4. Estabilidad de taludes

Se define como talud a 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.

La falla de un talud se presenta tanto en taludes naturales como en los construidos por el hombre. Muchos proyectos de ingeniería resultan afectados o afectan la estabilidad de taludes al producir modificaciones en la topografía, condiciones de flujo agua, pérdida de resistencia, cambio en los estados de esfuerzo, por mencionar algunos factores.

En este caso, la finalidad de los análisis de estabilidad de taludes es estimar la posibilidad de falla de éstos al provocarse un deslizamiento de la masa de suelo que lo forma, buscando que el diseño de excavaciones y rellenos que den lugar a un talud o afecten la estabilidad de una ladera se realicen de forma segura y económica.

El análisis convencional de estabilidad de taludes en dos dimensiones busca el determinar la magnitud de las fuerzas o momentos actuantes que provoquen el movimiento y determinar la magnitud de las fuerzas o momentos resistentes que se opongan al movimiento que actúan en los suelos que forman al talud.

Para lograr lo anterior se calcula la relación entre las fuerzas o momentos resistentes y las fuerzas o momentos actuantes obteniendo un factor seguridad que está afectado por las incertidumbres de los parámetros que le dieron origen, por lo cual, a todo factor de seguridad intrínsecamente va ligado un grado de incertidumbre.

4.1 Factores que influyen en la estabilidad de un talud

La falla de un talud o ladera se debe a un incremento en los esfuerzos actuantes o a una disminución de resistencia al esfuerzo cortante del suelo. Esta variación, en general, es causada por efectos naturales y actividades humanas.
Según Budhu (2007) los factores principales que afectan la estabilidad de

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

un talud, natural o diseñado son:

a) Erosión

El agua y el viento continuamente afectan a los taludes erosionándolos. La erosión modifica la geometría del talud y por tanto los esfuerzos a los que está sometido, resultando un talud diferente al inicialmente analizado o en una modificación de las condiciones que tenía, figura 4.1.

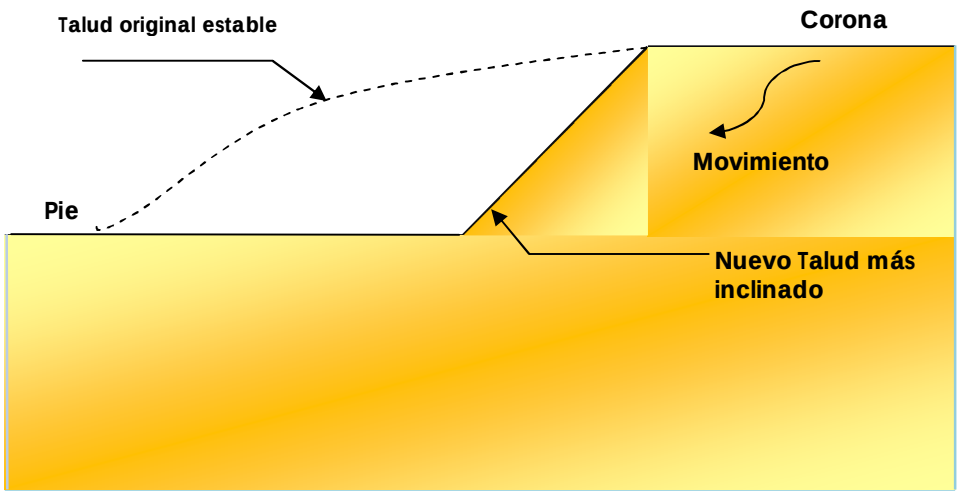


Figura 4.1. *Variación de la geometría de un talud por erosión (Montoya, 2009)*

b) Lluvia

Durante el periodo de lluvias, los taludes se ven afectados al saturarse los suelos que los forman, provocando un aumento de peso de la masa, una disminución en la resistencia al esfuerzo cortante y la erosión de la superficie expuesta. Al introducirse agua en las grietas que presente el talud se origina un incremento en las fuerzas actuantes o aparición de fuerzas de filtración, pudiendo provocar la falla del mismo, figura 4.2.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

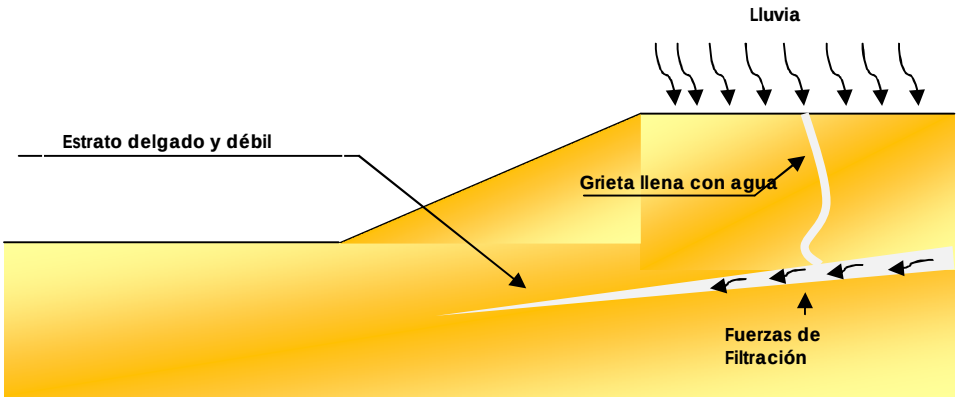


Figura 4.2 *Talud sometido a lluvia. (Montoya, 2009)*

c) Sismo

Los sismos suman fuerzas dinámicas a las fuerzas estáticas actuantes a las que esta cometido un talud, provocando esfuerzos cortantes dinámicos que reducen la resistencia al esfuerzo cortante, debilitando al suelo. Un aumento en la presión de poro en taludes formados por materiales granulares puede provocar el fenómeno conocido como licuación, figura 4.3.

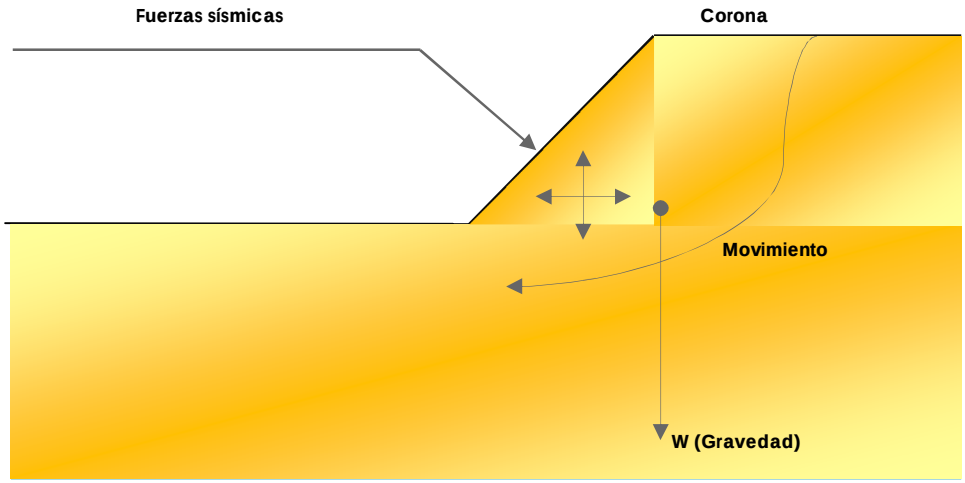


Figura 4.3 *Fuerzas debidas a la gravedad y fuerza provocadas por sismos. (Montoya, 2009)*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

d) Aspectos geológicos

Algunas fallas de taludes son provocadas por aspectos geológicos no detectados durante el levantamiento y exploración de campo, los cuales, al no ser considerados durante la evaluación de la estabilidad del talud, aumentan la incertidumbre del factor de seguridad calculado, figura 4.4.

Un ejemplo de este tipo de falla es el que se presentó durante la operación del Proyecto Hidroeléctrico en el talud excavado atrás de la casa de maquinas de la presa Agua Prieta, Herrera y Resendiz (1990), en el cual un bloque de roca deslizó sobre un estrato de arcilla, no detectado durante la exploración y construcción del proyecto.

Figura 4.4 *Aspectos geológicos que pueden provocar la falla de un talud. (Montoya, 2009)*

e) Cargas externas

La aplicación de cargas sobre la corona del talud provocan un aumento en las fuerzas actuantes en la masa de suelo, lo cual puede llevar a la falla del talud si estas cargas no son controladas o tomadas en cuenta durante la evaluación de la estabilidad del talud, figura 4.5.

En algunos casos esta situación se remedia mediante la excavación de una o más bernas en el cuerpo del talud, lo que reduce las fuerzas actuantes en éste.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

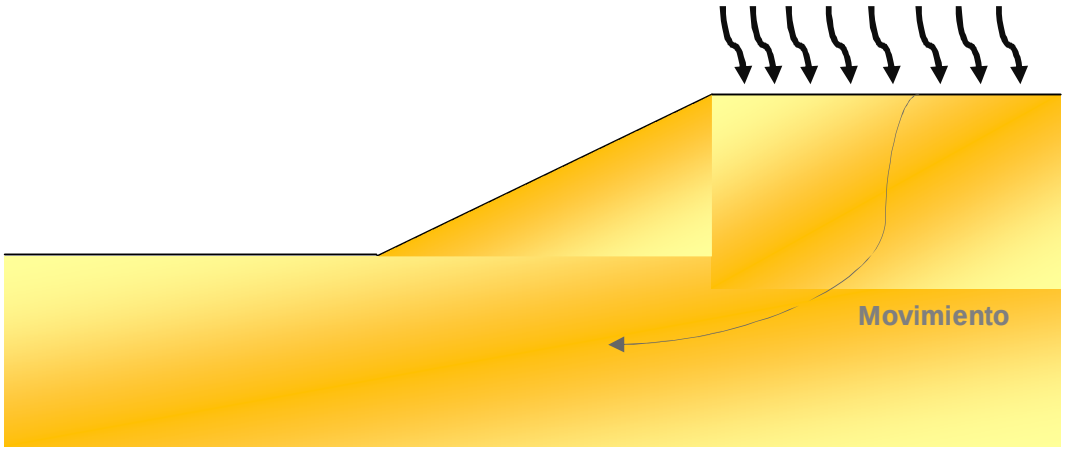


Figura 4.5 *Sobre carga en la corona del talud. (Montoya, 2009)*

f) Excavaciones y/o rellenos

Las actividades de construcción realizadas al pie de un talud o colocación de una sobrecarga en la corona, pueden causar la falla de éste al modificar la condición de esfuerzos a las que ésta sometido.

Generalmente, estas actividades de construcción corresponden a trabajos donde se realizan excavaciones y/o rellenos.
Cuando se realiza una excavación al pie del talud, el esfuerzo total se disminuye, generando en el suelo un incremento negativo en la presión de poro. Durante el tiempo en que este incremento de presión de poro se disipa, puede presentarse la falla del talud al disminuir la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, figura 4.6.

