

1.1. GENERALIDADES

Los deslizamientos, son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

El presente proyecto de tesis de grado intenta presentar una alternativa en el análisis de los fenómenos que ocasionan los deslizamientos.

Cuando el ingeniero va a construir vías terrestres se ve enfrentado a problemas de inestabilidad tanto en corte como en terraplenes. Ambos casos son esencialmente diferentes.

No es muy frecuente la falla de terraplenes, esto debido, posiblemente a que estas estructuras se construyen con materiales seleccionados en principio, la construcción se realiza bajo una norma las cuales han tenido un avance significativo en los últimos años y por lo tanto estas estructuras se considera homogéneas y presentan un comportamiento predecible.

En cambio los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes "In Situ" con toda le heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto la influencia del constructor es limitada.

De tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

En general la construcción de los terraplenes es una tarea rutinaria y no ofrece dificultad, sin embargo existen algunos casos que hacen muy crítica su construcción tales como:

1. Terraplenes en suelo blando.
2. Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.
3. Terraplenes en laderas inclinadas.
4. Accesos a puentes y pasos a desnivel.
5. Terraplenes sobre suelos licuables.
6. Terraplenes con riego de tubificación.

Los cortes en cambio por su heterogeneidad, presentan frecuentes problemas de estabilidad que con ciertos cuidados pueden ser superados, sin embargo algunos casos que exigen tratamientos especiales en su construcción, tales como:

1. Cortes de gran altura.
2. Cortes de laderas inestables.
3. Cortes sujetos a flujos de agua.
4. Cortes en suelos erosionables.

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de predicción de la estabilidad, con el objeto de tomar medidas preventivas y/o correctivas.

Para hacer el análisis de estabilidad de un talud es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej. Causas del movimiento, velocidad del movimiento.
2. Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Seleccionar el método para cálculo de la estabilidad del talud.
4. Correlacionar las observaciones del campo con los resultados del cálculo.

1.2. DEFINICIÓN DE TALUD

Es toda aquella superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente las masas de suelo de rocas, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución.

Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

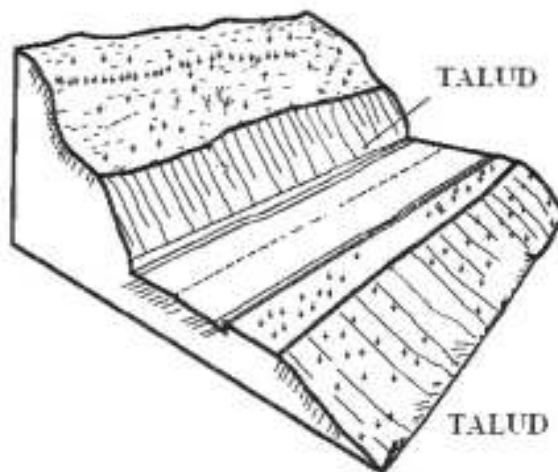


Figura 1. Talud en corte de una carretera.

1.3. NOMENCLATURA DE UN TALUD

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 2).

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

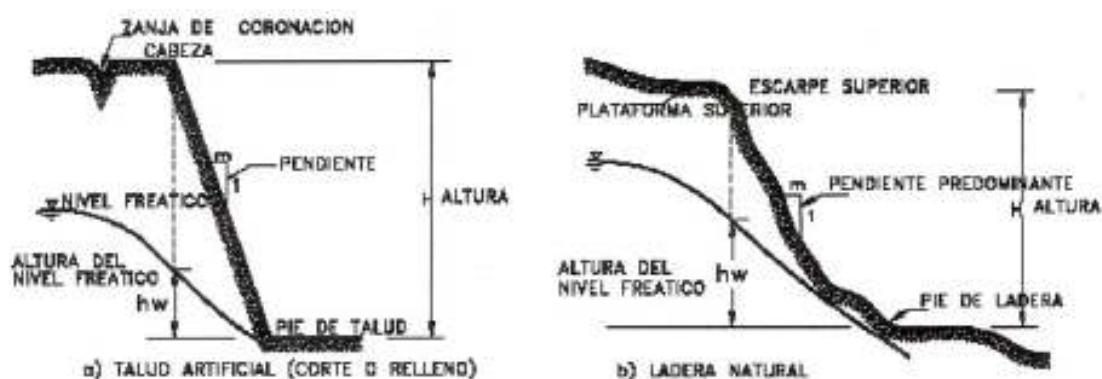


Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas.

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

1. **Altura.-** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie.-**Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe.-** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático.-** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente.-**Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación mil, en la cual “m” es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo:

Pendiente: 450, 100%, o IR: **IV**. Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

6. **Base firme.-** La base firme es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento

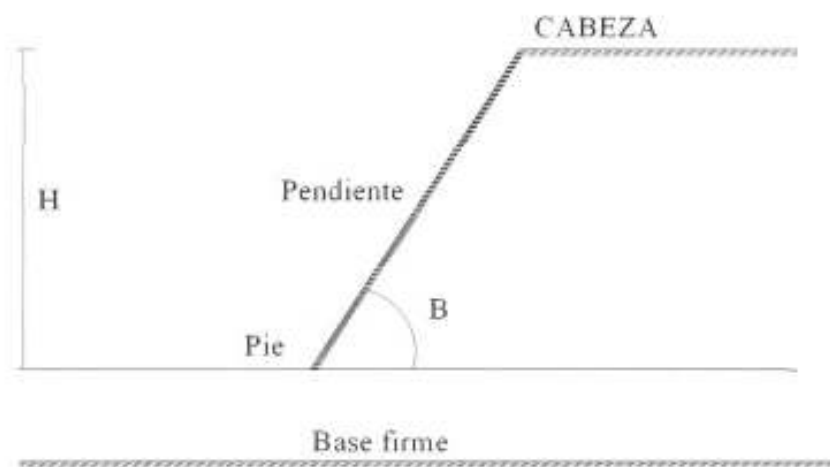


Figura 3. Esquema de partes de un talud.

La inclinación (B) de un talud depende de:

1. Altura del talud.
2. Condiciones topográficas.
3. Estructuras geológicas.
4. Tipo de suelo o roca.
5. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

La principal función de los taludes es la de garantizar en condiciones óptimas la transitabilidad de las carreteras, para la libre circulación vehicular, lo que implica que, en el talud no deben existir desprendimientos aislados o en bloque.

1.4. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LOS TALUDES

Los factores a tomar en cuenta para el diseño de los taludes en general son:

- Altura “H” desde el pie hasta la cresta talud.
- Ángulo que forma la cara del talud con la horizontal.
- Ángulo de fricción interno.
- Cohesión.
- Densidad del suelo del talud.
- Nivel freático.
- Cargas externas.
- Lluvias máximas.

1.5. TIPOS DE TALUDES

Los taludes se dividen en:

a. Taludes naturales o laderas son los conformados por las laderas que se han formado sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

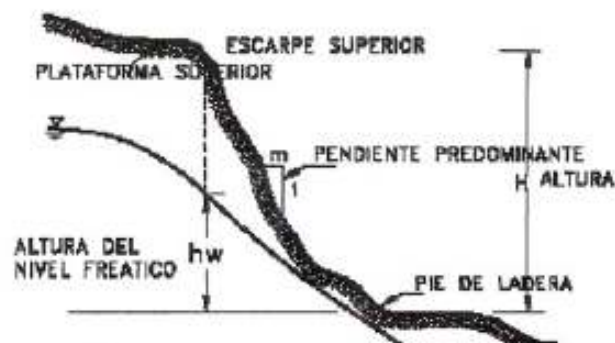


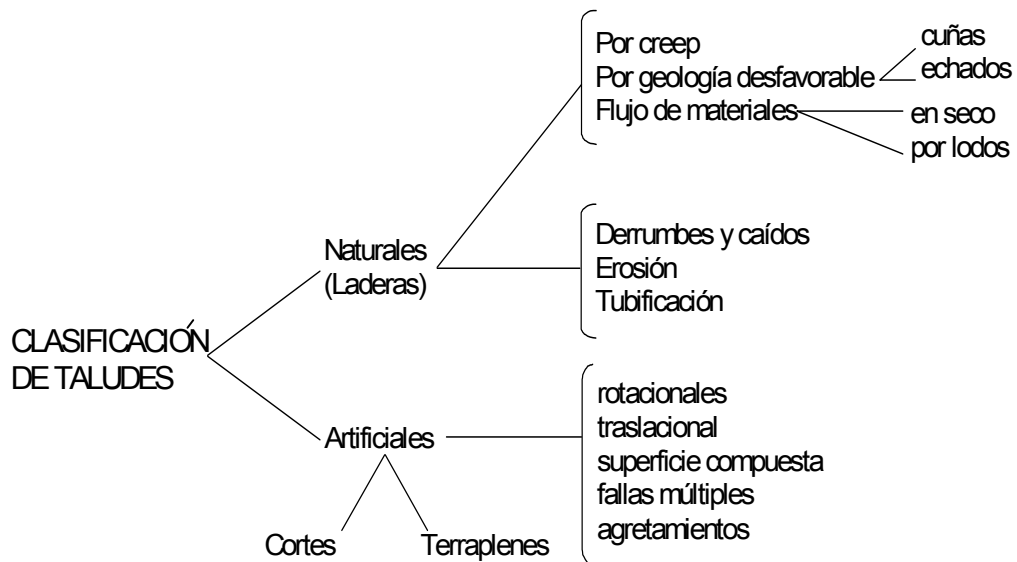
Figura 4. Talud natural.

b. **Taludes artificiales**, son estructuras diseñadas y construidas por el hombre y lo conforman los cortes y los terraplenes.



