eso que se hace mucho énfasis la utilización del mismo.

Y al igual que la mayor parte de los métodos tradicionales, este se basa en la relación de fuerzas resistentes y fuerzas actuantes

$$FS = FR / FA$$

Y a su vez de la fórmula desarrollada, siguiente:

$$F.S. = \frac{\sum((cb+(V-Uwb)\tan\varphi)\cdot\sec(\alpha)i)/(1+\tan(\alpha)i+\tan(\varphi))/FS}{\sum(V\cdot\sin(\alpha)i+Shi\cdot\cos(\alpha)i)}$$

Como se puede observar el nuevo método tiene su base en la formulación del método de Bishop, y tal pareciera que es el mismo, pero la realidad es otra ya que aunque las fórmulas sí son las mismas, el alcance del nuevo proyecto se ve ampliado y mejorado ya que el método de Bishop se ve imposibilitado a únicamente suelos homogéneos y este nuevo método no, sino todo lo contrario su potencial se basa en hacer análisis para suelos heterogéneos, lo cual resulta más un talud real y no idealizado como lo es un suelo homogéneo.

Sin embargo, este potencial que es el análisis para un suelo heterogéneo se ve reducido a un suelo de únicamente 4 estratos, intentando acercarse lo más que se pueda a situaciones más comunes de la práctica.

Como se puede observar en este nuevo método también se considera la fuerza sísmica tanto horizontal como vertical, así mismo la sobrecarga en el talud, la presión hidrostática, entre otras características que son básicas y se pueden encontrar en cualquier otro método como lo son la cohesión que posee el suelo, el peso volumétrico, el ángulo de fricción interno y la geometría del talud. todo esto muy parecido al método de Bishop, pero con ciertos retoques que intentan mejorar y facilitar la metodología a quien lo utilice.

Estas modificaciones provienen principalmente del método simplificado del ingeniero Deméneghi, entre los cuales destacan:

1)El cálculo de la sobrecarga distribuida a lo largo del talud, el cual en el método de Bishop no ofrece y tampoco explica cómo calcular o considerar este valor a lo largo del talud, y además

no se identifica el área de contacto. Con ayuda de la geometría y la siguiente fórmula proveniente del método simplificado, se aproxima a un valor confiable.

$$Q=q*D$$

Donde:

D=Longitud de contacto de la sobrecarga (en m)

q= fuerza proveniente de la sobrecarga por unidad de superficie (en kg/m²)

Q=Sobrecarga sobre la cuña por unidad de longitud (kg/m)

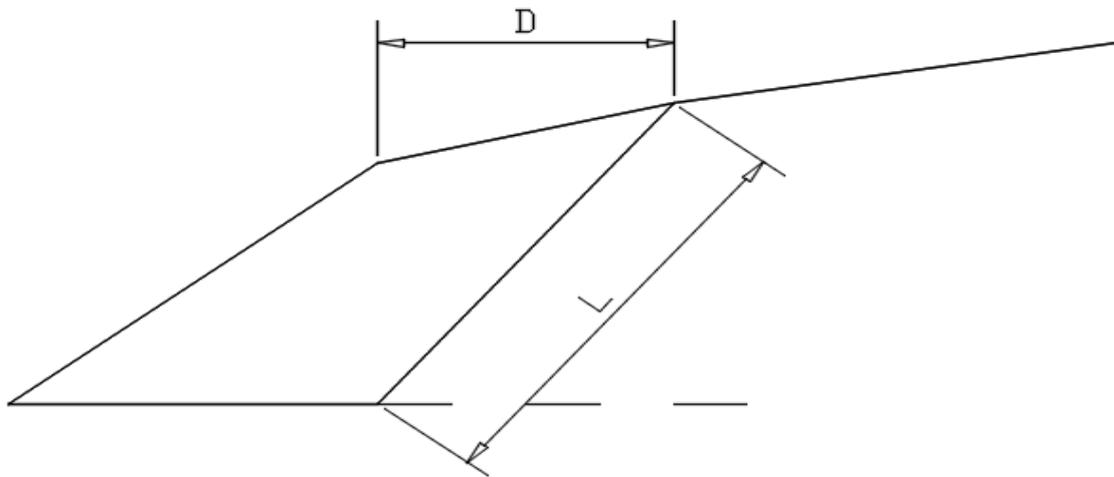


Figura 3.1 Cálculo de la sobrecarga.

En algunos casos si se desconoce el valor de “D” pero se conoce el valor de “L” tal y como se observa en la imagen, se puede calcular con la siguiente expresión:

$$D=L*\cos(\theta)$$

Donde:

θ = *Ángulo de inclinación del talud*

L=Longitud de inclinación de la parte baja del talud (en m).

2) Otra fórmula que se tomó del método simplificado para facilitar el cálculo de un parámetro, es la fuerza sísmica tanto vertical como horizontal, ya que como se puede observar en el método de Bishop sólo indica que es parte de la fórmula para el cálculo del factor de seguridad, sin embargo, el valor como tal de las fuerzas sísmicas no se explica, por lo que se toma como referencia la siguiente fórmula:

$$S=C_s(W+Q)$$

La cual es útil para el cálculo del sismo en sus dos direcciones de análisis, sólo deberá considerarse la variación que existe en el coeficiente sísmico, dependiendo de la dirección de análisis.

Donde:

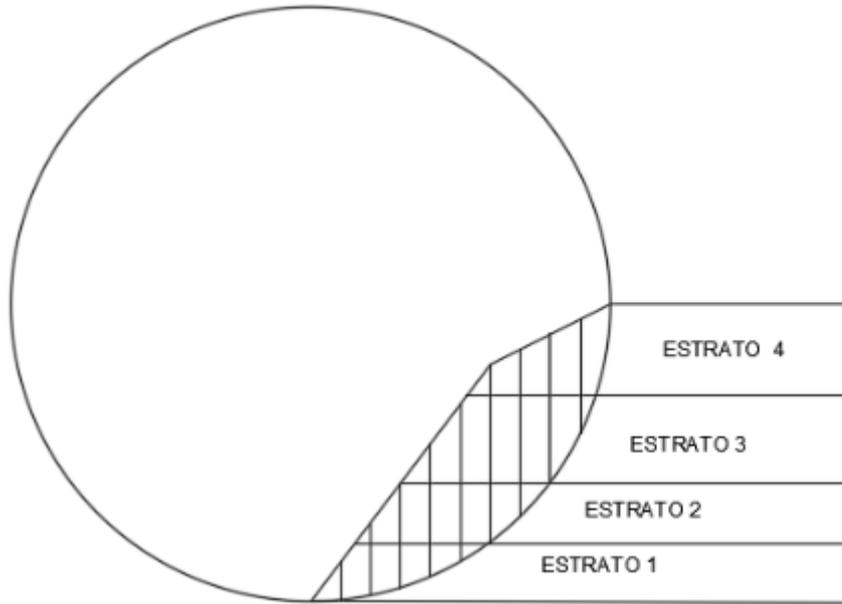
S=fuerza sísmica (kg/m)

C_s=coeficiente sísmico (adimensional)

W=peso propio de la dovela (kg/m)

Q=Sobrecarga sobre la cuña por unidad de longitud (kg/m)

Como se puede observar en la fórmula, el cálculo está basado en una sumatoria, esto debido a que como el talud se divide en dovelas, las cuales son fragmentos del talud que se analizan primero de forma independiente y después como un conjunto, dando como resultado el análisis general del talud, y posteriormente el valor correspondiente al factor de seguridad según las características propias del talud.