Los taludes construidos con el material de banco de préstamo se realizan al compactar estos materiales en el sitio bajo especificaciones de control, generando un relleno artificial o terraplén.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

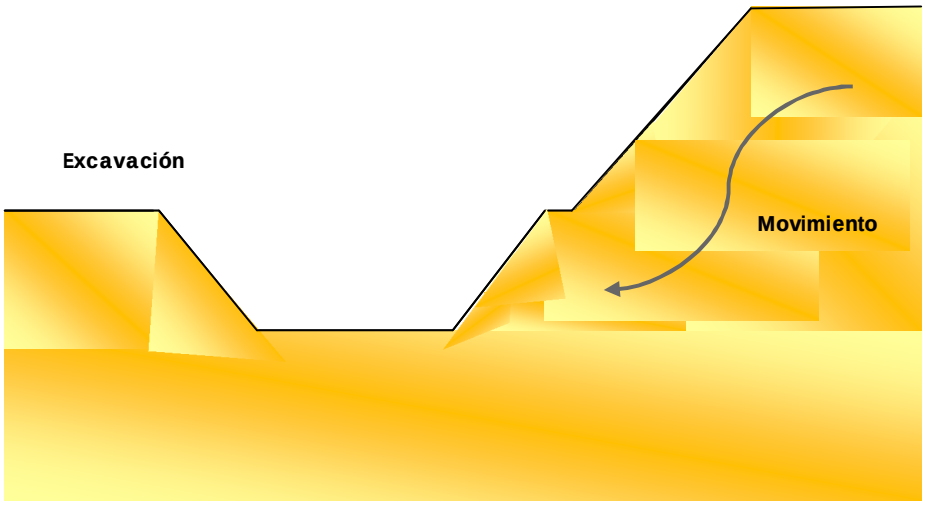


Figura 4.6 *Excavación en el pie del talud. (Montoya, 2009)*

4.1.1 Condición de presión de poro y vaciado rápido

Los embalses pueden estar sujetos a un cambio rápido en su nivel de agua y se ven sujetos a una reducción de la fuerza lateral que proporciona el agua, además de que el exceso de presión de poro no tiene tiempo de disiparse, figura 4.7.

En ese tiempo se puede presentar la falla del talud. Si el nivel de agua en el embalse permanece en niveles bajos y la falla no ocurre mientras presenta condiciones de resistencia al esfuerzo cortante no drenadas, el flujo que se presenta y las fuerzas de filtración pueden provocar la falla del talud, figura 4.8.

4.2 Tipos de falla

Toda masa de suelo que constituya un talud natural, terraplén o corte, presenta una tendencia a desplazarse hacia la parte baja y al frente por efecto de su propio peso. Cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo contrarresta esa tendencia, el talud es estable; en caso contrario, se produce un deslizamiento.

La clasificación de deslizamientos se basa en la forma que se produce el movimiento de la masa de suelo, como se trata a continuación.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

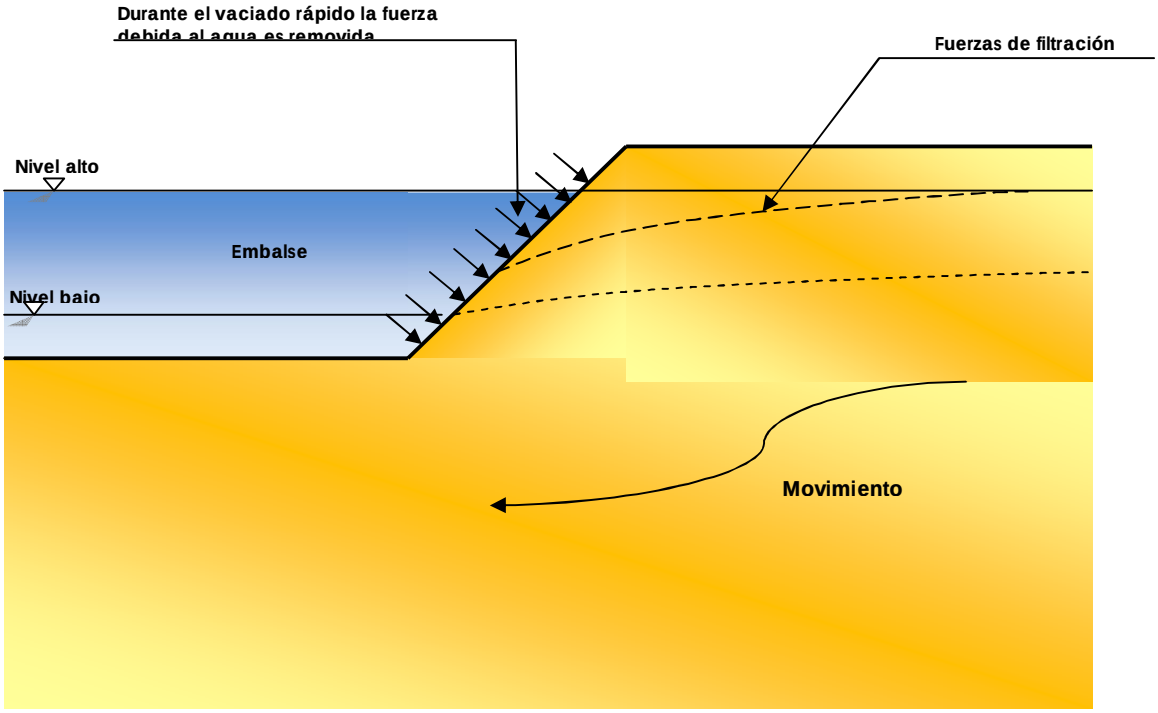


Figura 4.7 *Vaciado rápido. (Montoya, 2009)*

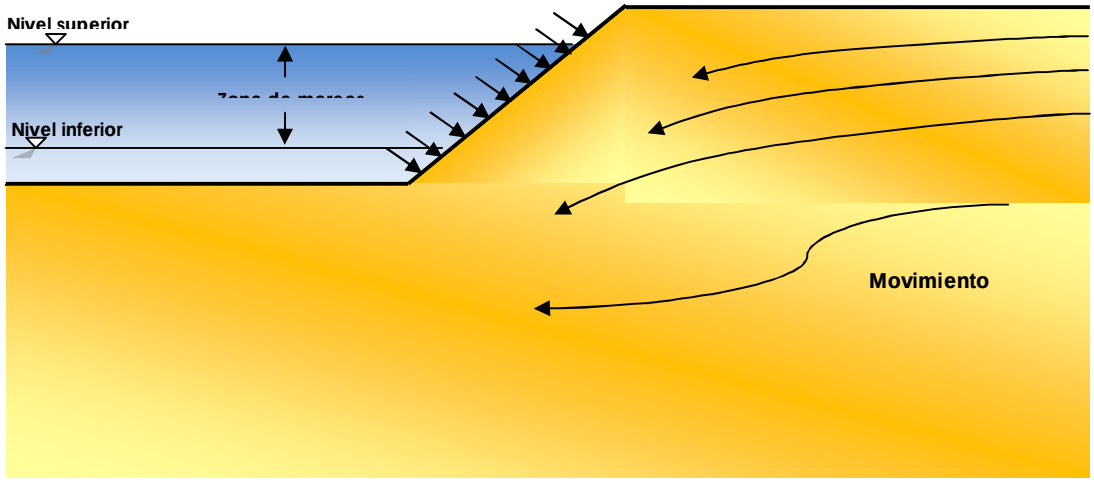


Figura 4.8 *Fuerza de filtración generadas por el cambio de nivel de embalse. (Montoya, 2009)*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

4.2.1 Falla por deslizamiento superficial

A. Rico (2000) define esta falla como “un proceso más o menos continuo y por lo general lento de deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas naturales”. Además del término deslizamiento superficial, se utiliza la palabra inglesa “creep” para definir este de falla.

Este tipo de falla suele afectar grandes áreas de terreno. El movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y la masa inmóvil más profunda. No se presenta una superficie de falla definida.

Terzaghi (1959) distingue dos clases de deslizamiento superficial: 1) el estacional, que afecta sólo a la corteza superficial del talud cuyos suelos sufren la influencia de los cambios climáticos en forma de expansiones y contracciones humedecimiento y secado; 2) el masivo, que afecta a capas de suelo más profundas, no afectadas por el clima, por lo que sólo se puede atribuir al efecto de factores internos que actúan en los suelos.

El creep estacional produce movimientos que pueden variar con la época del año. La velocidad del movimiento rara vez excede algunos centímetros por año.

Otro tipo de falla por deslizamiento superficial se presenta en la costra de suelo sobre un estrato que por condiciones geológicas es favorable al deslizamiento en una superficie de falla predefinida.

En general este tipo de movimiento está asociado a estratigrafías cuyo echado está en dirección del talud y que además se acelera al presentarse flujo de agua dentro del cuerpo del talud, figura 4.9

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

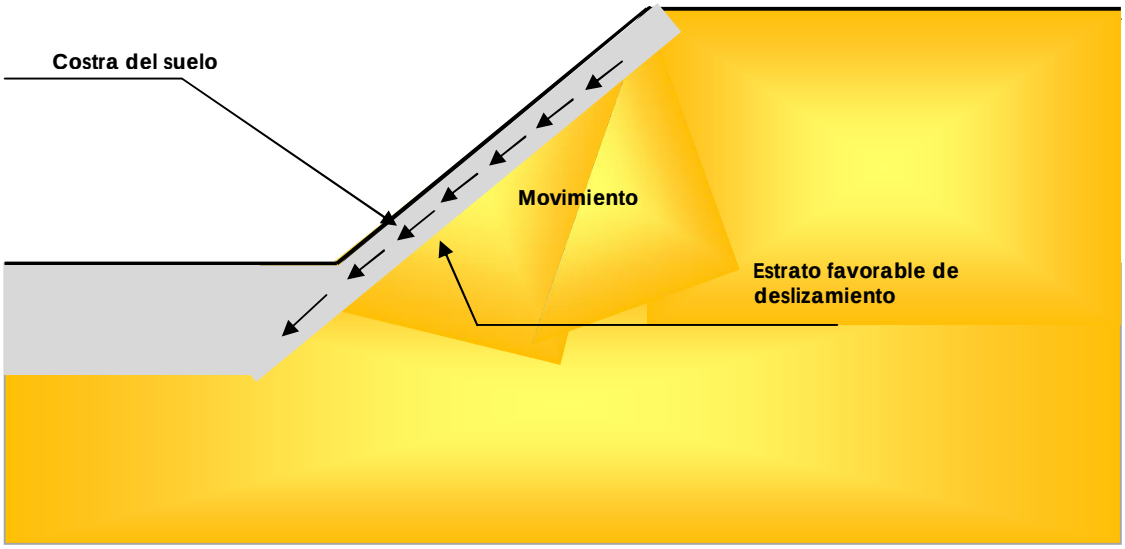


Figura 4.9 *Falla por deslizamiento superficial sobre un estrato favorable al deslizamiento. (Montoya, 2009)*

4.2.2 Falla por rotación

El deslizamiento ocurre abarcando una masa considerable de suelo que afecta a profundidad la geometría del talud. Este tipo de falla presenta una superficie cilíndrica o concoidal, sobre la cual se produce el movimiento, generalmente de forma súbita. La falla por rotación se clasifica con respecto a la profundidad en que se presenta la superficie de falla y el punto donde esta superficie corta a los planos que forman la geometría del talud.