Figura 5. Talud artificial.

Por lo que podemos realizar la siguiente caracterización de cada uno de ellos, de acuerdo a lo siguiente:



Cuadro 1. Clasificación de taludes.

1.6. INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE CARRETERAS

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos.

Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

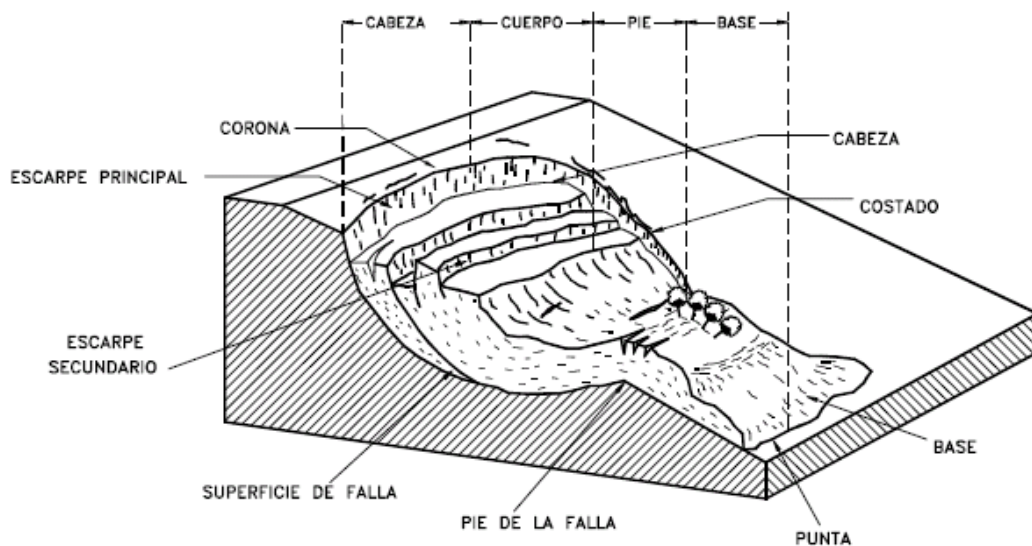


Figura 6. Deslizamiento o movimiento en masa típico.

En la Figura 6 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

- 1. Escarpe principal.-** Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
- 2. Escarpe secundario.-** Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

- 3. Cabeza.-** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 4. Cima.-** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 5. Corona.-** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- 6. Superficie de falla.-** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- 7. Pie de la superficie de falla.-** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- 8. Base.-** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- 9. Punta o uña.-** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- 10. Costado o flanco.-** Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- 11. Superficie original del terreno.-** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- 12. Derecha e izquierda.-** Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

1.6.1. Dimensiones

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 7):

- 1. Ancho de la masa desplazada W_d .-** Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

- 2. Ancho de la superficie de falla W_r .**- Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- 3. Longitud de la masa deslizada L_d .**- Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- 4. Longitud de la superficie de falla L_r .**- Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- 5. Profundidad de la masa desplazada D_d .**- Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- 6. Profundidad de la superficie de falla D_r .**- Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- 7. Longitud total L .**- Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- 8. Longitud de la línea central L_{cl} .**- Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se dilata. El término “Factor de expansión” puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento.

En algunas ocasiones como en el caso de roca el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

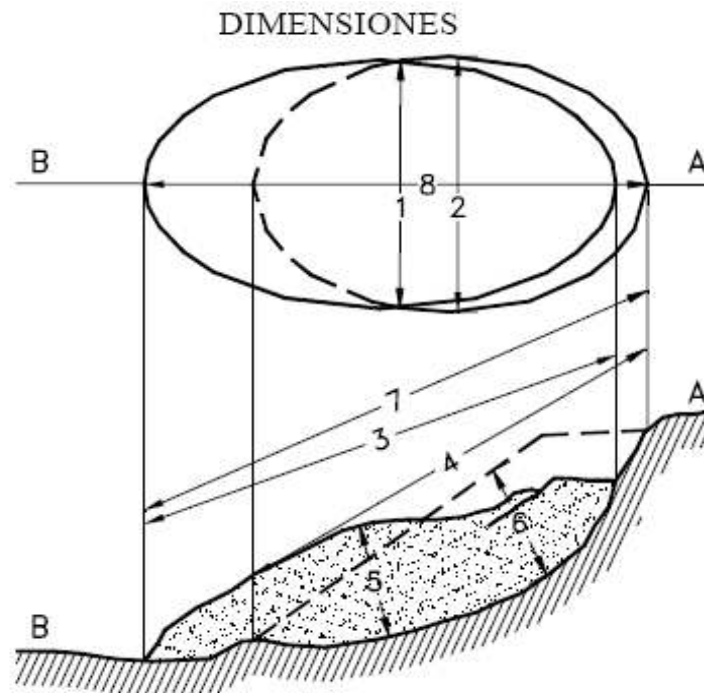


Figura 7. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG

1.7. FACTORES DE INESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE CARRETERAS

Algunos de los factores de inestabilidad de los taludes de carreteras son:

A. Geología de la región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen uno de los mecanismos de modificación (Schuster and Krizek 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial del deslizamiento de taludes.

El relieve y la topografía están determinados por la geología del área, lo que permite estimar la susceptibilidad al movimiento en el nivel regional.

En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas, sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves. A continuación se incluye una breve descripción de las características de estos relieves.

a. Taludes escarpados: En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de derrumbe en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca, por ello, una fuerte lluvia o un corte al pie del talud pueden activar el deslizamiento de la masa suprayacente.

b. Áreas de concentración de drenaje y filtración: Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Es probable que ocurran filtraciones con el subsecuente deslizamiento en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada. Es importante reconocer el peligro potencial de las áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas.

c. Áreas de concentración de fracturas: El movimiento de taludes puede estar estructuralmente condicionado por superficies débiles tales como fallas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales que pueden actuar independientemente una de la otra.

Por ello, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo sino como una serie de bloques individuales; estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación, lo cual debilita los bloques y reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, se debe buscar cuidadosamente las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando éstas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques que lo hacen más inestable.

B. Topografía y estabilidad

Los mapas topográficos representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos y, algunas veces, se puede identificar en ellos grandes áreas de deslizamiento. En los mapas topográficos, la escala y el intervalo de las curvas de nivel facilitan la identificación de los deslizamientos. Esta identificación se puede llevar a cabo mediante:

a. Características topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja.

b. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.

c. Movimientos menores o irregularidades en zonas de pendientes empinadas, acantilados, bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

La identificación de deslizamientos en mapas topográficos se verá ayudada por la escala y el intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

C. Efecto de la resistencia del suelo y la pendiente del talud

El suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera se llama también condición drenada o a largo plazo y la segunda, condición no drenada o a corto plazo.

D. Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de los taludes ya que influye en la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, generalmente no saturados, el efecto acumulativo puede llegar a saturar el terreno y activar un deslizamiento.

Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a) **El ciclo climático** en un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual versus baja precipitación anual
- b) **La acumulación de pluviosidad** en un año determinado en relación con la acumulación normal.
- c) **Intensidad** de una tormenta específica.

Guidicini e Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación con la pluviosidad y establecieron el coeficiente del ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente del ciclo fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil, la cual presenta un clima tropical caracterizado por una estación seca de junio hasta agosto y una estación húmeda desde enero hasta marzo.