Es un método mucho más estricto y riguroso en el cálculo del factor de seguridad, ya que las consideraciones respecto a los datos que se ingresan son realmente amplios y exigentes durante el proceso metodológico.

Como se ha mencionado con anterioridad, los parámetros que toma en cuenta este método exigen un diseño más detallado con tal de cumplir con los requerimientos de un proyecto de ser el caso.

Además, como el programa es capaz de analizar un suelo heterogéneo los valores relacionados al factor de seguridad serán muy variables ya que estará en función de las características relacionadas a cada uno de los 4 estratos. Y además cada estrato influirá más o menos dependiendo del tamaño de cada uno, así también de lo grande o pequeños que sean los valores de las características intrínsecas de cada dovela, ya que por ejemplo si el peso volumétrico de una parte del talud es mayor que otra, evidentemente influirá más en el resultado, caso similar sucederá con la cohesión, con el ángulo de fricción interna e incluso las dos componentes de

la fuerza sísmica a considerar en el cálculo del factor de seguridad, esto debido a que como la fórmula que sirve para obtener dicha fuerza, introduce el peso de la cuña (la cual se calcula con ayuda del peso volumétrico) provocará que alguna parte del suelo tenga mayor influencia que otra parte.

III.II. Variables

Por otra parte, así como se tomaron puntos muy valiosos de otros métodos, también se contribuyó con agregar y modificar ciertas variables con el fin de mejorar el programa realizado, con el de facilitar la metodología y el de introducir la mayor cantidad de datos en el diseño del talud para tener un resultado más confiable.

1) Una de las primeras consideraciones que se tomó, fue el análisis geométrico del talud, ya que regularmente la mayor parte de los métodos realizan un análisis para taludes triangulares, lo cual no siempre es cierto, por lo tanto, en este nuevo método se ofrece al usuario la oportunidad de considerar o no, un fragmento que también está inclinado sobre la parte superior del talud, tal y como se ve en la imagen:

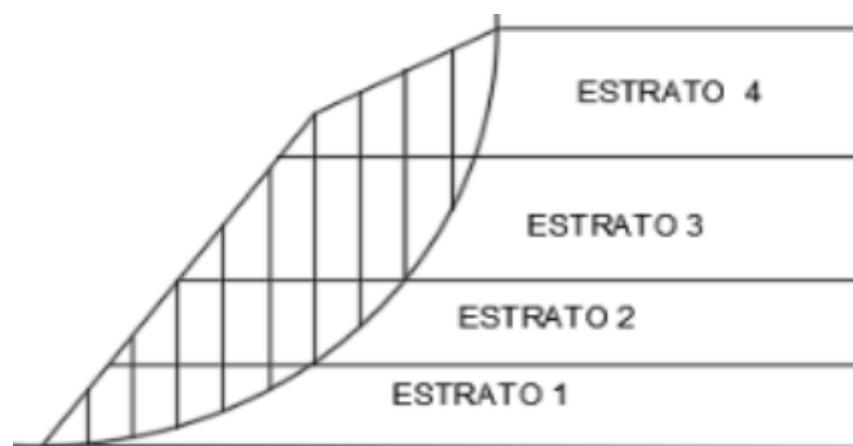


Figura 3.2 Talud con suelo heterogéneo (4 estratos)

2) Un segundo aporte fue el rango a considerar como círculo crítico, la cual nuevamente depende de la geometría del talud. Sin embargo, ante la posible variación que pueda presentarse entre un usuario y otro, el método debe ser capaz de adaptarse y realizar el cálculo correspondiente de manera correcta.

Este rango evidentemente provocará variaciones en el resultado, ya que dependiendo de la ubicación de este arco de falla (o círculo crítico) se considerará mayor o menor fragmento de un estrato y otro (principalmente entre el primer estrato y el cuarto), este es quizá uno de los problemas principales que se presenta cuando un talud es heterogéneo.



Figura 3.3 Círculo crítico

3) Esta tercera aportación quizá la más importante ya que es una idea que puede lograr un mayor impacto no solo en lo teórico sino también en lo práctico porque intenta cambiar el tradicional análisis de los taludes homogéneos por un nuevo talud que puede ser hasta de 4 capas diferentes (cantidad de estratos más comunes vistos en la práctica para un talud) en análisis.

Este aporte tiene un grado de dificultad grande por sí sólo, y si a eso se le agrega que el análisis se hace a la par con otros dos métodos (método de las dovelas de Bishop y el método simplificado del Ing. Deméneghi), la dificultad es aún más grande y con ciertos errores que,

aunque no son significativos en la mayoría de los casos, si es necesario mencionarlos para usar un poco el criterio y la experiencia al momento de obtener un resultado con este nuevo método. Ahora bien, todo este análisis matemático es bastante largo y tedioso, es por eso que uno de los tantos alcances de este trabajo de tesis fue el programar todo (computarizar), con ayuda de un software muy fácil de usar, que esté al alcance de cualquier usuario que posea una computadora y que además se capaz de resolver toda la metodología de este nuevo método que intenta tener un mayor potencial, tal y como lo es Excel.

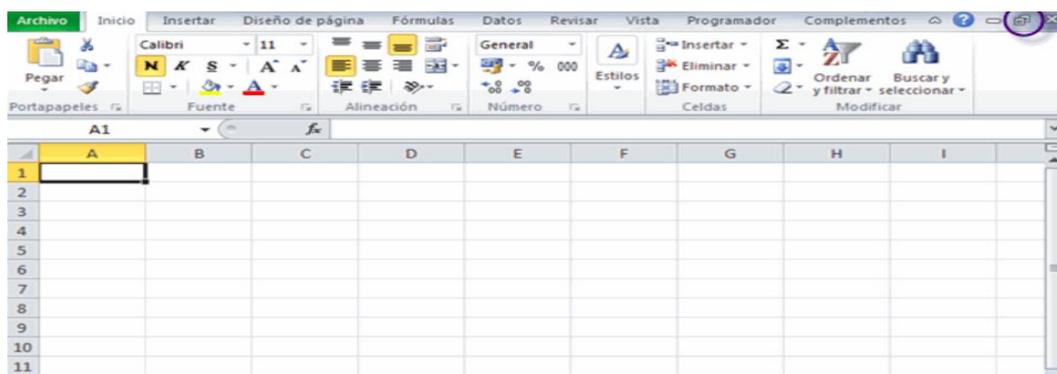


Figura 3.4 Software Excel

Donde con herramientas básicas como lo son los cálculos algebraicos, las fórmulas pre-establecidas, las condicionantes que ayudan a establecer límites dentro del programa creado, así como la misma practicidad de Excel, que permite hacer cálculos que suelen ser complicados si se hacen de manera manual; de una manera más sencilla y dinámica.