4.2.3 Falla local

Ocurre cuando la superficie de falla corta al plano inclinado del talud entre el hombro y el pie, sin cortar el pie del talud, figura 4.10 Coloquialmente a este tipo de falla se le conoce como "desconchamiento" y en la mayoría de los casos no corresponde a una falla catastrófica. Al provocar un cambio en la geometría del talud puede propiciar la aparición de fallas subsecuentes que lleven a la falla catastrófica del talud.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

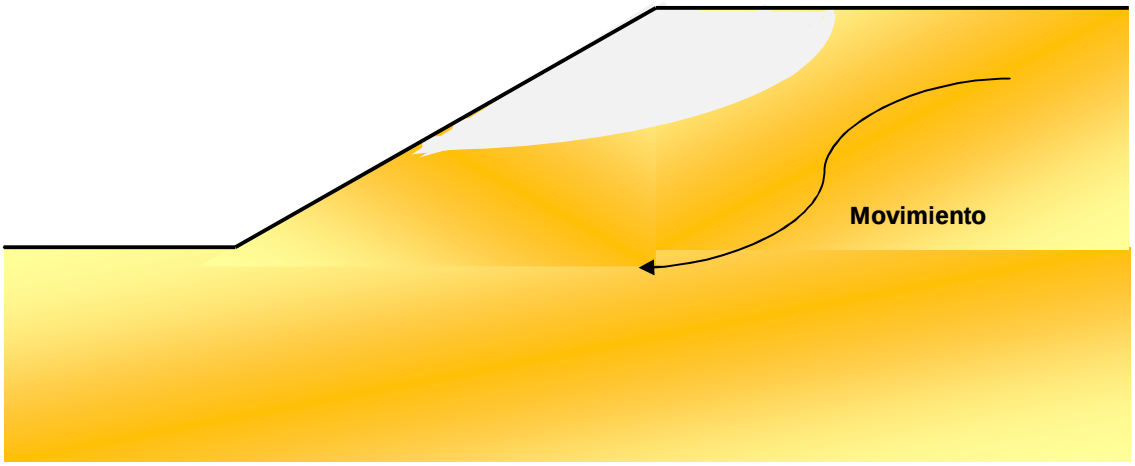


Figura 4.10 *Falla local. (Montoya, 2009)*

4.2.3.1 Falla de pie

Se presenta cuando la superficie de falla tiene cercanía del pie del talud, figura 4.11, y corresponde a una falla catastrófica del talud.

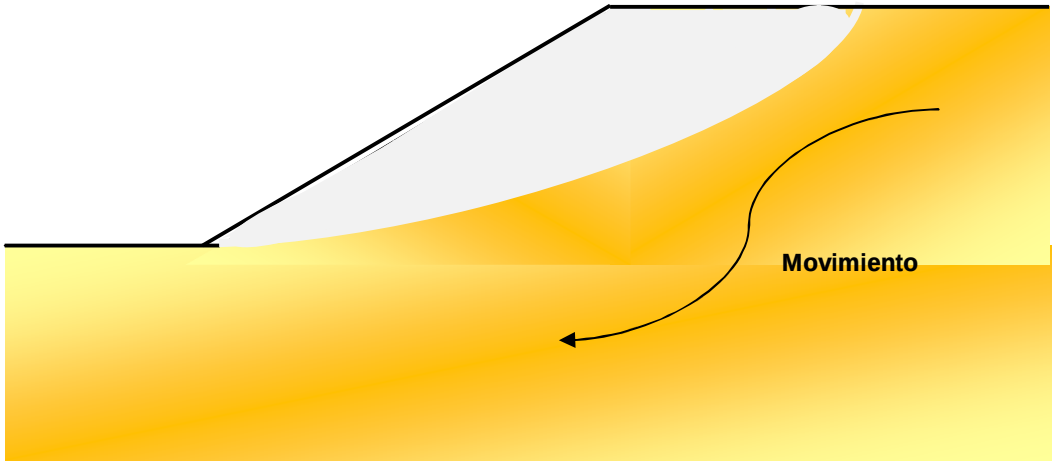


Figura 4.11 *Falla de pie. (Montoya, 2009)*

4.2.4 Falla de base

Ocurre cuando la superficie de falla corta al plano horizontal que forma la base del talud, figura 4.12, y corresponde a una falla general de toda la geometría del talud. Presenta la mayor profundidad y puede estar limitada por estratos más resistentes.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

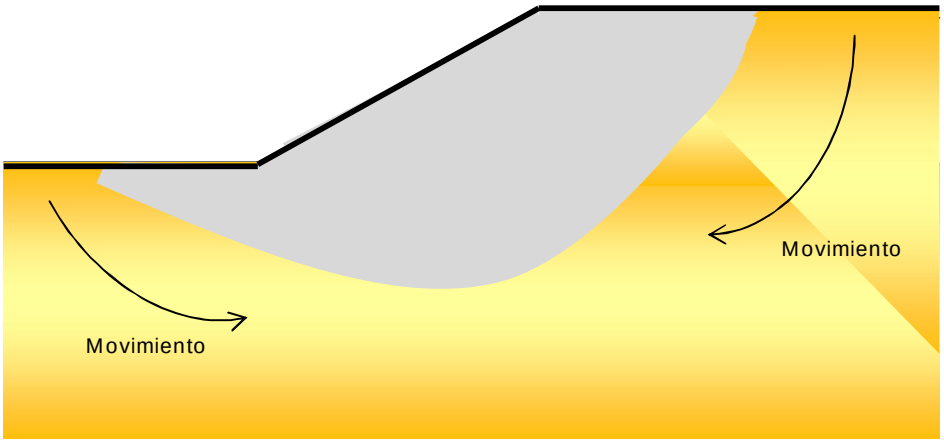


Figura 4.12. *Falla de base. (Montoya, 2009)*

4.2.5 Falla por traslación

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, figura 4.13.

La superficie de falla se desarrolla paralela a la estratificación de suelos débiles, terminando generalmente sobre planos de agrietamientos verticales. Los estratos débiles que propician la aparición de este mecanismo de falla por lo general corresponden a arcillas blandas, arenas finas o limos no plásticos, que se encuentran empacados entre estratos de suelos de mayor resistencia.

Generalmente el factor que provoca la activación del mecanismo de falla es un aumento en las condiciones de presión de poro en el estrato débil.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

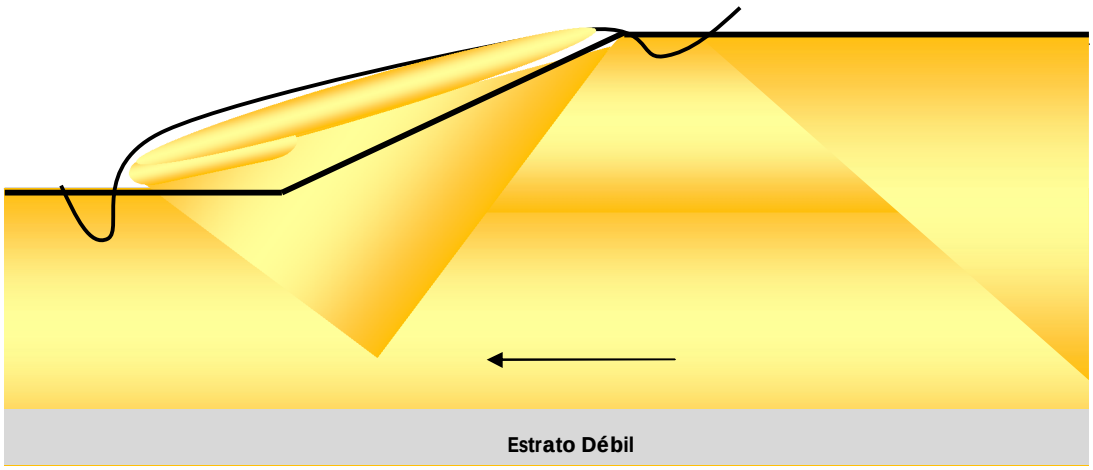


Figura 4.13 *Falla por traslación. (Montoya, 2009)*

4.2.6 Falla por flujo

Corresponde a movimientos relativamente rápidos de una parte del talud, de forma que esos movimientos y las velocidades en las que ocurren, corresponden al comportamiento que presentaría un líquido viscoso. No se distingue una superficie de deslizamiento debido a que ésta se presenta en un periodo breve de tiempo.

Esta falla se presenta con mayor frecuencia en taludes naturales formados por materiales no "consolidados" y se desarrolla el mecanismo cuando hay un aumento apreciable en el contenido de agua. La figura 4.14, Rico (2000), muestra algunos deslizamientos de este tipo.

4.2.7 Falla por licuación

El fenómeno de licuación se presenta cuando se provoca una reducción rápida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo. Esta pérdida conduce al colapso del suelo en que se presenta y con ello al de la estructura que forme o que se encuentre sobre este.

La licuación se ha presentado con mayor frecuencia en arenas finas, sumergidas sometidas a un incremento en la presión de poro por efecto de vibraciones o sismo alcanzando su gradiente crítico, lo que desencadena el fenómeno.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

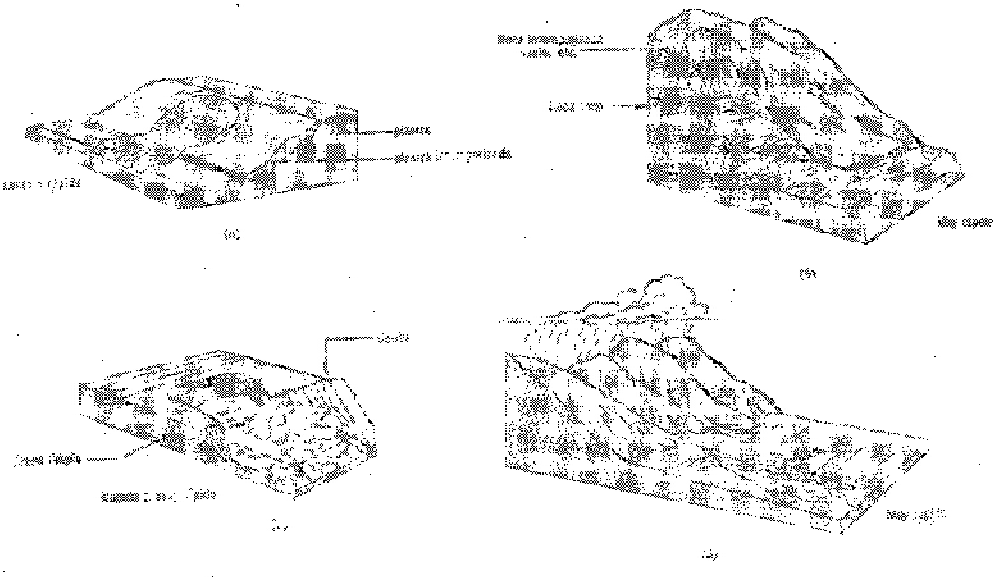


Figura 4.14 *Falla por flujo en materiales húmedos*

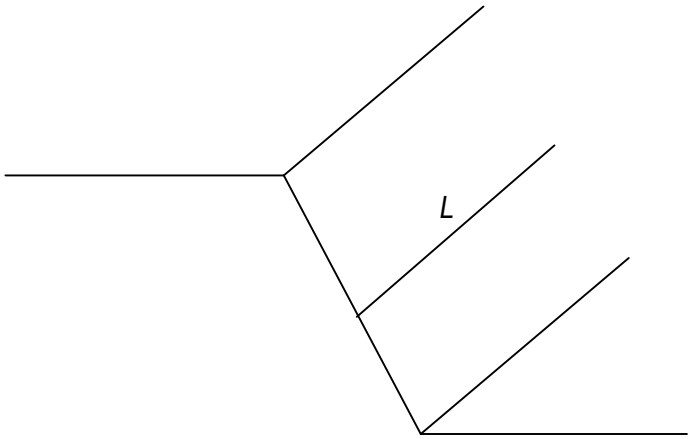
4.3 Análisis bidimensional

Se idealiza que el problema es de deformación plana. Debido a que la longitud *L* es mucho mayor que las dimensiones de la sección transversal, figura 4.15, se considera que no existe influencia de factores que sumen deformación a las obtenidas al analizar la sección transversal; es decir, sus características en toda la longitud *L* son las mismas que en cualquier corte transversal generado sobre ésta, por lo cual se obtendrán los mismos resultados.