Los resultados del estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno que eleva el nivel freático, por lo tanto, una tormenta durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda tendría un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad al final de la estación húmeda.

E. Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento. La erosión por agentes humanos incluye cualquier actividad que permite un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección, como la tala de árboles u otro tipo de vegetación que ayuda a fijar el suelo y mejorar la estabilidad del talud. La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, incrementa la incidencia de taludes inestables y puede resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión que en los lagos o embalses incrementan la turbidez de las aguas y crean un peligro para la vida acuática, contaminan el agua potable y reducen la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y cascajo. En taludes, la protección consiste en:

- a) **Sembrar vegetación** de rápido crecimiento además de instalar un sistema de control del drenaje superficial.
- b) **Instalar fajinas** en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas.
- c) **Sellar las grietas superficiales** con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración, lo cual reduce la erosión.

F. Licuefacción debido a acciones sísmicas

La mayoría de las fallas de los taludes durante sismos se debe al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos, sin embargo, también se han observado fallas en suelos cohesivos durante algunos eventos sísmicos de gran magnitud.

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas, la cual puede ser activada por la repetida aplicación de pequeños incrementos o decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La pérdida de resistencia es de tal magnitud que momentáneamente el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado y se originan grandes deformaciones.

Los fenómenos de licuefacción se han observado generalmente en depósitos aluviales recientes compuestos por granulares, como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos.

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son:

1. **La granulometría** (tamaño, gradación y forma de granos).
2. **La densidad relativa** del depósito.

Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas que contienen menos de 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tienen la tendencia a depositarse de manera suelta y presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno.

1.7.1. SUPERFICIES PREFERENCIALES DE FALLA

Llamamos falla a la ruptura de un estrato rocoso debido a un esfuerzo en la que se puede observar un desplazamiento. Si no hay desplazamiento decimos que hay una diaclasa, y si no atraviesa la roca decimos que es una fisura. Si el desplazamiento no consigue romper los estratos pero hay una acentuación significativa y brusca del buzamiento de los estratos, estirados y adelgazados, se llama flexión.

Las superficies de falla de un talud son aquellas zonas dentro del talud que delimita la superficie probable de rotura o deslizamiento, la cual se encuentra relacionada con las condiciones geotécnicas del talud, de allí la importancia del conocimiento del tipo de material, formación y estructura geológica y propiedades mecánicas del talud, entre otros, así como, los factores externos topográficos, sísmicos y climatológicos, complementados con las condiciones de aguas superficiales y subterráneas, que permitirán analizar el comportamiento de un talud (factores de seguridad) y definir las obras necesarias para su estabilización.

El movimiento se hace según una superficie de falla que no es siempre un plano de falla. La superficie es, algunas veces vertical y generalmente inclinada presentando una cierta pendiente. En este último caso, el labio superior, reposando sobre el plano de falla, es el techo el labio inferior es el muro.

La intersección de la superficie de falla con el terreno (o, si el relieve es fuerte, por un plano horizontal) es la traza, la línea de falla. La falla puede ser, con relación a la dirección (de las capas) longitudinales, direccionales, transversal, u oblicua.

1.7.1.1. Discontinuidades Heredadas

Las juntas, fracturas, foliaciones, planos de estratificación, laminaciones, diques, orientaciones de los minerales y demás discontinuidades de la roca original; se convierten en discontinuidades dentro de la masa de suelo residual que actúan generalmente como superficies de debilidad por su baja resistencia, relacionadas no sólo por la fractura en sí, sino también con la meteorización preferencial a lo largo de éstas, ya que actúan como conductos del agua y demás agentes meteorizantes, que facilitan no sólo el transporte y depósito de subproductos sino la formación de redes de presión de agua y de disipación de succión a lo largo de los planos de discontinuidad. Las juntas heredadas controlan, en la mayoría de los casos, el régimen del agua infiltrada después de una lluvia.

En la mayoría de los deslizamientos que ocurren en suelos residuales la superficie de falla coincide en áreas importantes con grupos de discontinuidades heredadas, las que algunas veces están rellenas de materiales débiles comúnmente arcillas que absorben agua, se expanden y se ablandan muy fácilmente; y es común que su existencia y significancia sólo se identifica después de que ha ocurrido una falla.

Observaciones del flujo de agua subterránea indican que el agua fluye a lo largo de rutas tales como las discontinuidades heredadas y conductos internos de erosión.

Las discontinuidades debidas a procesos de metamorfismo de las rocas , conocidos como pizarrosidad, esquistocidad, foliación etc. forman superficies generalmente paralelas de baja cohesión a través de las cuales los materiales se pueden partir fácilmente o producirse fenómenos de desmoronamiento y flujos secos de material desintegrado.

Muchos tipos de relleno diferente se pueden encontrar a lo largo de las discontinuidades pero generalmente se trata de materiales arcillosos y su espesor

puede variar desde capas microscópicas hasta centímetros. Este relleno puede provenir de materiales lavados de capas superiores o de meteorización en el sitio.

La detección y evaluación de los efectos de las estructuras heredadas es de primordial importancia en los estudios geotécnicos para casos de estabilidad de taludes, pero esta es muy difícil con el sistema de perforaciones con taladro. Irfan y Woods(1988) recomiendan hacer excavaciones de gran tamaño y reportan zanjas de hasta 20 metros de profundidad para establecer el "pattern" de discontinuidades heredadas; y estas excavaciones pueden programarse como parte de los cortes definitivos. Adicionalmente se recomienda el mapeo de las discontinuidades a medida que se avanza con los cortes para detectar la necesidad de modificar el diseño.

1.7.1.2. Espejos de Falla

Los espejos de falla son discontinuidades lisas, que pueden ser el producto de movimientos tectónicos en la roca original, los cuales se preservan en el suelo residual; o pueden ser causados también por movimientos diferenciales ocurridos dentro de suelos areno-limosos por acción del proceso de meteorización. Es difícil diferenciar entre superficies antiguas o recientes y en ocasiones se puede observar más de una dirección de estriado en la misma discontinuidad (Irfan y Woods- 1988).

La resistencia al corte a lo largo de los espejos de falla es particularmente baja y muchos deslizamientos son controlados por estas superficies de falla.

1.7.1.3. Zonas de Cambio de Permeabilidad

Para empezar diremos que la permeabilidad es el actor que mide la resistencia de los materiales al libre flujo del agua, y puede definir el régimen de aguas subterráneas, concentración de corrientes, etc.

Como su nombre lo indica son zonas en las que la permeabilidad cambia, la presión de poros elevada provoca deslizamientos y el flujo de agua, a través del suelo, puede originar tubificación y arrastre de partículas sólidas, es por este motivo que el cambio de permeabilidad en un talud es tan importante.

1.7.2. IMPORTANCIA DE LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

A. Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

Coeficiente de rozamiento = $\tan \Theta$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son:

- a) Tamaño de los granos.
- b) Forma de los granos.
- c) Distribución de los tamaños de granos.
- d) Densidad.

B. Cohesión

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.

La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y se los denomina Suelos no Cohesivos.

C. Cohesión aparente

En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares, a este fenómeno se lo conoce como cohesión aparente. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.

1.7.2.1. Suelos Cohesivos y No Cohesivos

Los suelos cohesivos poseen la propiedad de la atracción intermolecular, como ejemplo las arcillas.

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación, como la arena y la grava.

1.7.2.2. Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que es su conformación presentan gran cantidad de arcilla, éstos presentan características de cimentación, que depende de la cantidad de arcilla que presente el suelo en cuestión, los suelos arcillosos son muy buenos para la agricultura por la propiedad de almacenar agua, pero son muy malos para las obras civiles.

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico.

El tipo sílice se encuentra formado por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno. La unión entre partículas se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

El tipo alumínico está formado por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno.

1.8. MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. En los últimos años se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, pero se requiere todavía de un gran esfuerzo de investigación en este tema.

1.8.1. CONDICIONES DRENADAS Y NO DRENADAS

Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior, en suelos de baja permeabilidad, éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso se dice que las condiciones son no drenadas.

Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poro en exceso y se comportan en condiciones drenadas.

Para tasas normales de carga, que equivalen a meses o semanas, suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg., se pueden considerar drenadas y suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg., se consideran no drenadas.

Mientras las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas.

Duncan (1996) recomienda que para los taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros debida a las lluvias, el problema debe analizarse como condición drenada.