Además, como ya mencionó, este software (Excel) fue elegido porque es una herramienta que es fácil de encontrar, prácticamente en todas las computadoras podemos encontrarlo y por lo tanto se puede usar este programa sin ningún problema.

4) Una última variante a favor de este, ya mencionado programa de estabilidad de taludes son las variables que se consideran para su análisis, haciéndolo quizá uno de los más completos dentro de los métodos tradicionales.

Con anterioridad se había mencionado brevemente de estas variables que se han tomado en cuenta, sin embargo, no se mencionaron las características y el procedimiento que se realizó para poder ser calculado, ya sea por el usuario o por el mismo programa (introduciendo simplemente los datos que se pidan)

Calculado con el programa (introduciendo datos)	Característica	El usuario tiene que dar el valor de la variable que se solicita.	Característica
Sobrecarga= $Q=q*D$	Se tiene que dar como datos q =fuerza proveniente de la sobrecarga por unidad de superficie.	Cohesión= C	Es un dato que se obtiene de estudios de laboratorio.
Fuerza sísmica $S=C_s(W+Q)$	Se tiene que dar C_s =coeficiente sísmico, el cual depende de la localización del talud.	Ángulo de fricción interna= ϕ	Es un dato que se obtiene de estudios de laboratorio.
Presión	En esta parte solo se	Peso volumétrico de	Es un dato que se

hidrostática= U_w	debe referenciar cual es la altura del nivel freático respecto al pie del talud.	cada uno de los estratos= γ	obtiene de estudios de laboratorio.
		Altura del estrato= h	Dato obtenido en campo, dada la estratificación.
		Geometría del talud.	Depende de los diseños (cuando se esté diseñando un talud) o en su caso de las mediciones (cuando es revisión)

Tabla 3.1 Tabla de variables a introducir

Al hablar de variables se sobreentiende que se hace referencia a un parámetro que no es constante a lo largo del tiempo, y es algo que muchas veces no se puede estudiar y cuantificar con precisión para un lapso de tiempo ya que las condiciones que se pudieran presentar en diferentes casos pueden ser tan diferentes a lo que se pueda prever y para lo cual fue diseñado el talud. Es por eso que pese a que los métodos intenten incluir la mayor cantidad de variables, como es el caso del nuevo método creado para esta tesis, nunca se puede asegurar que será un dato totalmente confiable ya que siempre existirán ciertas incertidumbres que no se tomarán en cuenta y que pueden ser tan inesperadas como puede ser la fisura de una tubería que pueda

pasar cerca del talud, la magnitud de un sismo, la calidad del mismo suelo e incluso la sobrecarga que se consideró y la que es realmente, entre algunos otros.

Una variable que es claro ejemplo de los cambios que existe en un talud a lo largo del tiempo, es la erosión, parámetro que prácticamente en ningún método de análisis de estabilidad de taludes se considera, debido a que como ya se ha mencionado los factores externos pueden provocar problemáticas que no se previeron en el diseño del talud, los cuales pueden provocar la falla en el talud.

Para este ejemplo claro, como lo es la erosión existen algunos métodos para calcularlo y aproximarlos en ciertas condiciones y considerando que sean constantes, sin embargo, lo cierto es que suelen ser mucho más empíricos, además de que son experimentos donde las condiciones son controladas y analizadas con mayor precisión, por lo que no son muy confiables para considerarlos en la estabilidad de taludes, ya que las condiciones reales suelen ser muy inestables.

III.III. Interfaz del programa y cada una de sus partes.

En esta última parte de este capítulo, se presentará cada una de las partes de las que se compone el programa, desde la parte donde se introducen los datos, pasando por el tratamiento que se le da hasta el resultado final.

Como se ha venido explicando el programa está hecho en base en 3 métodos, el método de Bishop, el método simplificado del Ing. Deméneghi y las modificaciones que he realizado con el fin de hacer un nuevo y mejorado método.

Como parte inicial en la utilización de este programa tenemos el ingreso de algunos datos básicos, tal y como es la geometría del talud, la cual será ingresada como dato obligatorio para el usuario. Este dato se pondrá en forma de coordenadas considerando el pie del talud como la cota (0,0)

Datos		
Pie de talud:		
Px:	0	m
Py:	0	m

Únicamente se agregará las coordenadas de dos puntos finales del talud en m, tal y como se observa en la Figura.

Final del talud 1:	Final del talud 2	
Px: 16	Px: 23.46	m
Py: 8	Py: 8	m

Estos puntos corresponden a la parte superior del talud, en donde se considerará que se aplicará la sobrecarga si es que existe la misma.

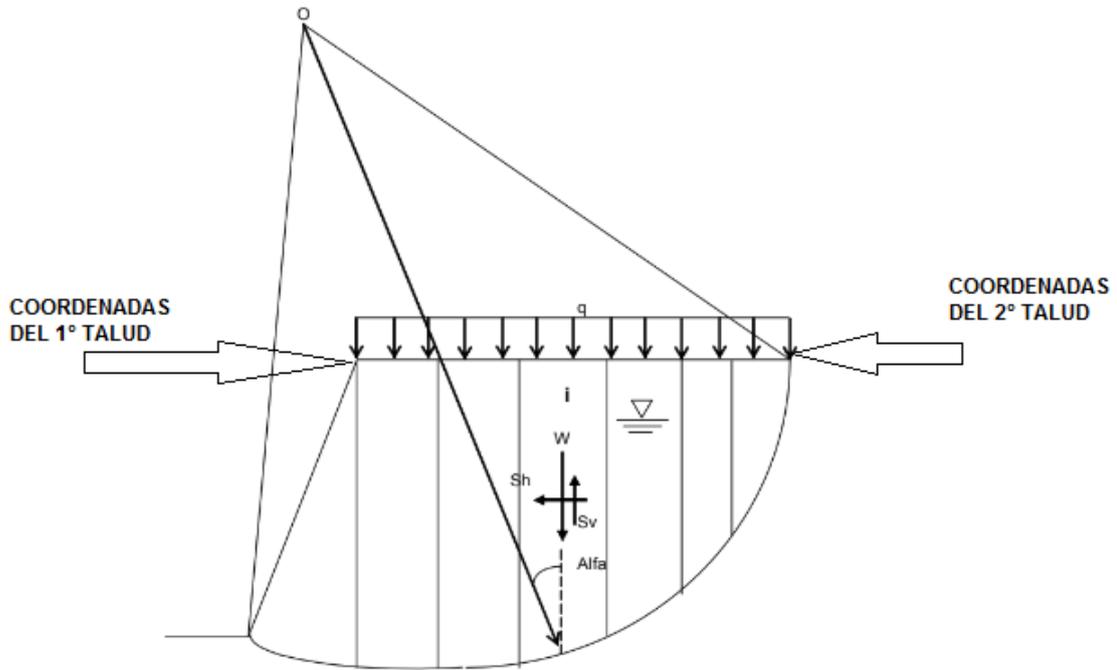


Figura 3.5 Coordenadas del talud.