4.3.1 Hipótesis utilizadas en los análisis de estabilidad de taludes

Los métodos para análisis de estabilidad de taludes se basan en hipótesis propias. Para el análisis en dos dimensiones la mayoría de los métodos comparten las siguientes:

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)



L >> dimensiones de la sección

Figura 4.15 *Análisis plano de deformaciones.*

a) Superficie de falla

Al presentarse el movimiento de la masa de suelo, ésta se desplaza sobre un plano que define la falla. En los modelos para análisis de estabilidad de taludes esta condición se representa mediante una forma geométrica que se apegue más a las condiciones presentadas en los taludes.

b) Movimiento de la masa de suelo como cuerpo rígido

Se considera que la masa de suelo se desplaza sobre la superficie de falla como cuerpo rígido por lo cual no se consideran deformaciones ni cambios de volumen en la masa de suelo al presentarse la falla.

c) Homogeneidad en las propiedades del suelo

Esta simplificación considera que las propiedades del suelo no varían con respecto a la geometría o profundidad del talud.

d) Condición de falla generalizada a lo largo de toda superficie de falla

Se considera que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo se presenta

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

a lo largo de la superficie de falla. En caso de taludes estratificados, la resistencia al esfuerzo cortante será la suma de la resistencia de cada suelo a lo largo del tramo de superficie que corta cada estrato.

4.3.2 Métodos empíricos

Se basan en observaciones de campo y en la experiencia previa de los diseñadores tomando en cuenta las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona donde se encuentra el talud. Permiten un análisis simple y relativamente rápido cuando las condiciones reales se apegan a las hipótesis en que se basan estos métodos; la incertidumbre inherente a estos métodos es alta debido a que no se realizan exploración, ensayes de laboratorio o cálculos rigurosos de estabilidad.

Rico y Del castillo (2000), tabla 4.1, presentan un sumario de recomendaciones de inclinación de cortes en diversos materiales utilizadas en el diseño empírico de taludes para vías terrestres. La tabla, desarrollada hace mas de 3 décadas, toma en cuenta los requerimientos usuales de las vías terrestres, pero debe utilizarse con reserva y revisar sus resultados aplicando una metodología rigurosa.

4.3.3 Métodos simplificados

Los métodos simplificados permiten calcular el factor de seguridad mínimo de un talud en forma simple y rápida, cuando las condiciones del talud se ajustan a las condiciones idealizadas con las cuales se generaron las gráficas de estabilidad propias del método.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

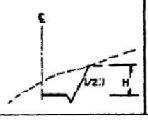
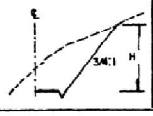
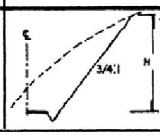
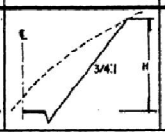
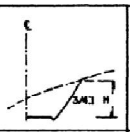
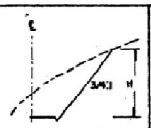
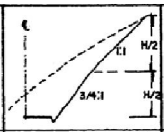
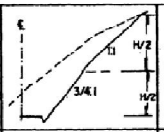
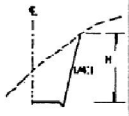
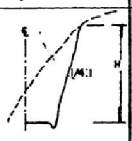
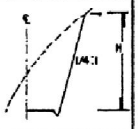
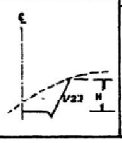
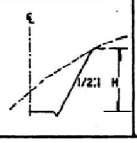
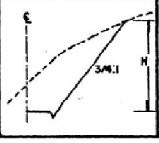
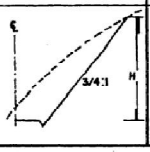
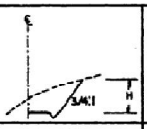
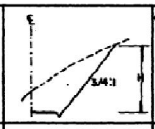
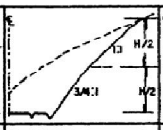
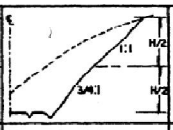
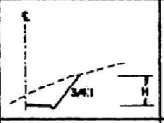
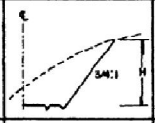
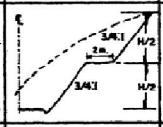
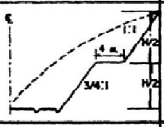
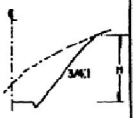
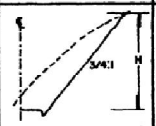
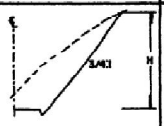
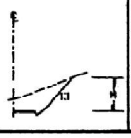
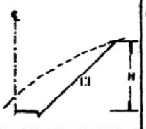
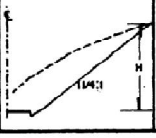
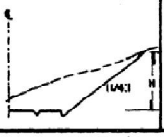
TIPO DE MATERIAL	TALUD RECOMENDABLE				OBSERVACIONES
	Hasta 5 m	De 5 a 10 m	De 10 a 15 m	Mayor de 15 m	
Caliza intemperizada con flujo de agua.					Proyectar subdrenaje contracunetas impermeables.
Caliza sana con echado contra el corte entre 90° y 45°, con lubricante arcilloso entre estratos.	Dar el talud correspondiente al echado. Si la roca está muy fracturada, proyectar berma impermeabilizada de 4 m a la mitad de la altura. Contracunetas impermeables.				
Caliza muy fracturada e intemperizada.					Contracuneta impermeable.
Caliza sana poco fracturada con echado contra el corte entre 50° y 45°.					Se puede considerar como si el echado fuera horizontal.
Caliza muy poco intemperizada y fracturada, con echado entre 45° y 50° contra el corte.					Descopetar la zona más fracturada a 1:1. Contracuneta impermeabilizada.
Pizarras	Mismas recomendaciones que para calizas.				
Aglomerado medianamente compacto con finos no plásticos.					Contracuneta impermeabilizada, para cortes mayores de 10 m construir banqueta de 1.0 m en el pie del talud.
Aglomerado medianamente compacto con finos plásticos.					Contracunetas impermeabilizadas. Para corte mayor de 10 m proyectar berma de 2 m a la mitad de la altura y para corte mayor de 15 m aumentar el ancho a 4 m.
Arenas limosas y limos compactos.					Descopetar 1:1 la parte superior más intemperizada, si son materiales fácilmente erosionables deberá proyectarse talud de 1:1 y proteger con pasto.
Arenas limosas y limos poco compactos.					Contracuneta impermeable. Descopetar a 1:5:1 a la parte más intemperizada. Para cortes mayores de 15 m proyectar banqueta de 5 m al pie del talud.

Tabla 4.1 *Recomendaciones para inclinación de taludes en vías terrestres.*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

4.3.3.1 Taylor

Taylor (1948), desarrollo, con base en el método del circulo de fricción, gráficas para determinar el factor de seguridad mínimo de un talud homogéneo que se encuentra sobre un estrato de suelo más competente o un estrato de roca, tanto para materiales con $c \neq 0$ y $\emptyset = 0$. Taylor considera una falla de base por rotación, que en el medio no existen grietas de tensión y no se presentan cargas externas o flujo de agua en el talud.

El factor de seguridad mínimo del talud se determina con la ecuación 4.1

$$FS = N\left(\frac{C_u}{\gamma H}\right) \qquad 4.1$$

Donde:

Fs	Factor de seguridad,
N	Número de estabilidad,
c_u	Cohesión del material,
γ	Peso volumétrico de suelo,
H	Altura del talud.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las gráficas de estabilidad para materiales con $c \neq 0$ y $\emptyset = 0$ y para $c \neq 0$ y $\emptyset \neq 0$, respectivamente.

4.3.3.2 Janbu

Janbu (1954) desarrolló gráficas de estabilidad para calcular el factor de seguridad mínimo de un talud con base en las siguientes hipótesis: 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; d) la cohesión es constante con la profundidad y e) la falla se produce por rotación.

En la figura 4.18 se presenta la gráfica de estabilidad de Janbu. Para determinar la superficie de falla se utilizan las gráficas de la figura 4.19.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

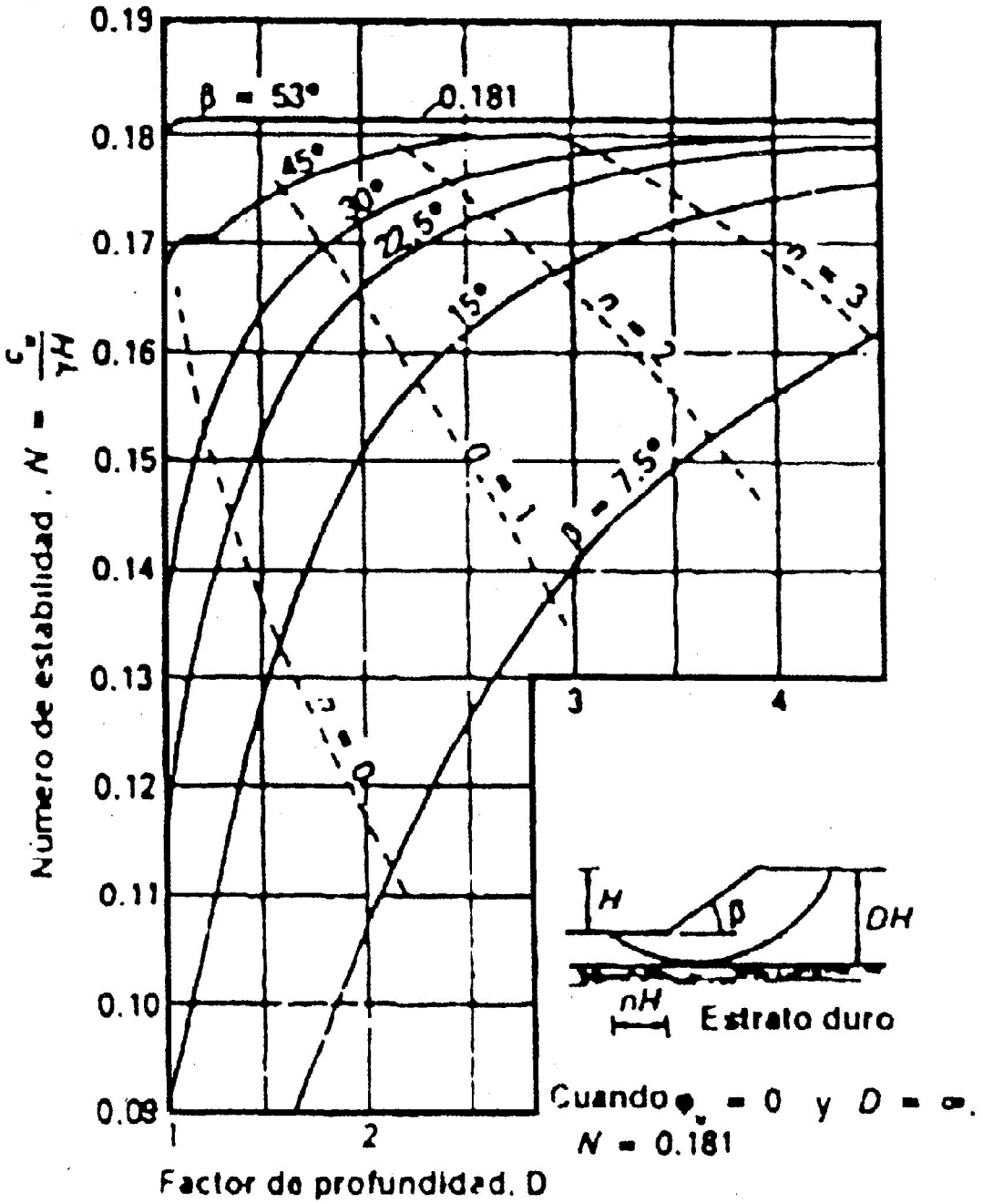


Figura 4.16 *Gráfica de estabilidad para el caso c≠ 0 y Ø≠ 0 (Taylor, 1948)*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