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

Donde:

$$T = \text{Factor adimensional.} \quad T = \frac{C_v t}{D^2}$$

C_v = Coeficiente de consolidación

t = Tiempo de drenaje

D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T es mayor de 3 la condición es drenada.

Si T es menor de 0.01 la condición es no drenada.

Si T está entre 0.01 y 3.0 ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas.

En este caso deben analizarse ambas condiciones.

El caso drenado y el caso no drenado.

1.8.2. ANÁLISIS CON ESFUERZOS TOTALES O EFECTIVOS

Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada. Pero en la práctica sin embargo es virtualmente imposible determinar con precisión cuales son los excesos de presión de poro que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). Debido a esta razón no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, se puede trabajar todo el análisis utilizando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poro en las condiciones no drenadas.

1.8.3. RESISTENCIA AL CORTANTE

La resistencia al cortante para utilizar en los análisis puede ser medida de dos formas:

- a) En el laboratorio o en ensayos de campo, en tal forma que las cargas aplicadas, sean lo suficientemente lentas para que se produzca drenaje.
- b) En el laboratorio utilizando ensayos consolidados no drenados.

Las envolventes de falla determinadas usando estos dos métodos se han encontrado que son las mismas para todos los fines prácticos (Bishop y Bjerrum, 1960).

Estudios realizados por Skempton revelan que las resistencias drenadas pico de arcillas sobre consolidadas duras, son mayores en el laboratorio que las resistencias drenadas que pueden ser movilizadas en el campo en un período de tiempo.

Skempton recomienda realizar los ensayos remoldeando la arcilla en el laboratorio a un contenido de agua cercano al límite líquido, reconsolidándolo en el laboratorio y midiendo la resistencia en una condición normalmente consolidada. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda utilizar las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977, 1985).

Para suelos parcialmente saturados tales como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas deben obtenerse utilizando ensayos no consolidados no drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en el campo. La envolvente de falla para esos suelos generalmente, es curva y por lo tanto es importante utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento en los ensayos de laboratorio que en el campo.

Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada de ensayos no consolidados no drenados.

1.8.4. PESOS UNITARIOS Y PRESIONES DE PORO

Los problemas de estabilidad de taludes pueden formularse correctamente en términos de esfuerzos totales, utilizando pesos unitarios totales y límites externos de presión de poros.

Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático, y saturados por debajo del nivel freático. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático.

Las condiciones de presión de poros son generalmente, obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos:

1. Superficie freática

Esta superficie o línea en dos direcciones se define como el nivel libre del agua subterránea.

En una superficie freática la presión de poros es calculada de acuerdo a las condiciones de estado de régimen permanente (Steady-state), de acuerdo al diagrama que se muestra en la figura. Este concepto se basa en la suposición de que todas las líneas equipotenciales sean ortogonales. Entonces, si la inclinación del segmento de superficie freática es θ y la distancia vertical entre el punto y la superficie freática es hw , entonces la presión de poros está dada por la expresión $u = \gamma w (hw \cos^2 \theta)$.

En el caso de líneas freáticas de gran pendiente, el cálculo anterior puede resultar sobre estimado y se requiere tener en cuenta que las líneas equipotenciales tienden a ser curvas.

2. Datos piezométricos

Es la especificación de presiones de poros en puntos discretos dentro del talud y la utilización de un esquema de interpolación para estimar las presiones de poro requeridas a cualquier punto. Las presiones piezométricas pueden determinarse mediante piezómetros, redes de flujo o soluciones numéricas, utilizando diferencias finitas o elementos finitos.

Aunque este sistema está disponible solamente en muy pocos de los programas de computador existentes, se recomienda por su confiabilidad para representar las condiciones reales en el campo (Chugh, 1981).

3. Relación de presión de poros

Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo a la definición:

Donde:
$$r_u = \frac{u}{\delta_v}$$

u = Presión de poros

δ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

Este factor se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro a diferentes partes del talud. En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores de r_u .

4. Superficie piezométrica

Esta superficie se define para el análisis de una determinada superficie de falla. Debe tenerse claridad en que la superficie piezométrica no es la superficie freática y que el método de calcular la presión de poros es diferente para los dos casos.

En la superficie piezométrica, la presión de poros es la distancia vertical entre la superficie piezométrica indicada y el punto (figura 1.3).

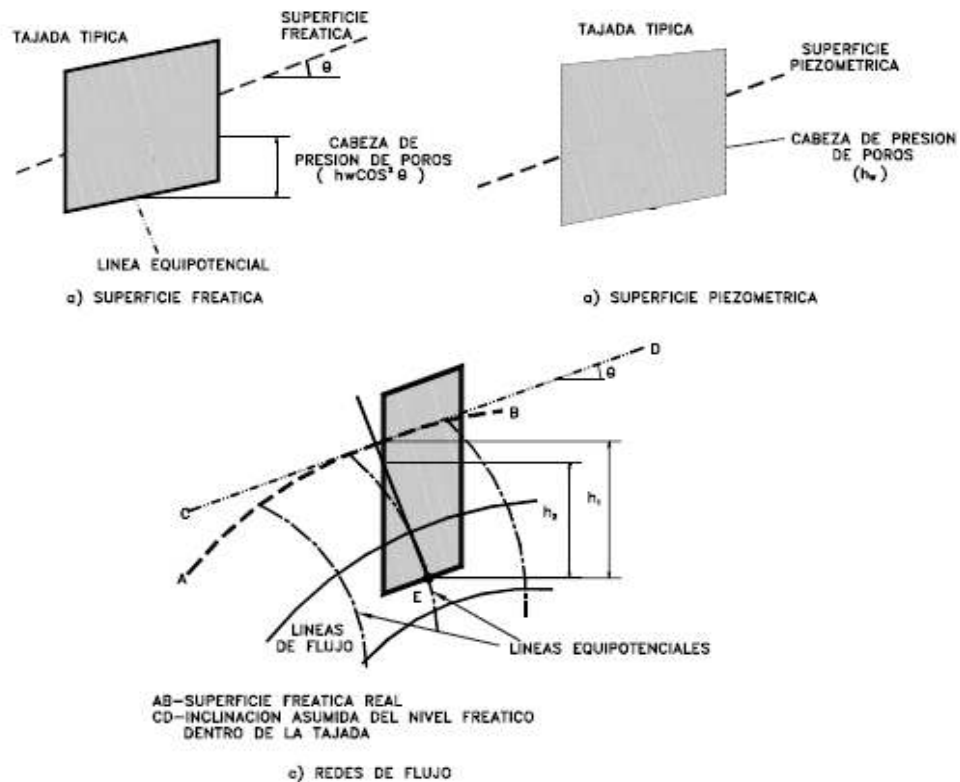


Figura 8. Presión de poros en las tajadas de análisis de estabilidad.

5. Presión de poros constante

Este procedimiento puede utilizarse si se desea especificar una presión de poros constante en una determinada capa de suelo. Este sistema puede utilizarse para analizar la estabilidad de rellenos colocados sobre suelos blandos, durante la construcción donde se generan presiones de poro, de acuerdo a la teoría de la Consolidación.

1.8.5. GRIETAS DE TENSIÓN EN LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar, la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente la grieta puede llenarse con agua, en el caso de lluvias.

La profundidad de las grietas de tensión puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión:

Donde:
$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Z_c = Profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

γ = Peso unitario del suelo

ϕ = Ángulo de fricción

Generalmente se recomienda la utilización de parámetros efectivos.

La presencia de grietas de tensión dificulta en forma considerable la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Las grietas de tensión son muy importantes y profundas en cortes de taludes, donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación.

1.9. EQUILIBRIO LÍMITE Y FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado . U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Morgenster n y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos Finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza Esfuerzos y Deformacio nes	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmi- ca	Espiral Logarítmi- ca	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Tabla. 1.

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

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia.al.Corte}}{\text{Esfuerzo.al.Corte}}$$

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

$$F.S. = \frac{\text{Momento.Resistente}}{\text{Momento.Actuante}}$$

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

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie (Tabla 2.1.).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

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

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias.al.Corte}}{\sum \text{Esfuerzos.al.Corte}}$$

1.9.1. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El análisis de la estabilidad de un talud es un proceso de tanteos, con suposiciones de las condiciones más críticas que en un momento dado in pueden presentar.