El motivo de poner dos puntos como coordenadas, además del pie del talud es debido a que de no hacerlo se estaría pensando en un talud casi triangular y donde no cabría la posibilidad de considerar una sobrecarga, tal y como se ve en la Figura.

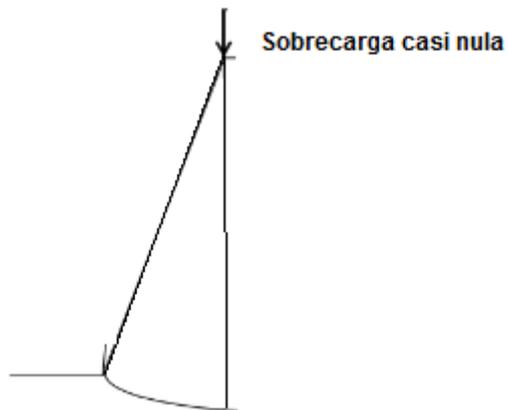


Figura 3.6 Sobrecarga casi nula

Las siguientes partes de la interfaz del programa son calculadas de manera automática gracias a la pre-programación que se realizó en el proceso de diseño del presente programa para el análisis de estabilidad de un talud con suelo heterogéneo.

1) En primer lugar se tendrá que calcular la coordenada geométrica del centro, esto con el fin de poder encontrar el arco de falla existente dentro del talud, este valor se encuentra con ayuda de las coordenadas del final del Talud 2. Para tener una mayor precisión la coordenada en X se considerará siempre igual a 0 y la coordenada en Y se calculará con la fórmula siguiente:

$$Py(\text{del centro}) = (Px^2 + Py^2) / 2Py$$

Tal y como se ve en la siguiente imagen donde se puede verificar que se usaron los valores de las coordenadas del Talud 2 para poder calcular el valor de Py. Este valor corresponde al radio del círculo de falla, debido a que se propone $Px=0$ con el fin de simplificar los cálculos y además para ser más preciso al momento del análisis de la estabilidad del talud, ya que se estaría cubriendo una mayor superficie del talud.

Coordenadas del centro	
Px:	0 Py: 38.398225 m

Coordenadas del centro

2) Posteriormente el programa calculará la distancia que existe entre el pie del talud y lo que se considera el final del Talud 2, esto con el fin de utilizar este valor en los cálculos posteriores del análisis.

La fórmula de la distancia, es igual a=

$$\sqrt{(Px2 - Px1)^2 + (Py2 - Py1)^2}$$

Como se puede observar, la fórmula está dada en valores correspondientes a coordenadas de dos puntos, los cuales como ya se mencionaron son el inicio y el fin del talud.

Distancia entre pie y final del talud 2:	
d:	24.7865205 m

Distancia punto inicial y punto final.

3) Como siguiente punto en el proceso de análisis del programa, se comprobará el valor calculado para el radio del círculo de falla en el primer punto.

Distancia entre el centro y el final del talud 2:	
d:	38.398225 m

Distancia entre centro y final del talud.

Este cálculo únicamente se realiza para tener la certeza de que el radio es correcto en relación al antes calculado.

4) Después de la comprobación del valor calculado para el radio, se procederá a calcular el ángulo de falla, el cual servirá para el análisis correspondiente a cada dovela. El ángulo de falla será diferente para cada dovela según su ubicación, dentro del talud,

Ángulo entre el pie y el final del talud respecto al centro:			
θ :	0.65727991	radianes	
θ :	37.6593651	grados	

Para realizar esta actividad se hace de utilidad la Ley de cosenos, la cual se puede observar en la imagen siguiente,

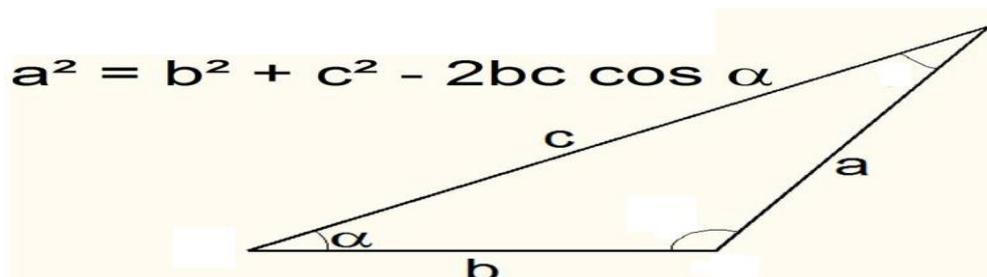


Figura 3.7 Ley de cosenos

5) Para este siguiente punto lo trascendental es calcular los ángulos de inclinación que tiene ambos taludes ya que será fundamental para los cálculos posteriores que realizará el programa en base a la geometría mostrada por el talud. El ángulo de inclinación del primer talud se calcula de la siguiente manera,

$$\theta_1 = \text{angtan}\left(\frac{P_{y1}}{P_{x1}}\right)$$

Ángulo de inclinación	
del talud 1 :	26.5650511:

Para el caso del segundo talud el procedimiento es relativamente igual, solo que las variables cambiarán a los del segundo talud, tal y como se puede observar a continuación,

$$\theta_2 = \text{angtan}\left(\frac{P_{y2}}{P_{x2}}\right)$$

Ángulo de inclinación	
del talud 2 :	0

Sin embargo, en la mayor parte de las ocasiones este ángulo de inclinación es igual a cero ya que el segundo talud no tiene una inclinación

6) Los siguientes valores serán agregados por el usuario con el fin de poder considerar una mayor cantidad de variables, en primer lugar, se deberá introducir el coeficiente de fuerza sísmica, el cual dependerá básicamente de la zona geográfica en la que se encuentre el talud y por consecuencia del tipo de suelo en el que se vaya a diseñar el talud de interés. Como segunda variable a contemplar está la sobrecarga sobre el talud, en esta sección se recomienda aumentar entre un 10 y 15 % más, la sobrecarga calculada, ya que de esta manera se tendrá un mayor margen de seguridad en el análisis del talud.