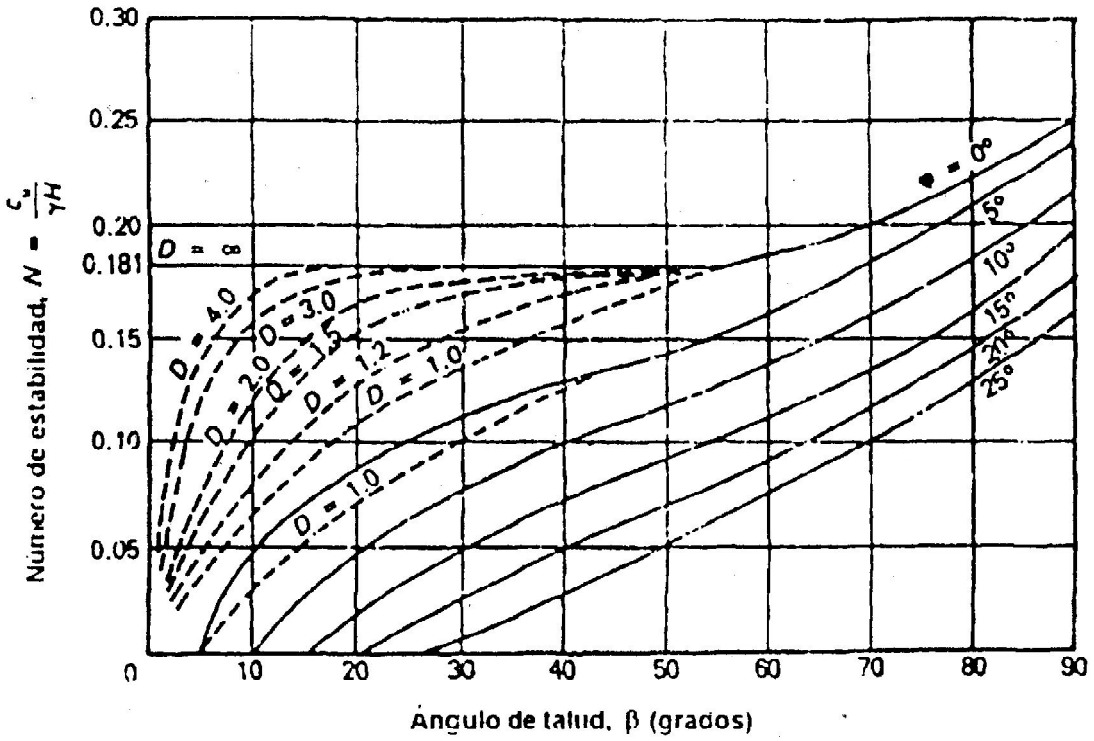


Figura 4.17 *Gráfica de estabilidad para el caso c≠ 0 y Ø≠ 0 (Taylor, 1948)*

Janbu (1954) propone factores de corrección en caso de sobrecarga, grietas de tensión o tirante de agua al pie del talud, figura 4.20.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

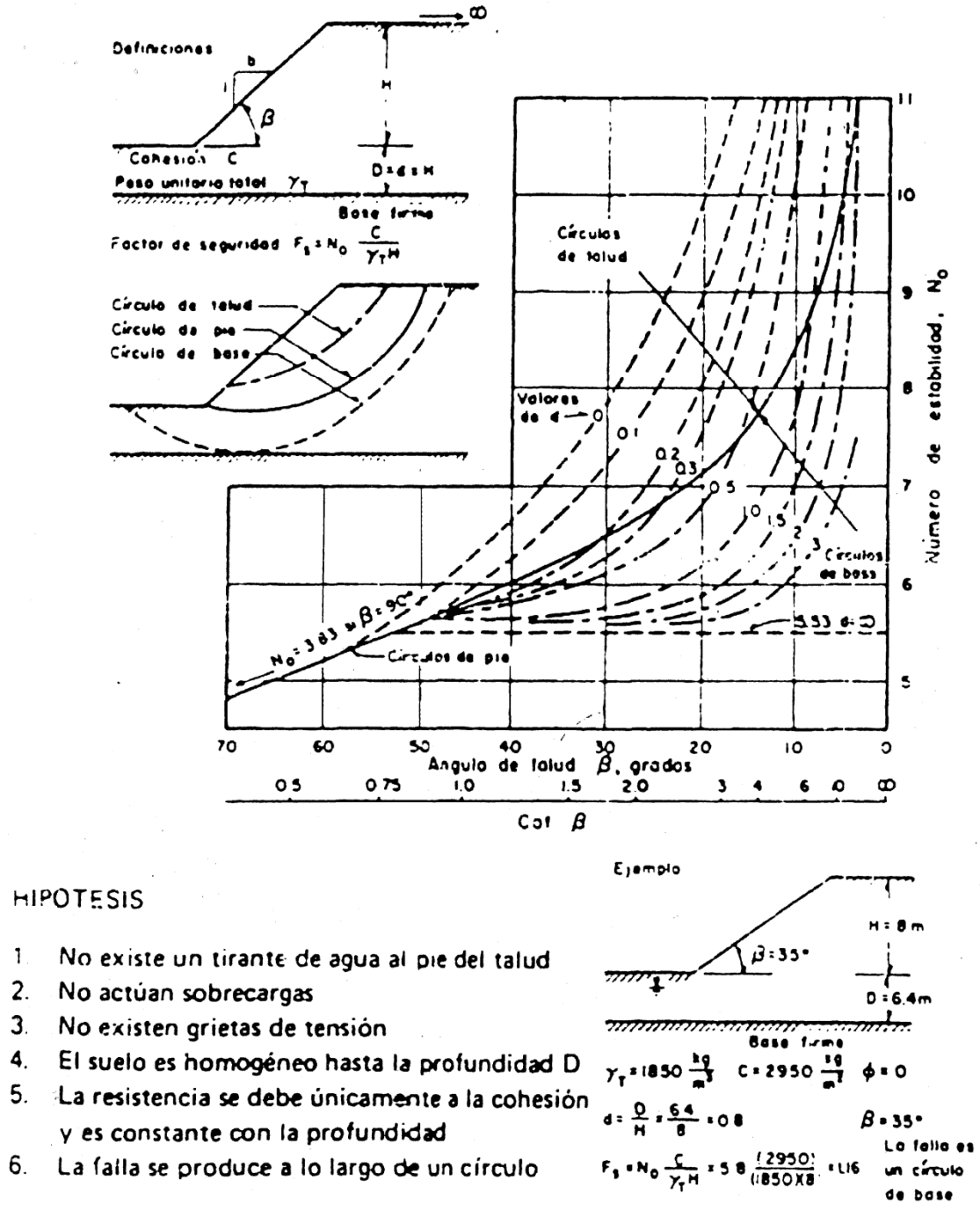


Figura 4.18 *Gráfica de estabilidad para el caso Ø≠ 0 (Taylor, 1954)*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

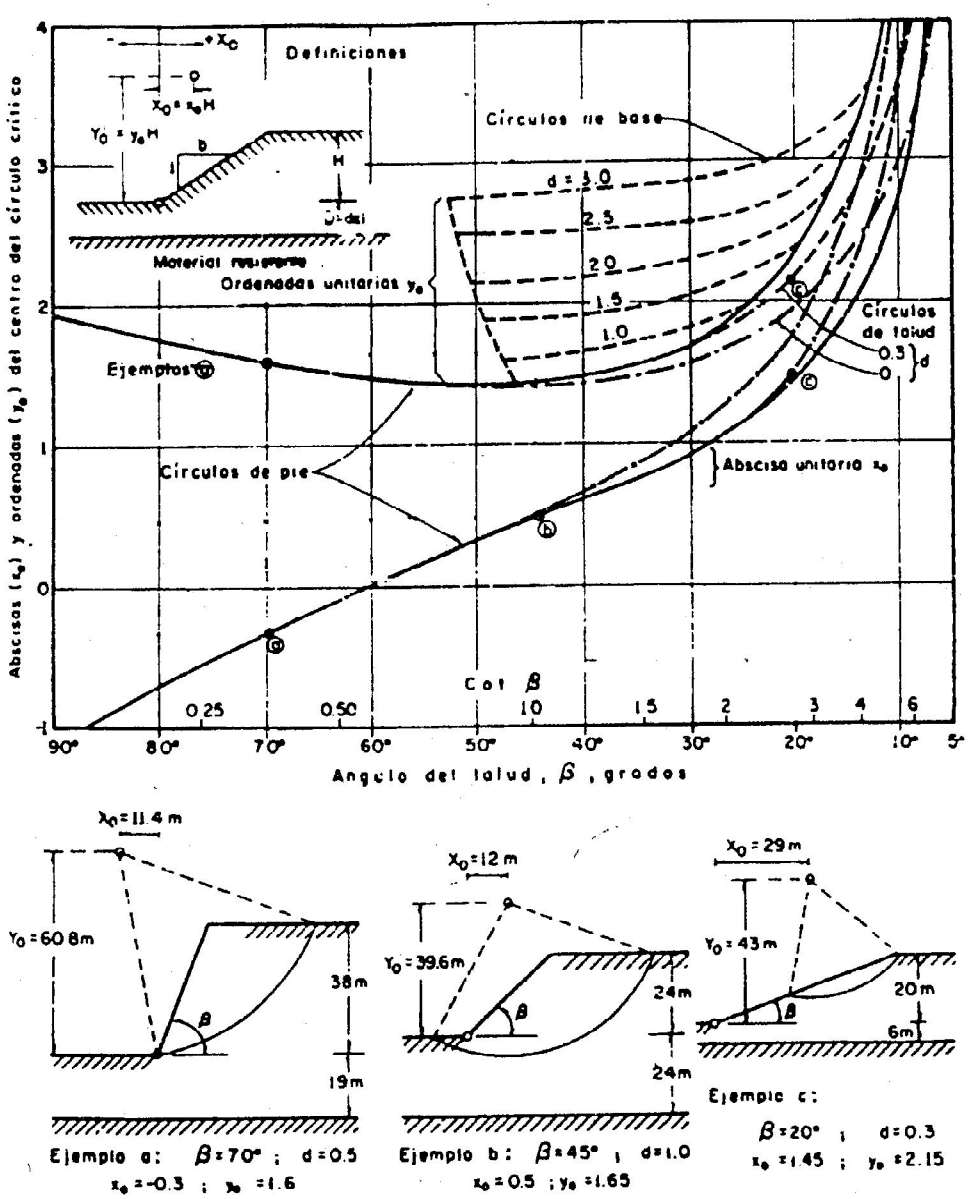


Figura 4.19 Centro y superficie de falla crítica para el caso de $\emptyset \neq 0$ (Janbu, 1954).