En términos generales los pasos a seguir son:

1. Se supone una superficie de falla, la cual puede ser
 - El pie del talud
 - La baso del talud
 - El talud

Después de haber hecho esto se habrá determinado:

- Una masa deslizando
- Una superficie de deslizamiento

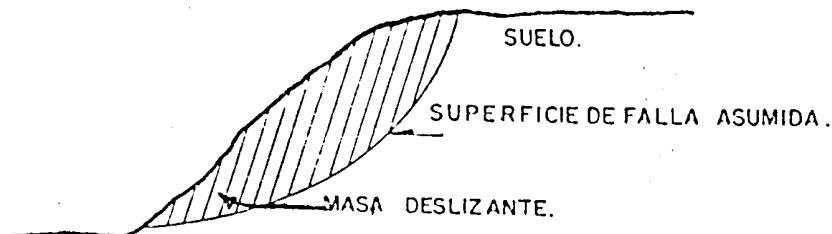


Figura 9. Determinación de la masa deslizando

Al haber definido la masa deslizando, se podrá calcular las fuerzas que producen el deslizamiento, llamadas también fuerzas motoras.

Al haber definido la superficie de falla se podrá calcular las fuerzas que se oponen al deslizamiento, llamadas también fuerzas resistentes.

2. Calcular los momentos:
 - Momentos resistentes
 - Momentos Motores o Deslizantes.
3. Calcular el factor de seguridad (F.S) para la superficie de falla dada
 - Si la falla es del tipo translacional, el F.S. resulta de comparar las fuerzas:

$$F. S. = \frac{\sum Fzas Resistentes}{\sum Fzas Deslizantes}.$$
 - Si la falla es del tipo rotacional, el F.S. resulta de comparar los momentos.

$$F.S. = \frac{\sum Mtos. Resistentes}{\sum Mtos. Deslizantes}$$

El F.S. hallado es para la superficie de falla, asumida y no necesariamente es el F.S. del talud.

Al repetir los pasos anteriores para otras superficies de falla, se obtendrá un F.S. mínimo el cual corresponde al del talud.

Significado de los factores de seguridad (sowers y sowers).

F.S.	Significado
Menor que 1	Inseguro
1.0 - 1.2	Seguridad dudosa
1.2 - 1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudosa para presas
1.5	Seguro para presas

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

1.9.1.1. Método Sueco

Aplicable para suelos netamente cohesivos ($C \neq 0$, $\phi = 0$)

El F.S. calculado por éste método da valores entre 10 a 15% más bajos que otros métodos más exactos. Es empleado para casos de práctica común; debido a que es muy sencillo y en el caso de taludes en los cuales el riesgo no es grande.

Este método se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea independiente de los esfuerzos normales al plano de la falla ($T = C$), tales como las arcillas poco sobreconsolidadas y taludes después de construídos o en los casos de aplicación de nuevas cargas sobre él.

- Se elige una circunferencia que puede considerarse como posible círculo crítico.
- Se determinan las fuerzas actuantes y las resistentes.
- Se calculan los momentos.
- Por último se determina el factor de seguridad.

En la siguiente figura se indica los pasos a seguir:

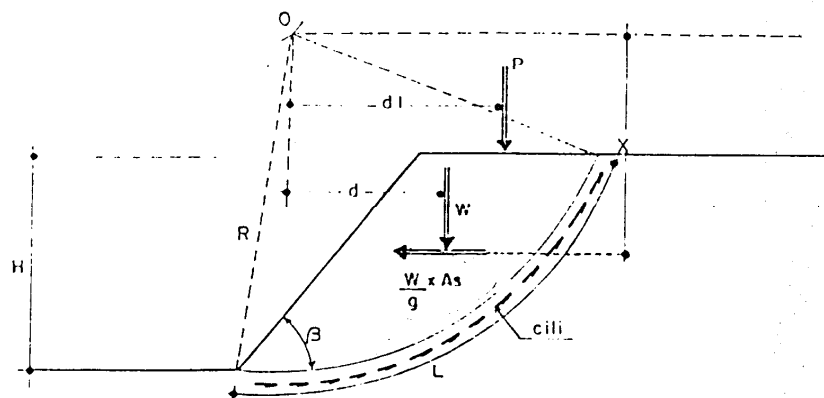


Figura 10. Fuerzas que actúan en el deslizamiento.

Cálculo de momentos actuantes o deslizantes:

$$M_m = W * d + p * d_1 + \frac{W}{g} * A_s + X$$

Cálculo de momentos resistentes:

$$M_r = R \quad C_i * L_i = R * C * L$$

Determinación del factor de seguridad (PS)

$$F.S. = M_r / M_m$$

1.9.1.2. Método Ordinario o de Fellenius

Es conveniente utilizar éste método cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es función de los esfuerzos normales o sea. : $T = C + \sigma \tan \phi$

Consiste en:

1. Darse una superficie de falla circular
2. Dividir la zona de falla en una serie de franjas verticales o dovelas de cualquier espesor.
3. Determinar las fuerzas que actúan en cada dovela.
4. Calcular los momentos resistentes y los momentos motores que actúan a lo largo de la superficie de falla.
5. Calcular el F.S.

Ejemplo: Para un suelo cuya resistencia está dada por la siguiente expresión: $T = C + \sigma \tan \phi$ (o sea con esfuerzos totales) sin N.F.

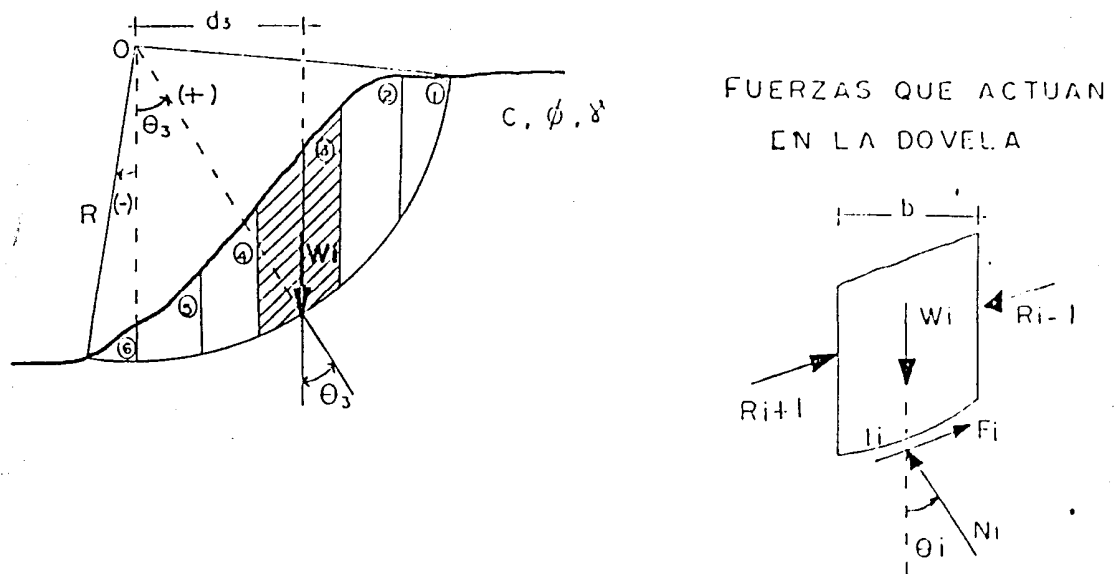


Figura 11. Diagrama utilizado por Fellenius.

- Donde:
- b = ancho de dovela
 - l_i = arco de la dovela
 - θ_i = ángulo que forma la vertical que pasa por el centro de gravedad de cada dovela y la normal a la base de la dovela, puede ser (+) o (-).
 - W_i = peso de cada dovela
 - R_{i-1} y R_{i+1} = Fuerzas laterales de las dovelas
 - F_i = Fuerzas tangenciales en la base de la dovela.
 - N_i = Fuerzas normales en la base de la dovela.

Este método asume que:

Las fuerzas R_{i-1} y R_{i+1} se convierten en reacciones interiores cuando se pasa de una dovela a otra y por lo tanto la suma de momentos de estas fuerzas es nulo.

Pues al sumar los momentos producidos por estas fuerzas, lo único que queda son las reacciones para los puntos extremos (primar y última dovela) donde la altura de cada dovela es nula, con lo que resulta valores nulos.

Fuerzas que se deben considerar según Fellenius.