Es importante mencionar que el valor de la fuerza sísmica es adimensional y por su parte la sobrecarga se deberá ingresar en kg/m² y posteriormente el programa realizará la operación correspondiente para que la sobrecarga tenga como unidades kg/m, al igual que la fuerza sísmica y también el peso propio de cada una de las dovelas.

Csv:	0	Ad.
Csh:	0	Ad.
q:	5099	kg/m ²

Coefficientes sísmicos y sobrecarga.

Respecto a los coeficientes sísmicos, estos serán introducidos en ambas direcciones tomando como referencia el plano, es decir tanto vertical como horizontal, para que **posteriormente se multiplique por la sumatoria del peso propio de la dovela y por la sobrecarga calculada**, tal y como se ve en la fórmula siguiente

$$S=C_s(Q+\Sigma W)$$

Donde:

S=Fuerza sísmica

C_s=Coeficiente sísmico.

Q=Sobrecarga calculada

W=Peso propio de la dovela (en este caso es la sumatoria de todas las dovelas en análisis)

7) Para este siguiente punto lo único que se debe de realizar es introducir el peso volumétrico de agua, o en su caso del líquido que se encontró en el talud. Este dato debe de ser introducido en kg/m³ para obtener compatibilidad de unidades al momento de realizar las operaciones correspondientes.

$\gamma(\text{agua})$		
$\gamma:$	1000	kg/m ³

Es importante indicar la altura que este líquido tiene respecto al pie del talud, la cual se considera como la cota inicial, ubicada en 0 m. Este dato es relevante ya que es a partir de ahí de donde se tomará en cuenta el valor de la presión hidrostática.

Altura del nivel freático tomando como referencia el pie del talud(m):	
$h_w:$	6 m

8) En la siguiente tabla se debe introducir ciertas características correspondientes a cada uno de los 4 estratos que se están analizando, tal y como la cohesión, el peso volumétrico de cada estrato, el ángulo de fricción interna y la cota en la que se encuentra dicho estrato, al igual que para la presión hidrostática, se debe de considerar la cota 0 m al pie del talud, entendiéndose en este caso que la “Altura” (como aparece en la tabla) es el espesor que tiene cada estrato pero teniendo siempre como referencia el pie del talud.

Datos de los estratos					
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Unidad
c	1530	1530	1530	1530	kg/m ²
γ	1835	1835	1835	1835	kg/m ³
ϕ	25	25	25	25	Ad.
Altura	8	0	0	0	m

Tabla 3.2 Características de cada estrato

9) Y finalmente, se obtiene la tabla resumen con los resultados de los cálculos realizados por el programa, en ella se puede ver paso a paso los valores que se necesitarán para finalmente proponer un factor de seguridad y después verificar si se obtiene el mismo factor de seguridad utilizando la fórmula correspondiente al método de Bishop.

Para este último paso se debe de recordar que este método es iterativo por lo que en la mayor parte de las veces el factor de seguridad propuesto no es igual al calculado por lo que es necesario proponer un nuevo valor para realizar los cálculos y nuevamente comparar, así hasta que ambos valores sean iguales o con un error mínimo de 5%.

Resultados

Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uw*b E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tan φ E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sec α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tan α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sen α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cos α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ FR dovela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ FA dovela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.3 Ejemplo de tabla resumen.

CAPÍTULO IV. EJEMPLOS Y COMPARACIONES ENTRE LOS MÉTODOS COMUNES PARA ANÁLISIS DE TALUDES.

Este penúltimo capítulo será la parte práctica de la tesis en la cual se podrá visualizar diferentes ejercicios que servirán como ejemplos tanto para evidenciar el potencial del programa creado en Excel, el cual sirve para el análisis de taludes de hasta 4 estratos diferentes, así como de poder realizar comparaciones entre los distintos métodos antes mencionados en el capítulo 1.

IV.I. Ejemplo del nuevo método, utilizando suelos heterogéneos.

En esta sección se pondrán ejemplos claros de suelos heterogéneos comunes en la práctica y para los cuales fue creado principalmente este proyecto de tesis, un primer ejemplo es el caso siguiente.

La geometría del talud deberá ser un dato por parte del usuario, para este caso específicamente, los datos son los siguientes:

Datos			
Pie de talud:			
Px:	0 m		
Py:	0 m		
Final del talud 1:		Final del talud 2	
Px:	16	Px:	21 m
Py:	17	Py:	17 m
Coordenadas del centro			
Px:	0	Py:	21.47058824 m

Se considerará la siguiente sobrecarga:

Csv:	0	Ad.
Csh:	0.1	Ad.
q:	5000	kg/m ²

Para este preciso ejemplo se considerará un peso volumétrico del agua estándar en cálculos, y el nivel freático es de 8m:

Y(agua)		
Y:	1000	kg/m ³
Altura del nivel freático tomando como referencia el pie del talud(m):		
h _w :	8	m

Los datos siguientes son de diferentes tobas de la zona de los Pedregales de la ciudad de México:

Datos de los estratos					
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Unidad
c	16500	18500	19000	21000	kg/m ²
Y	1937	1280	1223	1530	kg/m ³
φ	40	35	38	36	Ad.
Altura	7	11	14.5	17	m