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

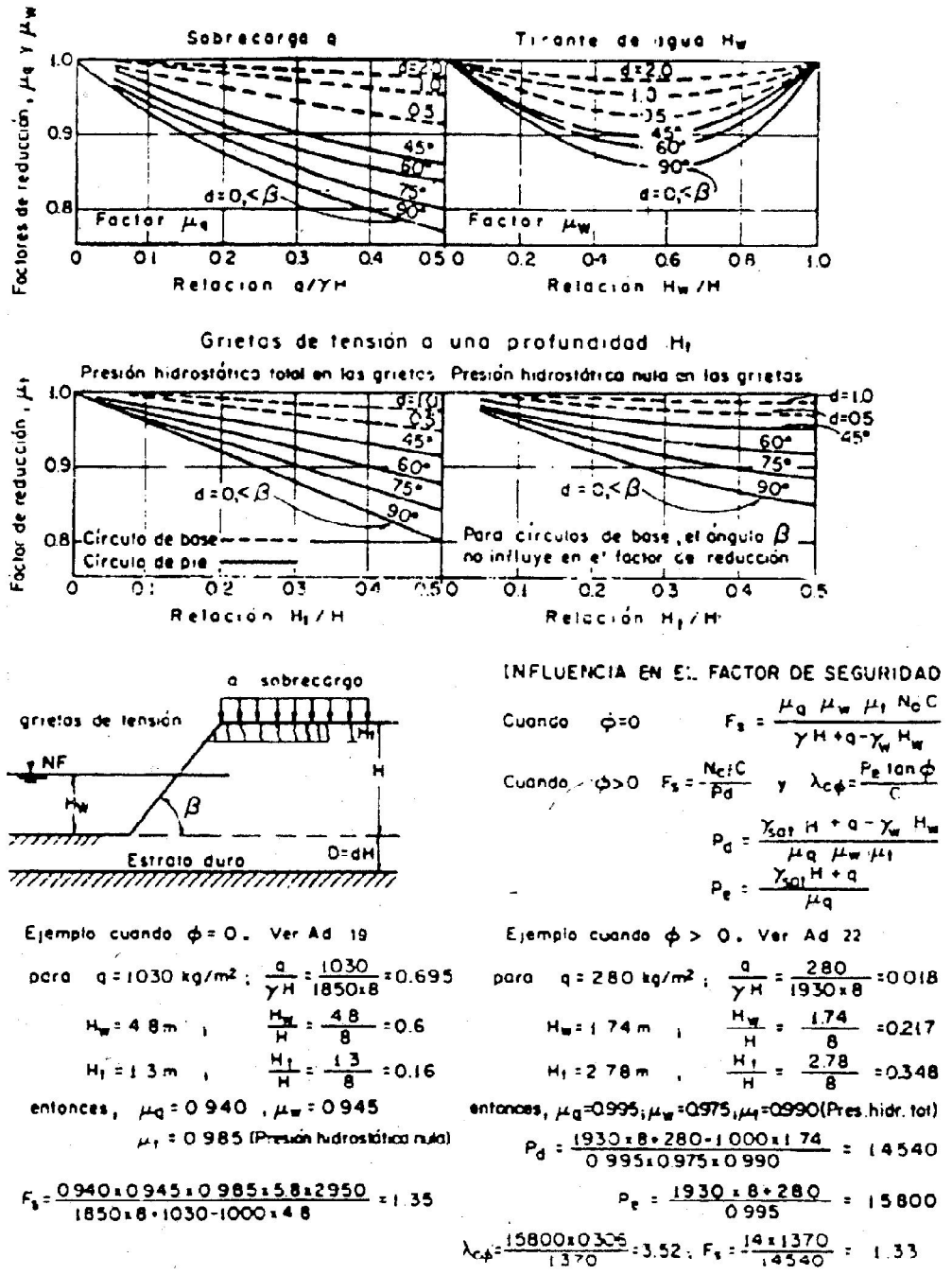


Figura 4.20 *Corrección por influencia de sobrecarga, tirante de agua y grietas de tensión para el caso de Ø≠ 0 (Janbu, 1954).*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

4.3.3.3 Bishop – Morgenstern

Bishop y Morgenstern (1960) proporcionan gráficas de estabilidad para determinar el factor de seguridad mínimo de un talud homogéneo, figura 4.21, con base en el método de Bishop modificado. El factor de seguridad se calcula aplicando la ecuación 4.2.

$$FS = m - n(r_u) \qquad 4.2$$

Donde:

FS Factor de seguridad,
m,n coeficiente de estabilidad,
r_u relación de presión de poro.

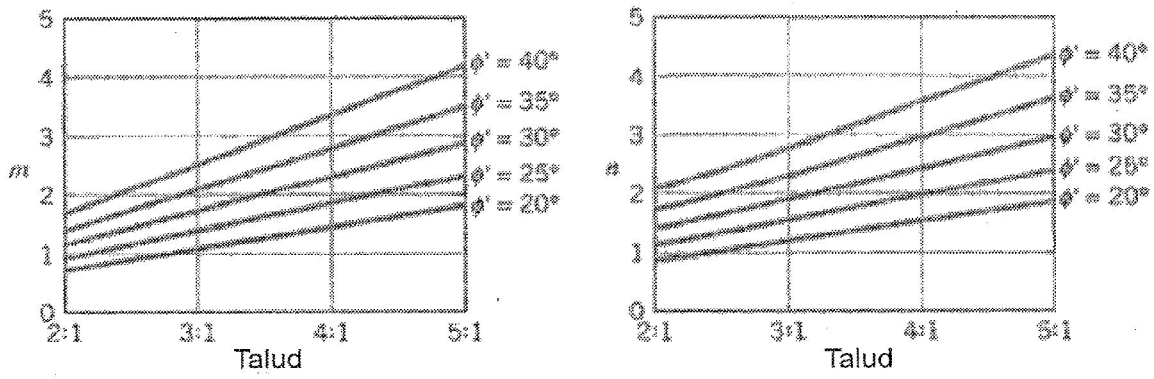


Figura 4.21. Gráfica valores de *m* y *n* (Bishop-Morgenstern, 1960)

4.3.4 Métodos detallados o rigurosos

Estos métodos se basan en procedimientos que toman en cuenta el equilibrio de fuerzas y/o momentos actuantes en el talud para determinar su factor de seguridad. Requieren de parámetros obtenidos en combinación de un programa de explotación del subsuelo y ensayes de laboratorio.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

4.3.4.1 Análisis de superficies planas

Cuando las dimensiones del talud son grandes y en las que se considera que el desplazamiento de la masa de suelo se produce sobre una superficie plana, el cálculo del factor de seguridad corresponde a la relación entre la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y la fuerza cortante que actúa en el talud, ecuación 4.3.

$$FS = \frac{s}{\tau_m} \qquad 4.3$$

Donde:

- *FS* Factor de seguridad,
- *s* Resistencia al esfuerzo cortante del suelo,
- τ_m Fuerza cortante actuante en el talud.

Por simplificación, considera en estos métodos que el suelo es homogéneo y no estratificado en la masa de suelo en movimiento.

Para taludes de longitud infinita formados por suelos con $c \neq 0$ y $\varnothing = 0$, el factor de seguridad se calcula como:

$$FS = \frac{s}{\tau_m} = \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\left(1 - \frac{h_p \gamma_w}{H\gamma\cos^2\beta}\right) \qquad 4.4$$

Donde:

- ϕ Ángulo de fricción del suelo,
- β Ángulo de inclinación del talud,
- H Espesor del suelo en movimiento,
- h_p Altura piezométrica dentro del talud,
- γ Peso volumétrico del suelo,
- γ_w Peso volumétrico del agua,
- S Resistencia al esfuerzo cortante del suelo a lo largo de la superficie de falla.
- τ_m Esfuerzo cortante actuante en el talud a lo largo de la superficie de falla.

En la figura 4.22 se muestra el diagrama de fuerzas consideradas en este caso.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

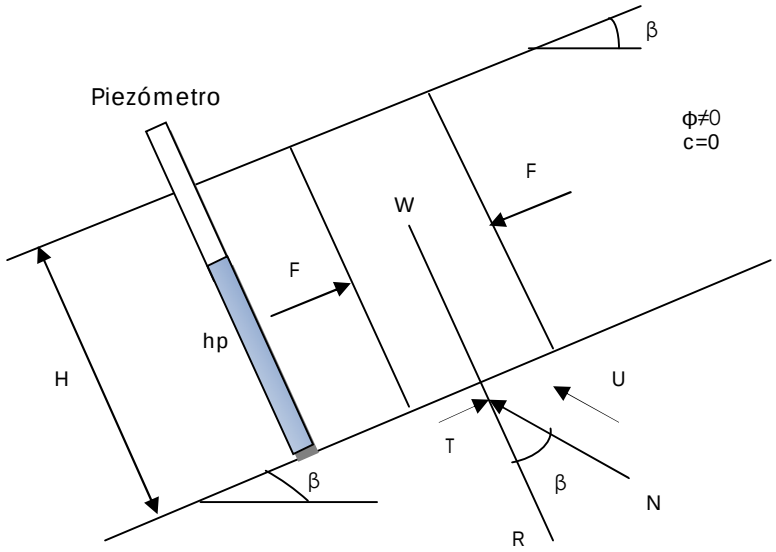


Figura 4.22 *Talud de longitud infinita en suelos con c≠ 0 y Ø≠ 0*

En taludes de longitud infinita, formados por suelos con c≠ 0 y Ø≠ 0, el factor de seguridad se calcula como:

$$FS = \frac{s}{\tau_m} = \frac{c}{\gamma H \cos\beta \operatorname{sen}\beta} + \frac{\tan\phi}{\tan\beta}\left(1 - \frac{h_p \gamma_w}{H\gamma \cos^2\beta}\right) \qquad 4.5$$

Donde:

- ϕ ángulo de fricción del suelo,
- C cohesión del suelo,
- B ángulo de inclinación del talud,
- H espesor del suelo en movimiento,
- γ peso volumétrico del suelo,
- h_p altura piezométrica dentro del talud ,
- γ peso volumétrico del suelo,
- γ_w peso volumétrico del agua,
- s resistencia al esfuerzo cortante del suelo a lo largo de la superficie de falla,
- τ_m esfuerzo cortante actuante en el talud a lo largo de la superficie de falla,

En la figura 4.23 se presenta el diagrama de fuerzas considerando taludes infinitos.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

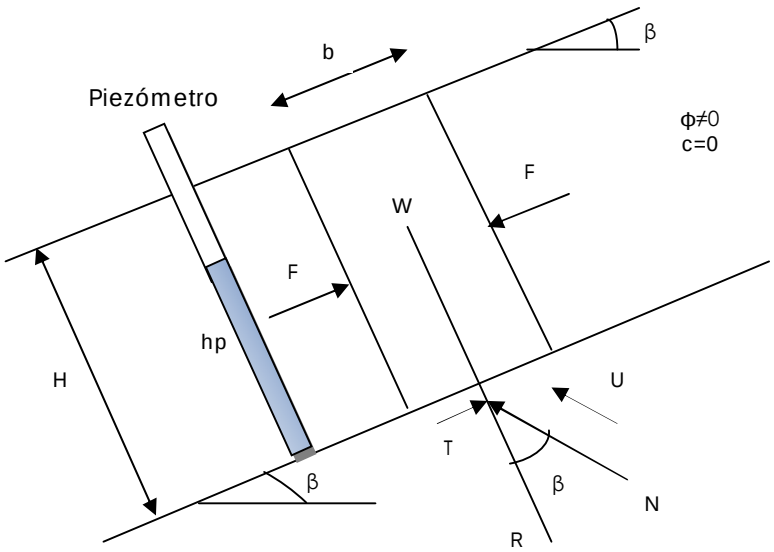


Figura 4.23 *Talud de longitud infinita en suelos con c≠ 0 y Ø≠ 0*

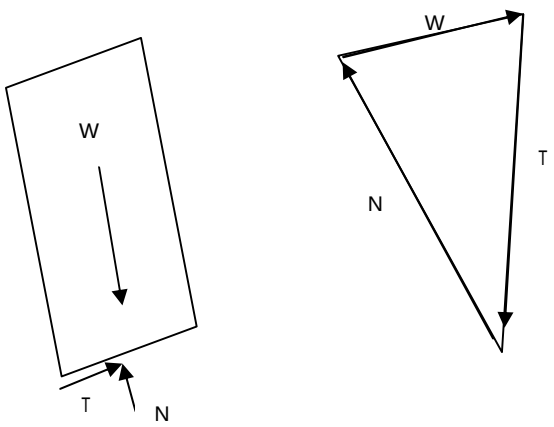
4.3.4.2 Fellenius

También conocido como Método Sueco. Este método es el primero que considera la estabilidad del talud a través del análisis de fuerzas que actúan en este, dividiendo a la masa de suelo en movimiento en franjas independientemente o dovelas.