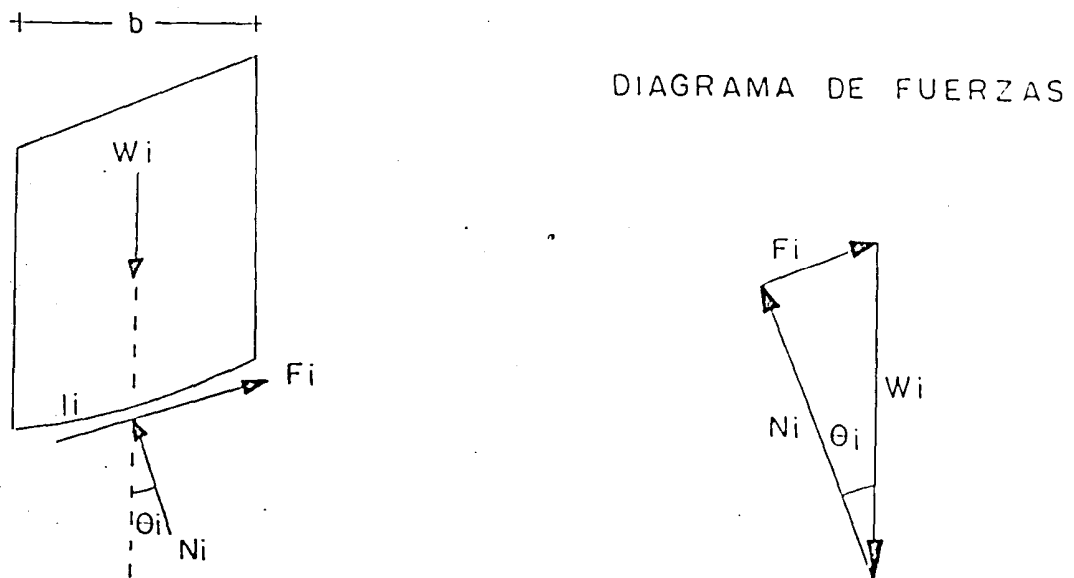


Figura 12. Fuerzas consideradas por Fellenius.

W_i - Conocida en magnitud y dirección

N_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

F_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

Cálculo de Momentos:

$$M_R = \sum R.FI = R \sum (C_i \cdot l_i + N_i \cdot \tan \phi)$$

$$N_i = W_i \cdot \cos \theta_i$$

$$M_R = R \sum (C_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)$$

$$M_m = \sum d_i \cdot W_i = R \sum W_i \cdot \sin \theta_i$$

$$F.S. = \frac{M_R}{M_m} = \frac{\sum (C_i \cdot l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i}$$

Observaciones a esta ecuación:

1) Para facilitar los cálculos y poderlos tabular se sustituye:

$$l_i = b / \cos \theta$$

2) El momento resistente depende de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y se desarrolla en la base de las dovelas y tiene siempre dirección contraria al movimiento, la suma que se hace es aritmética.

3) En cuanto al momento motor, existen dovelas que dan momentos estabilizantes y desestabilizantes, por lo tanto la suma es algebraica.

4) Se aconseja tomar de 8 a 12 dovelas como máximo, para obtener un resultado satisfactorio.

5) El F.S. calculado es para el círculo asumido y no es el del talud.

Casos que se pueden contemplar con este método:

a) Cuando hay varios estratos con diferentes resistencias al esfuerzo cortante.

- Se puede aplicar la misma expresión, pero teniendo en cuenta que:

C_i = Es la cohesión en la base de cada dovela.

ϕ_i = Es el ángulo de fricción interna en la base de cada dovela

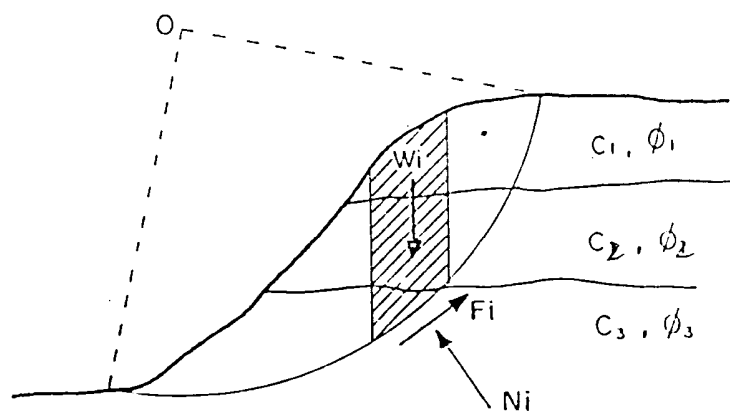


Figura 13. Talud con diferentes estratos

b) Si hay sobrecarga su efecto se debe incluir sobre las dovelas en las cuales actúa y puede haber sobrecargas estabilizantes y desestabilizantes.

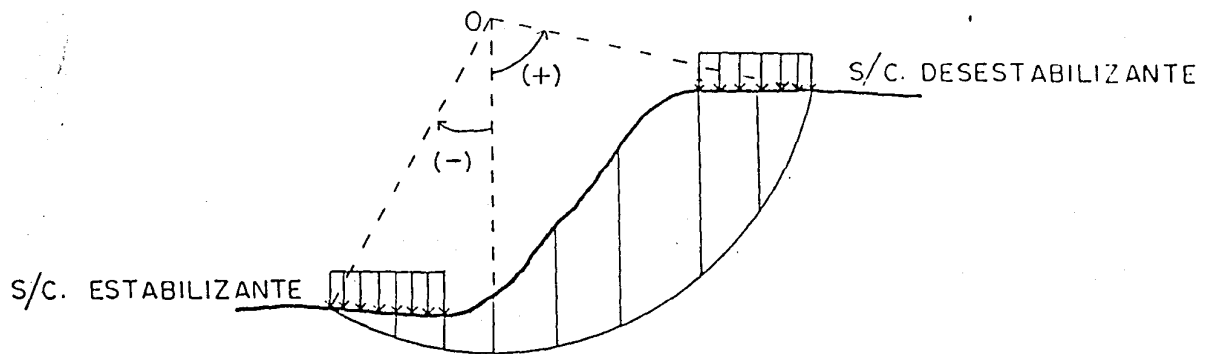


Figura 14. Talud con cargas externas.

c) Si el talud está parcialmente sumergido y experimenta flujo interno de agua, se puede aplicar este método.

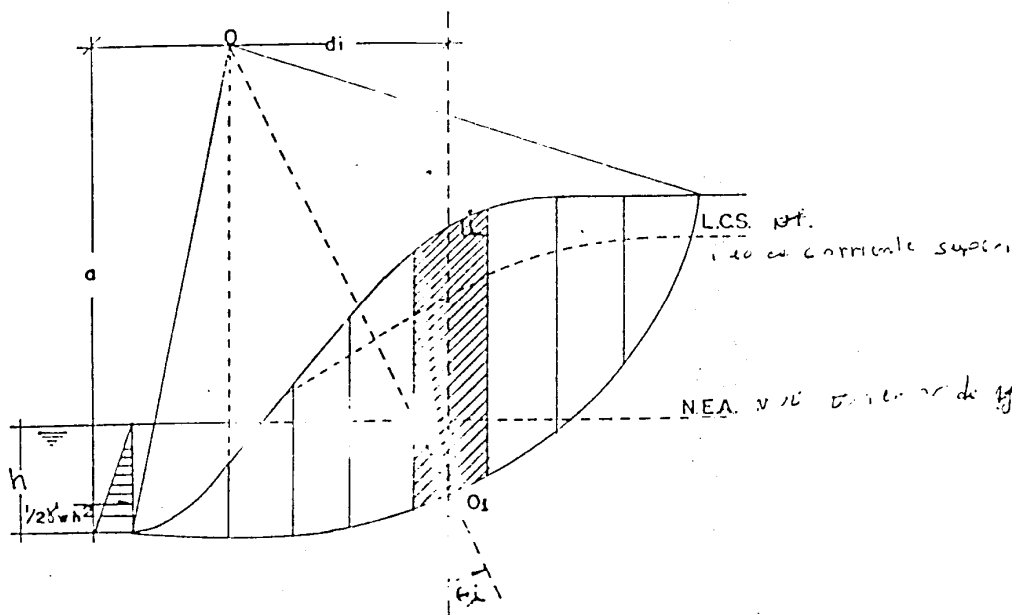


Figura 15. Talud parcialmente sumergido.