Tabla 4.1 Características de diferentes tobas

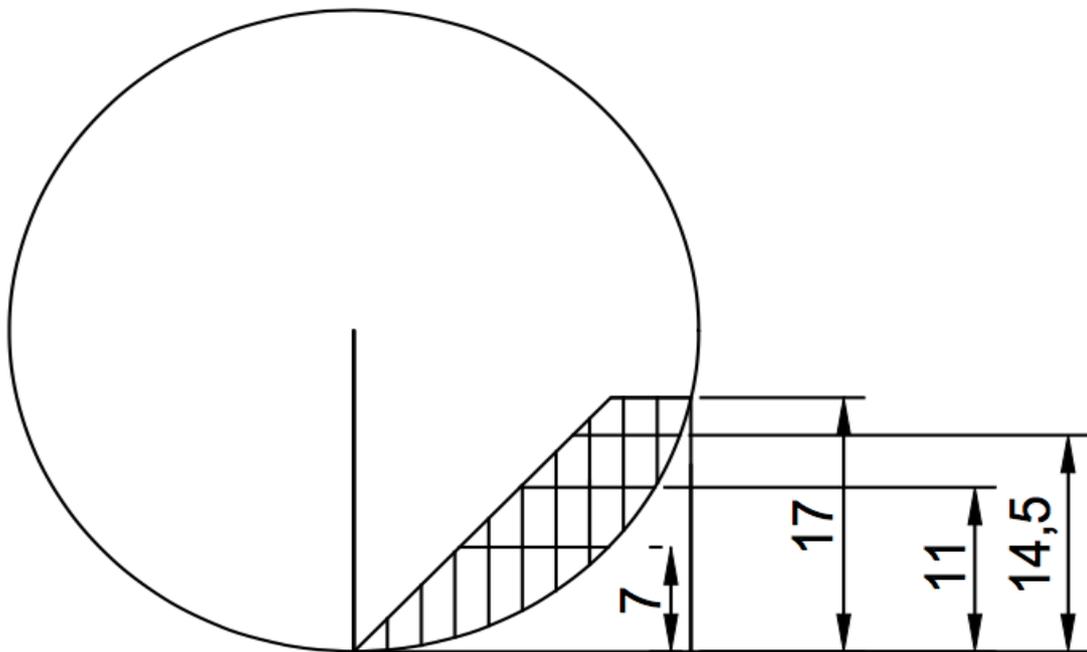


Figura 4.1 Geometría del talud.

Posteriormente a la introducción de datos a la hoja programada de Excel, llegamos a las siguientes tablas de resultados, para cada uno de los estratos:

Tabla 4.2 Resumen de estrato 1

Resultados										
ESTRATO 1										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E1	34650.000	34650.000	34650.000	34650.000	34650.000	34650.000	34650.000	34650.000	FALSO	FALSO
W E1	4433.528	12669.039	20038.980	26489.379	19559.579	14760.398	8551.898	493.476	0.000	0.000
V E1	29433.528	37669.039	45038.980	51489.379	44559.579	39760.398	33551.898	25493.476	FALSO	FALSO
Uw*b E1	14646.051	14212.11	13331.307	11975.779	10097.873	7620.237	4415.022	254.763	FALSO	0.000
tan φ E1	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.839	0.000	0.000
Sec α E1	1.009	1.038	1.090	1.169	1.287	1.461	1.726	2.157	0.000	0.000
tan α E1	0.137	0.279	0.433	0.605	0.810	1.064	1.406	1.912	0.000	0.000
Sen α E1	0.136	0.269	0.397	0.518	0.629	0.729	0.815	0.886	0.000	0.000
Cos α E1	0.991	0.963	0.918	0.855	0.777	0.685	0.579	0.464	0.000	0.000
Σ FR dovela	42601.82471	45704.63333	48966.88549	52562.06044	48702.55662	47536.07438	46780.24909	46252.05267	0.000	0.000
Σ FA dovela	23875.55014	29456.24754	36301.01772	43833.68189	43634.1675	42718.84784	38973.11036	31891.06626	0	0

Tabla 4.3 Resumen de estrato 2

ESTRATO 2										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E2	0	0	0	38850.000	38850.000	38850.000	38850.000	38850.000	38850	0
W E2	0	0	0	2175.600	8173.200	10752.000	10752.000	10752.000	3927.265025	0
V E2	0	0	0	27175.600	33173.200	35752.000	35752.000	35752.000	28927.265025	0
Uw*b E2	0	0	0	2100.000	2100.000	2100.000	2100.000	2100.000	2100.000	0
tan φ E2	0	0	0	0.700209667	0.700209667	0.700209667	0.700209667	0.700209667	0.700209667	0
Sec α E2	0	0	0	1.169	1.287	1.461	1.726	2.157	2.950	0
tan α E2	0	0	0	0.605451411	0.809526443	1.06449348	1.406487758	1.911664309	2.775167947	0
Sen α E2	0	0	0	0.517920534	0.629199469	0.728840802	0.815001592	0.886088215	0.940785863	0
Cos α E2	0	0	0	0.855428734	0.777243869	0.684683200	0.579458717	0.463516635	0.339001415	0
Σ FR dovela	0	0	0	46309.02634	49767.60364	52227.75913	54266.40218	57578.89169	57764.75199	0
Σ FA dovela	0	0	0	31241.07631	36469.86371	39797.36355	40766.19688	40981.02376	34017.25661	0

Tabla 4.4 Resumen de estrato 3

ESTRATO 3										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	39900.000	39900.000	39900.000	39900.000	39900.000
W E3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1555.503	4280.500	4280.500	4280.500	1180.973
V E3	0	0	0	0	0	26555.503	29280.500	29280.500	29280.500	26180.973
Uw*b E3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tan φ E3	0	0	0	0	0	0.781288124	0.781	0.781	0.781288124	0.781
Sec α E3	0	0	0	0	0	1.461	1.726	2.157	2.950	4.803
tan α E3	0	0	0	0	0	1.06449348	1.406	1.912	2.775167947	4.697
Sen α E3	0	0	0	0	0	0.728840802	0.815	0.886	0.940785863	0.978
Cos α E3	0	0	0	0	0	0.684683200	0.579	0.464	0.339001415	0.208
Σ FR dovela	0	0	0	0	0	48358.69177	51616.51207	54314.01237	58449.69583	62069.19842
Σ FA dovela	0	0	0	0	0	33094.58143	35491.91408	35246.70387	34349.57508	29785.52682

Tabla 4.5 Resumen de estrato 4

ESTRATO 4										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	44100.000	44100.000	44100.000	44100.000
W E4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	3825.000	3825.000	3825.000	3825.000
V E4	0	0	0	0	0	0	28825.000	28825.000	28825.000	28825.000
Uw*b E4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
tan φ E4	0	0	0	0	0	0	0.726544772	0.727	0.726544772	0.726544772
Sec α E4	0	0	0	0	0	0	1.726	2.157	2.950	4.803
tan α E4	0	0	0	0	0	0	1.406487758	1.912	2.775167947	4.697441832
Sen α E4	0	0	0	0	0	0	0.815001592	0.886	0.940785863	0.978082854
Cos α E4	0	0	0	0	0	0	0.579458717	0.464	0.339001415	0.208216065
Σ FR dovela	0	0	0	0	0	0	55516.38249	58739.89734	63609.87456	70788.01734
Σ FA dovela	0	0	0	0	0	0	35120.68086	34843.09069	33921.04712	32371.60416

Tabla 4.6 Resumen de resumen de 4 estratos

Sumatoria de estratos										
Σ FR dovela	42601.82471	45704.63333	48966.88549	98871.08677	98470.16026	148122.5253	208179.5456	216884.8541	179824.322	132857.216
Σ FA dovela	23875.55014	29456.24754	36301.01772	75074.7582	80104.03122	115610.7929	150351.9022	142961.8846	102287.8786	62157.13099

Y finalmente, se obtiene el resultado final que es el Factor de seguridad para las características del talud en análisis:

F.S. = 1.491702648

IV.II. Ejemplo comparativo con los otros métodos.