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 se calcula como la relación entre la sumatoria de los momentos resistentes de cada dovela y la sumatoria entre los momentos actuantes también en cada dovela, ambos respecto al centro del círculo de falla, figura 4.24.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)



W= peso dovela
T= fuerza tangencial al plano de falla
N=fuerza normal al plano de falla

Figura 4.24 *Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerzas aplicado en el método de Fellenius*

El factor de seguridad está definido como:

$$FS = \frac{\sum(c\beta + N\tan\phi)}{\sum(W\text{sen}\alpha)} \qquad 4.6$$

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,

4.3.4.3 Bishop modificado

Bishop (1954) propuso un método cuya solución es una refinación al método de Fellenius. Considera una superficie de falla cilíndrica y una masa de suelo que gira sobre un punto, el cual corresponde al centro del círculo que define la superficie de falla. No considera la fricción entre dovelas, solamente las fuerzas normales a éstas.

Considerando que se establece el equilibrio vertical de todas las fuerzas

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

que actúan sobre cada dovela, y que el factor de seguridad es la relación entre la sumatoria de los momentos resistentes y la sumatoria de los momentos actuantes, se tiene:

$$FS = \frac{1}{\sum(W sen\alpha)}\left(c\beta + W tan\phi\left(cos\alpha + \frac{sen\alpha tan\phi}{FS}\right)\right) \qquad 4.7$$

Donde:

- C Cohesión del suelo,
- ϕ Ángulo de fricción del suelo,
- β Longitud de la superficie de falla,
- W Peso de la dovela,

Como el factor de seguridad está implícito en la ecuación, el método se reduce a una solución mediante tanteos. Con la aplicación de la informática esta acción se puede resolver de manera sencilla. Kering (1995) propuso una gráfica que auxilia en la solución al asignar valores al coeficiente

$$cos + \frac{sen\alpha tan\phi}{FS}. \qquad 4.8$$

En la figura 4.25 se muestra el diagrama de cuerpo libre y el polígono de fuerzas considerado por el método simplificado de Bishop.

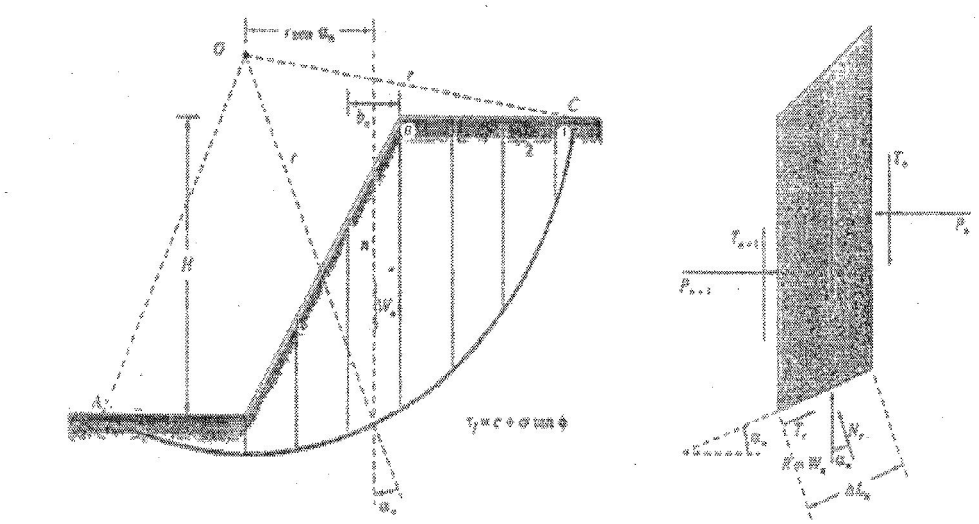


Figura 4.25 *Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerzas aplicado en el método de Bishop modificado.*

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

4.3.4.4 Janbu simplificado

El método de Janbu simplificado, Fredlund y Krahn (1997), similar al de Bishop modificado, con la diferencia de que toma en cuenta el equilibrio de fuerzas horizontales, mientras que Bishop modificado considera el equilibrio de momentos.

El método toma en cuenta las fuerzas normales generadas entre las dovelas, sin considerar las fuerzas de fricción generadas entre estas:

$$FS = \frac{(\sum cl(\cos\alpha)+(P-ul)\tan\phi\cos\alpha)}{\sum P(\text{sen}\alpha)+\sum kW \pm A - L\cos\alpha} \qquad 4.9$$

Donde:

FS	Factor de seguridad,
C	Cohesión del suelo,
Φ	Ángulo de fricción del suelo,
l	Longitud de la superficie de falla,
W	Peso de la dovela,
α	Inclinación de la superficie de falla,
P	Fuerza normal total en la base de las dovelas
u	Presión de poro,
A	Carga uniforme en la superficie del talud,
k	Coeficiente sísmico,
l	Carga uniformemente repartida,

4.3.4.5 Morgenstern – Price

Mongenstern y Price (1995) propusieron un método que satisface el equilibrio estático de fuerzas y momentos en forma rigurosa. Considera que la fuerza resultante entre dovelas varía con respecto a un porcentaje de una función arbitraria y por una constante λ. Estos factores permiten utilizar superficies de falla curvas que no necesariamente sean cilíndricas.

Las ecuaciones 4.10 y 4.11 presentan el cálculo del factor de seguridad con respecto al equilibrio de fuerzas y de momentos, respectivamente.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$$FS = \frac{(\sum cl(\cos\alpha)+(P-ul)\tan\phi\cos\alpha)}{\sum P(\text{sen}\alpha)+\sum kW\pm A-L\cos\alpha} \qquad 4.10$$

$$FS_f = \frac{\sum\{c\beta c\beta co+(N-u\varphi\varphi)\tan\varphi co\alpha\}}{\sum N\text{sen}\alpha+\sum D\cos\omega} \qquad 4.11$$

Donde:

FS_m	factor de seguridad con respecto al equilibrio
c	cohesión del suelo,
Φ	ángulo de fricción del suelo,
β	longitud de la superficie de falla,
W	peso de la dovela,
α	inclinación de la superficie de falla,
N	fuerza normal entre dovelas
X	fuerza tangencial entre dovelas,

4.4 Estabilidad dinámica

Buscando simplificar los efectos sísmicos que afectan a los taludes, se han desarrollado criterios para tenerlos en cuenta en el análisis y diseño. Marsal y Reséndiz (1975) consideran que los primeros análisis sísmicos aplicados en la estabilidad de los taludes de presas se hicieron considerando el efecto sísmico como una aceleración horizontal, uniforme, aplicada estáticamente a las cargas que representan el talud.

Como resultado se obtiene un análisis aproximado, relativamente sencillo, que ha tenido gran aceptación entre los ingenieros de la práctica profesional. Con el desarrollo de la informática se han implementado métodos y modelos más rigurosos para el análisis dinámico de las estructuras térreas.

4.4.1 Análisis seudoestático

El análisis seudoestático representa los efectos del sismo mediante una aceleración que crea fuerzas internas, horizontales y verticales, causando un aumento en el número de fuerzas que actúan en el talud.

Estás fuerzas están definidas como:

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

$$F_h = \frac{a_h}{g} W = c_h W \quad 4.12$$

$$F_h = \frac{a_h}{g} W = c_h W \quad 4.13$$

Donde:

- F_h Fuerza horizontal,
- F_v Fuerza vertical,
- a_h Aceleración horizontal,
- a_v Aceleración vertical,
- W Peso de la dovela,
- c_h Coeficiente sísmico,
- c_v Coeficiente sísmico,

4.4.2 Análisis dinámico

El análisis dinámico de la estabilidad de taludes debe incluir las fuerzas de inercia que obran en la masa del suelo del talud. Cuando el empleo de un modelo refinado, análisis elastodinámico o elasto – plástico dinámico, no se justifique, una alternativa consiste en realizar un análisis estático equivalente, simulando los efectos del sismo mediante fuerzas de inercia que actúan en el centro de gravedad de la masa de suelo.

Cuando sea aceptable suponer un mecanismo de falla rotacional, la masa de suelo que desliza estará delimitada por la superficie del terreno y por el círculo o espiral logarítmica que representa la superficie de falla; en este caso es recomendable emplear el método propuesto por Spencer (1978), que se describe a continuación.

El método de Spencer evalúa la estabilidad de taludes sujetos a fuerzas debidas a aceleraciones laterales. Los principales objetivos son: a)evaluar el efecto en la estabilidad del talud variando la inclinación de la fuerza causada por la aceleración lateral, b) comparar la posición de la superficie de falla critica obtenida con diferentes variables que satisfagan las ecuaciones de equilibrio.

a) Fuerzas que actúan en la masa de suelo

La figura 4.26 (a) muestra la sección transversal de un talud y la superficie de falla considerada para el análisis. El suelo dentro de la superficie de falla se divide en un número adecuado de dovelas. En la figura se muestra la dirección de la aceleración *T* y es posible considerar el efecto

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

de una grieta de tensión con profundidad *t*. Se supone el efecto de la aceleración mediante el cálculo de la fuerza de inercia en el centro de gravedad de cada dovela.

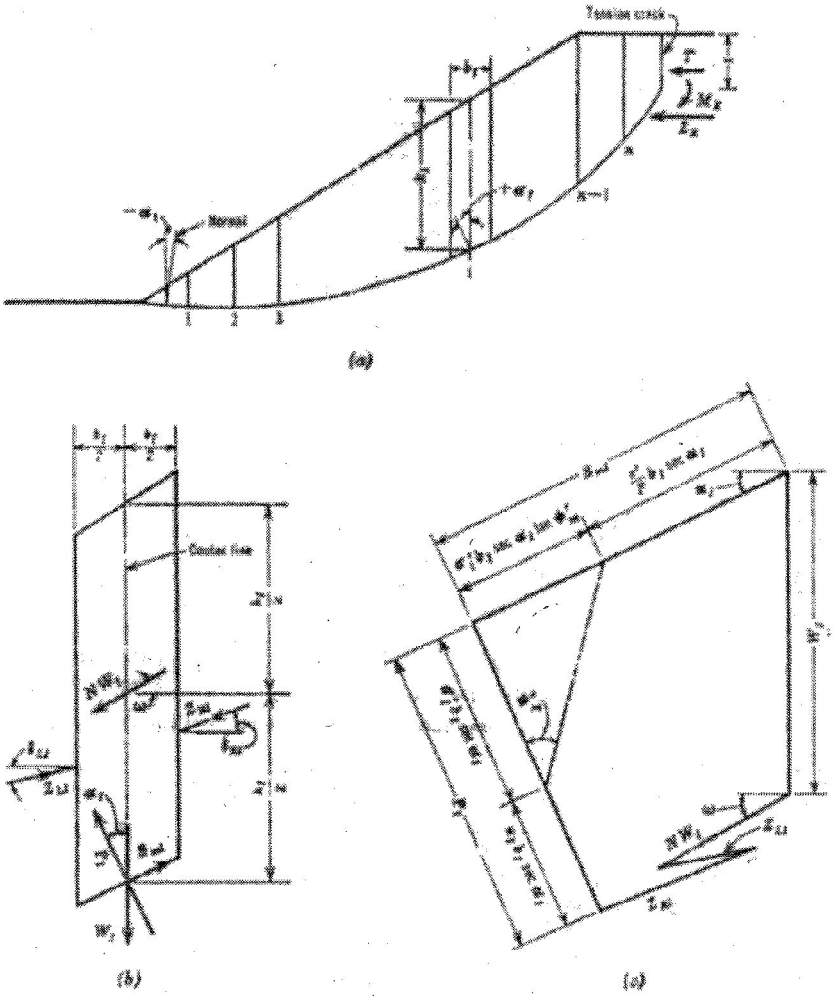


Figura 4.26. *Diagrama de cuerpo libre y polígono de fuerzas aplicado en el método de Spencer*

La figura 4.26(b) muestra una dovela. En ella se muestran las fuerzas considerada en el análisis, la fuerza de inercia, NW_1, correspondiente a una aceleración lateral *N* veces la gravedad; el peso de la dovela, W_1; la fuerza normal en la base de la dovela P_1; la resistencia al esfuerzo cortante movilizada, S_{m1}, que es igual que la fuerza cortante disponible, S_1, dividida por el factor de seguridad, *F*; las fuerzas $Z_{LI,}$ y $Z_{RI,}$ que actúan en las fronteras laterales de la dovela. El polígono de fuerzas generado con las fuerzas antes mencionadas se presenta en la figura 4.26(c).