Nuevamente haciendo un análisis de las fuerzas que actúan en una dovela típica y con base en la suposición de Fellenius el cual asume que las fuerzas en las caras laterales son nulas, se tienen las siguientes fuerzas que deben considerarse según Fellenius

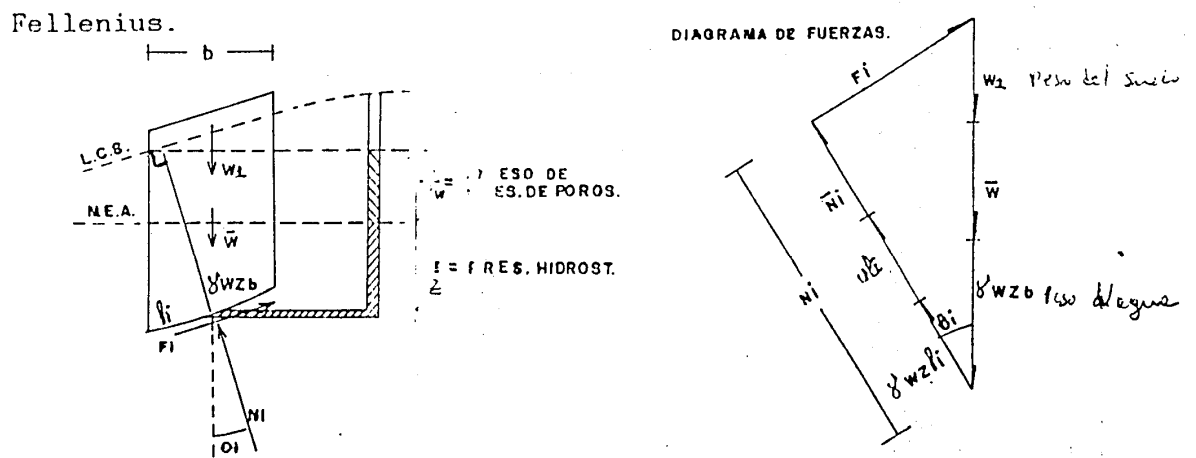


Figura 16. Fuerzas actuantes en talud parcialmente sumergido.

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A., se calcula con γ

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A., se calcula con

$$\gamma = \gamma - \gamma_w$$

$\gamma_w Z_b$ = Peso del agua de la parte de la dovela que está por debajo del N.E.A.

u = Exceso de presión de poros. Se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Cálculo del momento resistente

Este momento depende de la resistencia que se desarrolla en la base de la dovela.

Puede ser en esfuerzos efectivos.

$$F_t = C_t l + \bar{N}_i \tan \phi$$

Según el polígono de fuerzas

$$\bar{N}_i = (W_i + \bar{W} \cos \theta_i - \mu l_i)$$

El momento resistente

$$M_R = R \sum (c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi)$$

Cálculo del momento motor

$$M_m = R \sum (W_1 + W) \text{Sen} \theta_i$$

$$F.S. = \frac{\sum c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi}{\sum (W_1 + \bar{W}) \text{Sen} \theta_i}$$

1.9.1.3. Método de Bishop

Para superficie de falla circular, se siguen los mismos pasos del método de Fellenius.

Este método supone que las fuerzas que actúan en las caras laterales de una dovela, tienen una resultante nula en la dirección vertical o sea que

$\sum (V_n - V_{n-1}) = 0$, con lo cual elimina correctamente las fuerzas E_i , en general mucho más importante que las fuerzas V_i .

Fuerzas que actúan en
en una dovela.

Fuerzas que actúan en una dovela
según Bishop modificado.

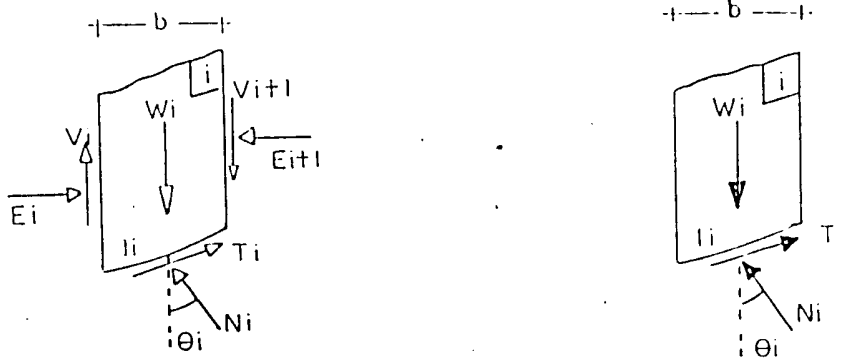


Figura 17. Fuerzas actuantes según Bishop.

Donde:

W_i = Peso de la dovela

N_i = Fuerza normal a la base de la dovela

T_i = Fuerza resistente que está actuando en el momento del análisis.

$$T_i = \frac{T}{F.S.} T$$

Para el equilibrio de la masa se debe cumplir que:

$$\Sigma F_V = 0$$

$$\Sigma M_o = 0$$

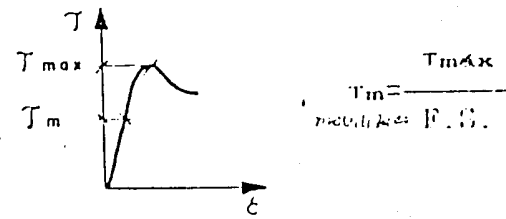


Figura 18. Gráfica de esfuerzos.

Después de hacer el equilibrio de fuerzas y de momentos se llega a la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / (\cos\theta_i + \text{sen}\theta_i * \frac{\tan\theta}{F.S.})}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Pero: $M\theta_i = \cos\theta_i + \text{sen}\theta_i \frac{\tan\theta}{F.S.}$

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / M\theta_i}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Donde:

C_i = Cohesión en la base de la dovela

b = Ancho de la dovela

W_i = Peso de la dovela

θ_i = Ángulo que forma la vertical y la normal en el centro de gravedad de la base de la dovela y puede ser (+) o (-)

$M\theta_i$ = Se calcula con una fórmula que se basa en θ_i y $\tan\phi/F.S.$

Nota: Esta ecuación da un F.S. para un cálculo tentativo, debe resolverse por un proceso interactivo, debido a que el F.S. está en ambos lados de la ecuación, pero su convergencia es rápida.

Cuando el talud está parcialmente sumergido y hay flujo de agua.

$$F.S. = \frac{\sum [c \cdot l + (W_1 + \bar{W} - ulb) \tan\phi] / M\theta_i}{\sum (W_1 + \bar{W}) \sin\theta_i}$$

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A. se calcula con γ .

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A. se calcula con $\gamma = \gamma - \gamma_w$

M = Exceso de presión de poros, se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Nota: Para medir el exceso de presión de poros, si no se ha trazado la Red de Flujo es buena aproximación medir μ en la vertical de cada dovela.

1.9.1.4. Comparación de los Diferentes Métodos

Es demasiada la cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, se considera el método de Morgenstern-Price el más exacto y complejo, considerándolo como referencia algunos autores concluyen que el método de Bishop presenta errores máximos del 7 %, siendo lo más normal del 2 %, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%, Esta aseveración fue documentada por Freddlund y Krahn (1977), otros autores concluyen que el método de Fellenius puede originar graves errores, hasta de un 40 %. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de F.S.

Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos y más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú.

En la práctica, el método de Morgenstern-Price resulta mucho más laborioso en su aplicación, por lo que su utilización se ve relegada a casos muy especiales o a temas relativos a la comparación de otros más simplificados.

1.10. OBRAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Las obras para estabilizar taludes se pueden dividir en dos grandes grupos, por un lado los métodos de protección, y por otro los de estabilización o refuerzo.

La principal diferencia entre ambos se centra en que los primeros tratan de evitar que se desarrollen posibles fenómenos de alteración en la zona del talud, lo que puede dar lugar a inestabilidades; mientras que los métodos de refuerzo o estabilización se caracterizan por actuar de forma activa en el caso que se produzcan dichos fenómenos.

En la actualidad existen variados métodos para estabilizar los taludes, estos métodos dependen generalmente del tipo de terreno.

1.10.1. Descripción de Diversas Obras de Estabilidad de Taludes en Carreteras

Existen diversas formas de estabilizar los taludes, siendo las más comunes:

- **Remodelado geométrico de los taludes.**- Este método de estabilización se refiere al cambio de la forma del talud dando una mayor inclinación, es decir realizando una descarga de los taludes, esto se puede llevar a cabo mediante:

⇒ Descabezamiento de un talud.- Al quitar peso de la parte superior del talud.