El siguiente ejercicio se realizará con 4 métodos distintos que son el método de Janbú, el método de Bishop y Morgenstern, el método simplificado del Ing. Agustín Deméneghi y finalmente el método programado en Excel hecho para esta presente tesis.

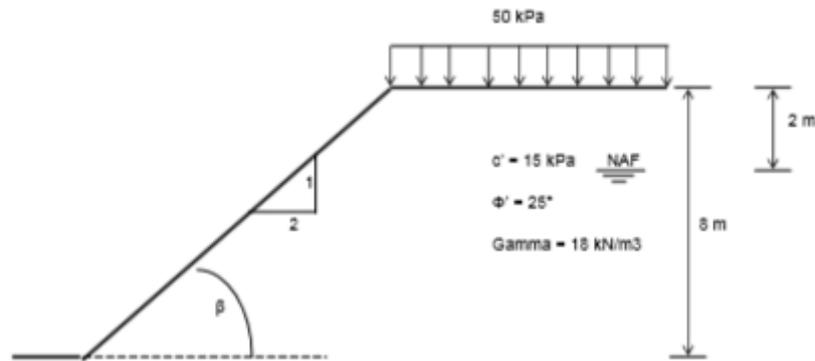


Figura 4.2 Ejemplo talud homogéneo.

IV.II. I. Método de Janbú.

Solución

$$q/\gamma H = 50/18(8) = 0.347, \mu_q = 0.935$$

$$\mu_w = 1 \text{ (figura 5b, } H_w = 0)$$

$$H_t/H = 1/8 = 0.125, \mu_t = 0.97$$

Reemplazando en la ecuación

$$\mu_d = \mu_w \mu_q \mu_t = (1)(0.935)(0.97) = 0.907$$

Utilizando la ecuación

$$p_d = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w}{\mu_d} = \frac{18(8) + 50}{0.907} = 213.89 \text{ kPa}$$

$$H_w'/H = 6/8 = 0.75, \mu_w' = 0.956$$

$$\mu_e = \mu_q \mu_w' = (0.935)(0.956) = 0.894$$

$$p_e = \frac{\gamma H + q - \gamma_w H_w'}{\mu_e} = \frac{18(8) + 50 - 9.81(6)}{0.894} = 151.16 \text{ kPa}$$

Sustituyendo en la ecuación

$$\lambda_{c\phi} = (p_e \tan \phi) / c = (151.16 \tan 25^\circ) / 15 = 4.7$$

De la figura 7a: $N_{cf} = 19.1$

$$FS = N_{cf} c / p_d = 19.1(15) / 213.89 = 1.339$$

Coordenadas del centro del círculo crítico

De la figura 7: $x_o = 0.6, y_o = 1.8$

$X_o = 0.6(8) = 4.8 \text{ m}, Y_o = 1.8(8) = 14.4 \text{ m}$, medidos a partir del pie del talud

IV.II. II. Método de Bishop y Morgenstern.

Solución

$$H' = H + \frac{q}{\gamma H} = 8 + \frac{50}{18} = 10.778m$$

$$\frac{c'}{\gamma H} = \frac{15}{18(10.778)} = 0.0773$$

Valor de $c'/\gamma H'$ mayor que 0.0773

$$\frac{c'}{\gamma H} = 0.1$$

Talud: 2 (horizontal) a 1 (vertical), D = 1.25: m = 2.19, n = 1.63

$$u_w = 9.81(6) = 58.86kPa$$

$$r_u = \frac{58.86}{18(10.778)} = 0.303$$

$$FS_1 = 2.19 - 0.303(1.63) = 1.695$$

Valor de $c'/\gamma H'$ menor que 0.0773

$$\frac{c'}{\gamma H} = 0.075$$

Talud: 2 (horizontal) a 1 (vertical), D = 1.0: m = 1.86, n = 1.38

$$u_w = 9.81(6) = 58.86kPa$$

$$r_u = \frac{58.86}{18(10.778)} = 0.303$$

$$FS_2 = 1.86 - 0.303(1.38) = 1.442$$

Interpolando los valores de los factores de seguridad

$$FS = 1.465$$

IV.II. III. Método simplificado del Ingeniero Agustín Deméneghi.

Solución

Mediante iteraciones se encuentra que la cuña de deslizamiento crítica tiene un ángulo $\theta = 47^\circ$. Con este valor y aplicando las ecuaciones 30 a 44 obtenemos los siguientes valores

$$\varepsilon = 47^\circ$$

$$L = 10.94 \text{ m}$$

$$A_a = 29.84 \text{ m}^2$$

$$W_a = 537.13 \text{ kN}$$

$$D = 7.46 \text{ m}$$

$$Q_a = 373.01 \text{ kN}$$

$$C_a = 164.08 \text{ kN}$$

$$S_{na} = 0$$

$$B = 16 \text{ m}$$

$$A_b = 64 \text{ m}^2$$

$$W_b = 1152 \text{ kN}$$

$$C_b = 240 \text{ kN}$$

$$S_{nb} = 0$$

Usando las ecuaciones 22 a 26

$$V_a = 910.13 \text{ kN}$$

$$V_b = 1152 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_R = 898.55 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_A = 665.63 \text{ kN}$$

$$FS = 1.35$$

IV. II. IV. Método programado en Excel por Domínguez Martín

Como parte inicial del proceso debemos ingresar los datos siguientes:

Para este caso se aproxima una figura geometría muy parecida a la del talud en análisis:

Datos				
Pie de talud:				
Px:	0	m		
Py:	0	m		
Final del talud 1:		Final del talud 2		
Px:	16	Px:	23.46	m
Py:	8	Py:	8	m
Coordenadas del centro				
Px:	0	Py:	38.398225	m

Debido a que el ejemplo es para un talud de suelo homogéneo, en la siguiente tabla los datos para todos los estratos son iguales:

Datos de los estratos					
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Unidad
c	1530	1530	1530	1530	kg/m ²
y	1835	1835	1835	1835	kg/m ³
φ	25	25	25	25	Ad.
Altura	8	0	0	0	m

Tabla 4.7 Datos del estrato del talud homogéneo

La altura del nivel freático es de 6m y el peso volumétrico del agua es el estándar:

y(agua)		
y:	1000	kg/m ³
Altura del nivel freático tomando como referencia el pie del talud(m):		
hw:	6	m

Para este caso se hace la conversión de los 50 kpa a 5099 kg/m².