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

b) Ecuaciones para el equilibrio de fuerzas

La ecuación 4.14 es la expresión utilizada para el cálculo de la fuerza Z_{RI}. Para aplicar esta ecuación, debe encontrarse la fuerza externa Z_E requerida para estabilizar el talud. El proceso de solución involucra la eliminación de la fuerza Z_E.

$$Z_{RI} = \frac{\frac{c'}{F} b_I \sec(\alpha_I) + \frac{\tan\phi'}{F}\{(W_I[\cos(\alpha_I) + N\sin(\bar{\omega} - \alpha_I)]) - u_I b_I \sec(\alpha_I)\}}{\cos(\alpha_I - \delta_{RI}) + \frac{\tan\phi}{F}\sin(\alpha_1 - \delta_{RI})}$$

$$- \frac{W_1[\sin(\alpha_1)+N\cos(\bar{\omega}-\alpha_1)]}{\cos(\alpha_I-\delta_{RI})+\frac{\tan\phi}{F}\sin(\alpha_1-\delta_{RI})} + Z_{LI}\left[\frac{\cos(\alpha_1-\delta_{LI})+\frac{\tan\phi'}{F}\sin(\alpha_1-\delta_{LI})}{\cos(\alpha_1-\delta_{RI})+\frac{\tan\phi'}{F}\sin(\alpha_1-\delta_{LI})}\right] \qquad 4.14$$

c) Ecuaciones para el equilibrio de momentos

La ecuación 4.15 permite el cálculo del momento externo. M_E, que estabiliza el talud, el proceso de cálculo de la eliminación de M_E.

$$M_E = M_T - 0.5\sum_{I=1}^{n-1}\{Z_1 cos(\partial_I)[\tan\partial_I(b_I + b_{I+1}) - (b_I tan\alpha_I + b_{I+1} tan\alpha_{I+1})]\}$$

$$+ 0.5N cos\varpi \sum_{I=1}^{n}(W_I h_I)\, F_h = \frac{a_h}{g}\ W = c_h\ WW \qquad 4.15$$

$$M_T = \frac{1}{2} t^2 1 \gamma_w \qquad 4.16$$

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

d) Ecuaciones para el cálculo de las fuerzas entre dovelas

Para el cálculo de la fuerza que actúa entre dovelas se considera la expresión de la ecuación 4.17 en la se propone el ángulo Θ.

$$\tan \partial_I = k_I \tan\Theta \qquad 4.17$$

Para satisfacer las condiciones de fuerzas y de momentos, es necesario seleccionar dos variables cuyo valor debe ser ajustado hasta que la fuerza externa, Z_E, y el momento externo, M_E, se reduzcan a un valor despreciable.

4.4.3 Método Mononobe-Okabe

Okabe (1926), Monobe y Matsuo (1929), desarrollaron las bases para un análisis seudoestático que evalúa las presiones sísmicas que desarrollan los suelos sobre muros de contención. Este método es conocido como el método Mononobe –Okabe.

El método considera la aplicación de aceleraciones seudoestáticas, tanto en dirección horizontal como vertical, que actúa en la cuña activa considerada en el método de Coulomb. Las magnitudes de estas fuerzas seudoestáticas, horizontales y verticales, están relacionadas con la masa de la cuña, ecuaciones 4.18 a 4.19.

$$\boldsymbol{a_h} = \boldsymbol{k_h}(\boldsymbol{g}) \qquad 4.18$$

$$a_v = k_v(g) \qquad 4.19$$

$$F_h = k_h(W_i) \qquad 4.20$$

$$F_v = k_v(W_i) \qquad 4.21$$

Donde:

- a_h aceleración horizontal,
- a_v aceleración vertical,
- k_h coeficiente sísmico vertical,
- F_h Fuerza seudoestática horizontal,
- F_v Fuerza seudoestática vertical,
- G aceleración de la gravedad,
- W_i Peso de la cuña,

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

El método Mononobe-Okabe puede ser adaptado para su utilización en estabilidad de taludes considerando las fuerzas seudoestáticas, calculadas mediante ecuaciones 4.20 y 4.21, al considerar el peso de la dovela en estudio dentro del equilibrio de fuerzas y/o momentos que emplee el método utilizado para el cálculo del factor de seguridad.

4.5 Método del elemento finito para el cálculo del factor de seguridad

El método del elemento finito es utilizado para calcular el desplazamiento y los esfuerzos provocados por las cargas que actúan en el talud. El cálculo del factor de seguridad con este método corresponde a la relación del esfuerzo cortante calculado en una etapa de análisis con respecto al esfuerzo anterior. Este proceso continúa hasta que se obtenga la convergencia del método.

El cuerpo de ingenieros del Ejercito de Estados Unidos, USACE por sus siglas en inglés (2003), define que el factor de seguridad aplicando el método de elemento finito se calcula con la ecuación 4.22.

$$FS = \frac{\sum s_i(\Delta l)}{\sum \tau_{i-l}(\Delta l)} \qquad 4.22$$

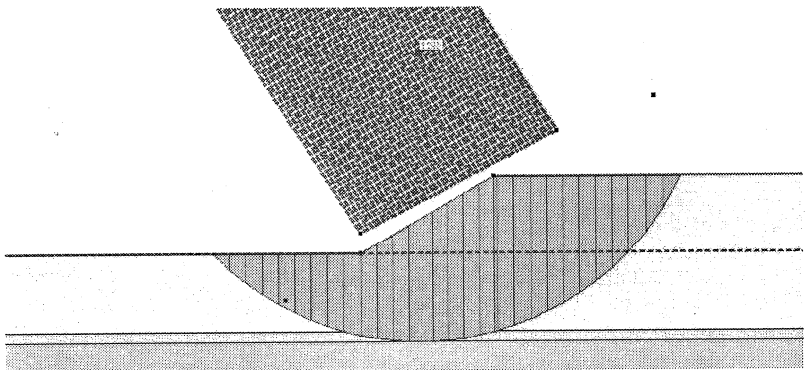
Donde

FS	Factor de seguridad,
s_i	Esfuerzo cortante calculado en la etapa *i*,
τ_{i-}	Esfuerzo cortante calculado en la etapa *i-l*,
Δl	Longitud de cada elemento individual en que fue dividida la superficie que desliza.

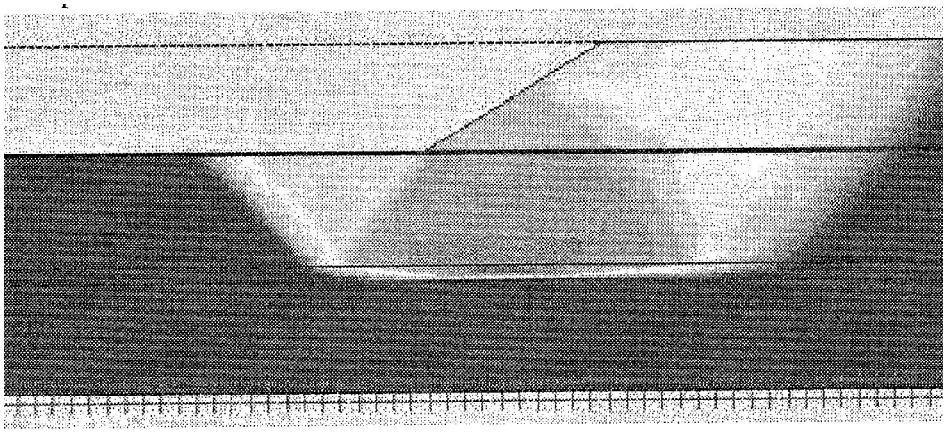
En la figura 4.27 se observa la comparación entre la superficie de falla obtenida con el método de elemento finito y el obtenido con el método de Morgenstern – Price. Se observa que existe una semejanza en la forma de la superficie de falla, la cual puede no ser cilíndrica.

Los cálculos del factor de seguridad con el elemento finito presentan variación al compararlos con los obtenidos con métodos de equilibrio límite; con el primero se obtienen resultados más conservadores.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)



Superficie obtenida utilizando el método Morgenstern-Price



Superficie obtenida utilizando el método de elemento finito

Figura 4.27. *Comparación de superficies de falla obtenidas aplicando los métodos de elemento finito y Morgentern-Price.*

4.6 Tipos de análisis para las diferentes condiciones de talud

Debido a los cambios en las condiciones internas y externas que presenta un talud a lo largo de su vida útil, se han establecido diferentes condiciones que deben analizarse al revisar el diseño de un corte o terraplén. Estas condiciones tratan de representar los estados críticos a los que puede estar sometido el talud.

4.6.1 Análisis para corto plazo

También conocidos como análisis al final de la construcción. Estas condiciones se analizan utilizando métodos en función de esfuerzos

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)

totales, los cuales utilizan parámetros de resistencia obtenidos de pruebas triaxiales de tipo no consolidada no drenada (*UU*) o prueba de compresión simple (q_u) sobre especímenes compactados a las mismas condiciones de peso volumétrico y contenido de agua que en campo.

La presión de poro generada durante la construcción no se considera en forma explícita en los análisis.

4.6.2 Análisis para largo plazo

Estas condiciones se analizan mediante métodos en función de esfuerzos efectivos, con parámetros determinados en pruebas triaxiales tipo consolidada drenada (*CD*) o tipo consolidada no drenada (*CU*) con medición de presión de poro, sobre especímenes compactados a las mismas condiciones de contenido de agua y peso volumétrico que el que presentan los materiales en campo. La presión de poro generada en el cuerpo del talud está definida por las condiciones de filtración o flujo de agua, que deben ser evaluadas para considerarlos en el cálculo del factor de seguridad.

4.6.3 Vaciado rápido

La condición de vaciado rápido o cualquier otra condición en la que el talud se haya consolidado bajo ciertas condiciones de carga, y repentinamente sufra un cambio de las cargas actuantes sin permitir que transcurra tiempo suficiente para disipar la presión de poro generada, se analizan en términos de esfuerzo totales, con parámetros obtenidos de ensayes triaxiales tipo *CU*, en especímenes compactados a las mismas condiciones de contenido de agua y peso volumétrico que los obtenidos en campo.

Debido a que la condición de vaciado rápido corresponde a un análisis de flujo de agua del tipo transitorio, se han desarrollado métodos gráficos para calcular el factor de seguridad como es el de Morgenstern (1963) o el de elemento finito.

Create PDF files without this message by purchasing novaPDF printer (http://www.novapdf.com)