Csv:	0	Ad.
Csh:	0	Ad.
q:	5099	kg/m ²

Posteriormente obtendremos una tabla de resultados como las siguientes:

Resultados

ESTRATO 1										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E1	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38	3589.38
W E1	2447.682	6878.86245	10684.53849	13850.25504	16353.25579	18161.02316	20845.48733	16063.86813	10401.11122	3746.057798
V E1	40486.222	44917.402	48723.078	51888.795	54391.796	56199.563	58884.027	54102.408	48439.651	41784.598
Uw*b E1	14033.958	13696.91	13018.992	11992.320	10604.495	8837.796	6667.939	4062.152	976.180	0
tan ϕ E1	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890	0.46630890
Sec α E1	1.00216399	1.008703032	1.019760866	1.035585716	1.056544204	1.083142865	1.116059692	1.156189575	1.204709725	1.263174759
tan α E1	0.065822961	0.132218783	0.199780440	0.269142666	0.341006825	0.416171199	0.495569606	0.580322610	0.671807652	0.771758040
Sen α E1	0.065680829	0.131078006	0.195909106	0.259894146	0.322756799	0.384225583	0.444035031	0.501926866	0.557651051	0.610966958
Cos α E1	0.997840683	0.991372051	0.980622058	0.965637112	0.946481932	0.923239243	0.896009421	0.864910064	0.830075471	0.791656097
Σ FR dovela	15483.51793	17242.62285	18879.6291	20420.3978	21885.2214	23289.57651	25327.75355	24499.09257	23595.73347	21433.09049
Σ FA dovela	2659.168664	5887.68359	9545.294784	13485.59411	17555.3219	21593.30992	26146.57128	27155.4522	27012.42274	25529.00861

Tabla 4.8 Resultados de talud homogéneo

Para este caso solo obtenemos datos en la primera tabla denominada ESTRATO 1, y a partir de la tabla ESTRATO 2 (como se observa en la imagen) obtenemos valores de cero debido a que como el ejemplo es para un suelo homogéneo únicamente podemos analizar un estrato.

ESTRATO 2										
Dovela #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
cb E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
W E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Uw*b E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tan ϕ E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sec α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tan α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sen α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cos α E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ FR dovela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ FA dovela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La siguiente tabla es el resumen de los calculados realizados por dovela, con relación a las fuerzas resistentes y a las fuerzas actuantes, para posteriormente sumar cada uno de los valores y empezar a iterar con valores aproximados al factor de seguridad, ya que como se explicó con anterioridad el método es iterativo y en un inicio se debe de intentar aproximar dicho valor y posteriormente se calculará el factor de seguridad real con la metodología que ya fue explicada, si el valor calculado no es el mismo al propuesto se recomienda utilizar este valor que se calculó

de tal manera que en una segunda iteración este valor pasará a ser el valor aproximado propuesto. Se debe de hacer esto hasta que el valor del factor de seguridad calculado y el propuesto sean iguales.

Sumatoria de estratos																						Σ
Σ FR dovela	15483.5179	17242.6228	18879.6291	20420.3978	21885.2214	23289.5765	25327.7535	24499.0925	23595.7334	21433.0904												212056.6357
Σ FA dovela	2659.1686	5887.6835	9545.2947	13485.5941	17555.3219	21593.3099	26146.5712	27155.4522	27012.4227	25529.0086												176569.8278

Tabla 4.9 Resumen de análisis de talud homogéneo

Finalmente obtenemos el siguiente resultado del análisis del talud para un suelo homogéneo.

F.S.=	1.2009788
--------------	------------------

Como podemos observar los valores son muy cercanos entre uno y otro por lo cual al menos para el valor calculado con este nuevo método ofrece una mayor garantía de que el resultado es verídico ya que el resultado está dentro del margen de error, además de que este resultado es más conservador que el resto por lo que se está de lado de la seguridad.

En la siguiente tabla resumen se puede visualizar los resultados.

	Método Janbú	Método Bishop y Morgenstern	Método simplificado Ing Deméneghi	Método programado Domínguez Martín
F.S.=	1.339	1.465	1.35	1.2009788

Tabla 4.10 Resumen de resultados de diferentes métodos para un talud homogéneo

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Para esta presenta tesis se ha cumplido los objetivos y alcances propuestos en el inicio del mismo, ya que principalmente se logró diseñar un programa computarizado capaz de analizar la estabilidad de un talud, lo cual como se mencionó en un principio, era el objetivo principal, posteriormente se añadieron ciertas mejoras que hacen de esta presente tesis un proyecto de mayor relevancia en la práctica profesional, dentro de estas mejoras están las siguientes:

- 1) Se logró diseñar un programa para el análisis de un talud con suelo cohesivo-friccionante; el cuál además puede ser heterogéneo (hasta 4 estratos diferentes), lo que usualmente se encuentra más en el diseño de la práctica profesional.
- 2) Además, este programa se diseñó en un software que es muy común dentro de los programas básicos que suele tener cargada una computadora, como lo es “Excel”, por lo que este programa se puede considerar fácil y práctico en su utilización.
- 3) A lo largo de la programación de prueba y error que se ha hecho con este programa se pudo observar ciertos errores mínimos que se presentan en los cálculos del método de Bishop, esto se ve principalmente en la geometría del talud, la cual es realmente complicada programar con exactitud, sin embargo, como ya se comentó este error es mínimo y está del lado de la seguridad por lo que puede entenderse que no se correrá ningún tipo de riesgo al momento de utilizar el presente programa.
- 4) Un mejoramiento que se podría agregar a este programa podría ser el dar la oportunidad de elegir al usuario una mayor cantidad de estratos para el talud ya que esto beneficiaría el diseño de dicho usuario, sin embargo, se debe de considerar utilizar otro software con mayor potencial que Excel ya que este programa tiene ciertas limitantes que impedirían la correcta programación de dicho programa con esas características en particular.

BIBLIOGRAFÍA.

- Abramson L., L. T. (s.f.). *“Slope Stability and Stabilization Methods”*. John Wiley and Sons, INC.
- Bishop, A. W., & Morgenstern, N. (1960). *Stability coefficients for earth slopes*. Géotechnique.
- Budhu, M. (2007). *Soil Mechanics and Foundations*. John Wiley & Sons.
- Castañón, G. (2011). *Tesis de Licenciatura “Cálculo del Factor de Erosión de la Lluvia*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería.
- Deméneghi C., A., & Magaña T., R. (2006). *Apuntes de mecánica de suelos*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería.
- Janbú, N. (1954). *Stability analysis of slopes whith dimensionless parameters*. U.S.A: Harvard University.
- Juárez B., E., & Rico R., A. (1983). *Mecánica de Suelos*. México: Grupo Noriega Editores, Limusa.
- Lambe, T., & Whitman, R. V. (2002). *Mecánica de Suelos*. México: Grupo Noriega Editores, Limusa.
- Payan, A. (2015). *Tipos y Fallas de Taludes*. Yucatán: Instituto Tecnológico de Mérida Yucatán.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos análisis geotécnico*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Withlow, R. (2000). *Fundamentos de mecánica de suelos*. México: Compañía Editorial Continental S.A de C.V.