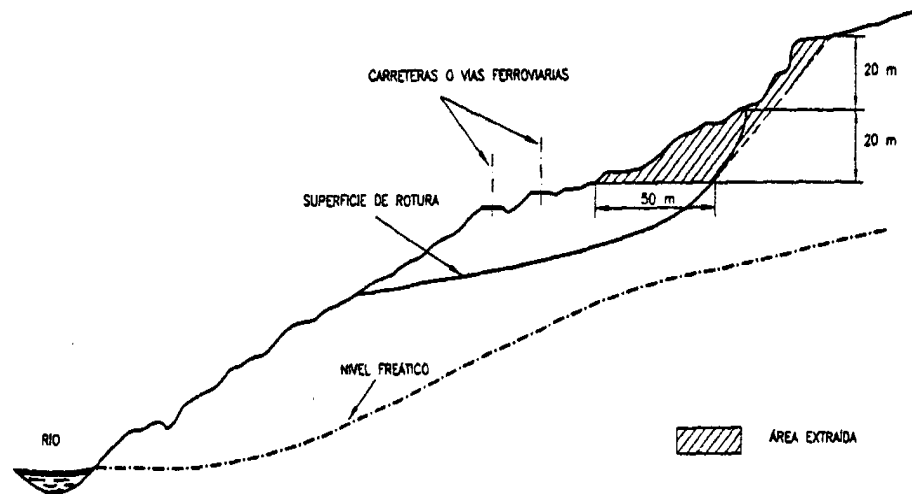


Figura 19. Descabezamiento de un talud

- ⇒ Retiro de materiales inestables.- Retiro de todos los materiales inestables o potencialmente inestables.
- ⇒ Tendido o reperfilado de los taludes.- Tender los taludes (darles mayor inclinación).

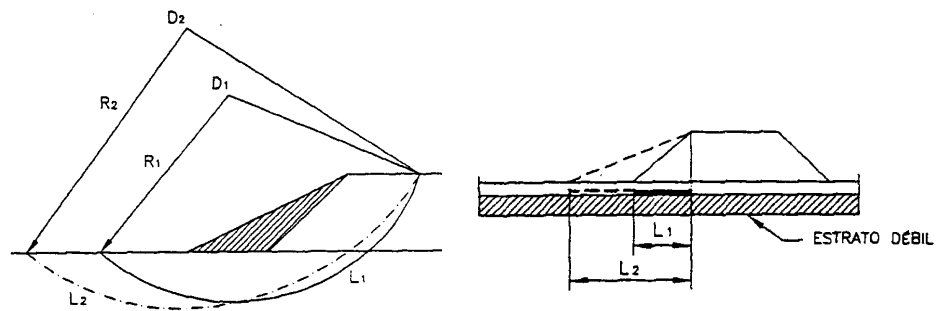


Figura 20. Tendido de Taludes

⇒ Banqueo de los taludes.- Modificar la morfología de un talud de gran altura en varios de alturas más pequeñas, por este motivo las bermas deben ser suficientemente anchas para evitar la caída de bloques de unos niveles a otros.

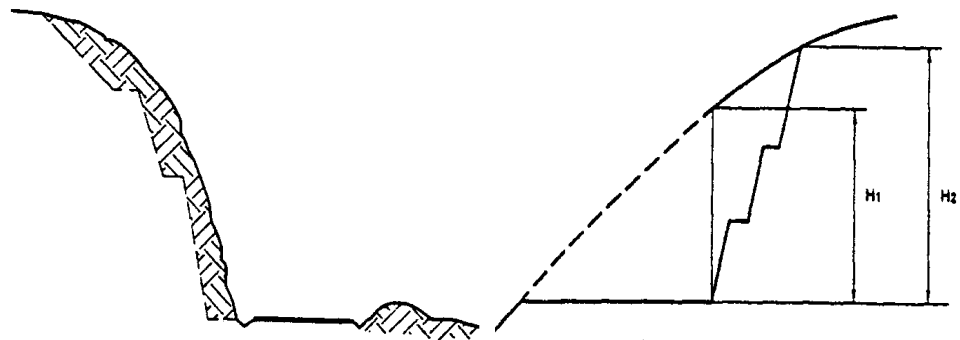


Figura 21. Banqueo de Taludes

► **Muros.**- Este método hace referencia a la utilización de muros de contención.

⇒ Muros de hormigón en masa o de gravedad.- Son los más antiguos y en ellos el propio peso actúa como estabilizador. Su relación altura/ancho (H/B) de estos muros suele estar comprendida entre 1,5 a 2, y se destaca su facilidad constructiva y reducido costo cuando son de poca altura.

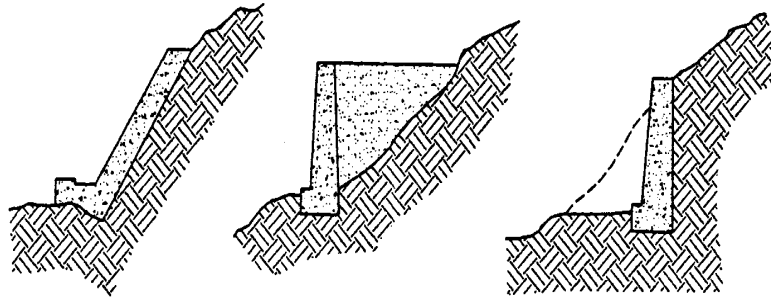


Figura 22. Muros de hormigón en masa

⇒ Muros de hormigón armado.- Son muros armados interiormente con redondos de acero y diseñados para soportar esfuerzos de tracción. Estos exigen menor cantidad de hormigón que los anteriores.

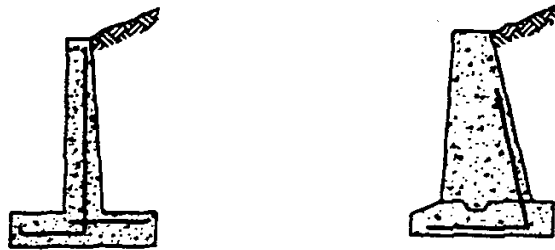


Figura 23. Muros de hormigón armado.

⇒ Muros de fábrica.- Son muros de piedras naturales ejecutados de forma natural, también se pueden utilizar ladrillos o bloques de hormigón.

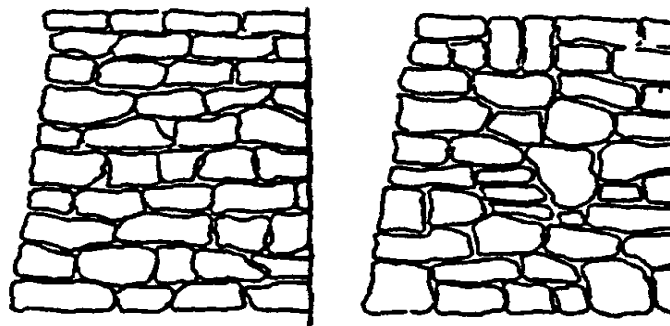


Figura 24. Muros de fábrica.

⇒ Muros Jaula.- Este tipo de muros es muy utilizado en países como Australia, Estados Unidos, Gran Bretaña, Nueva Zelanda.

Básicamente, son estructuras compuestas por cajas de madera que forman un entramado o jaula y que posteriormente se rellenan con materiales granulares incrementando así la resistencia del talud. Este tipo de muros actúan como los muros de gravedad aprovechando el propio peso de las jaulas rellenas.

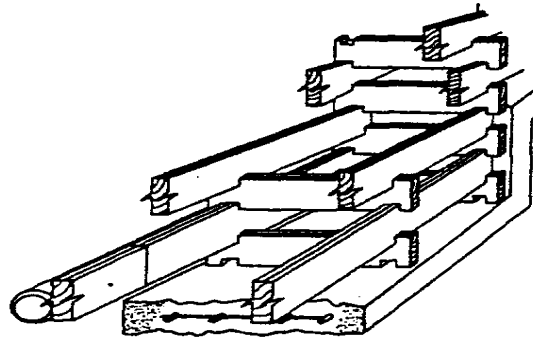


Figura 25. Muros jaula.

⇒ Muros de escollera.- El enchado consiste en la colocación de bloques de piedra natural sana compacta y resistente tales como caliza, granito, gabros, cuarcitas, etc. Con un peso específico normalmente superior a 2 Tn/m^3 y una resistencia a la compresión simple superior a los 70 Mpa. El peso de los bloques puede superar los 250 Kg.

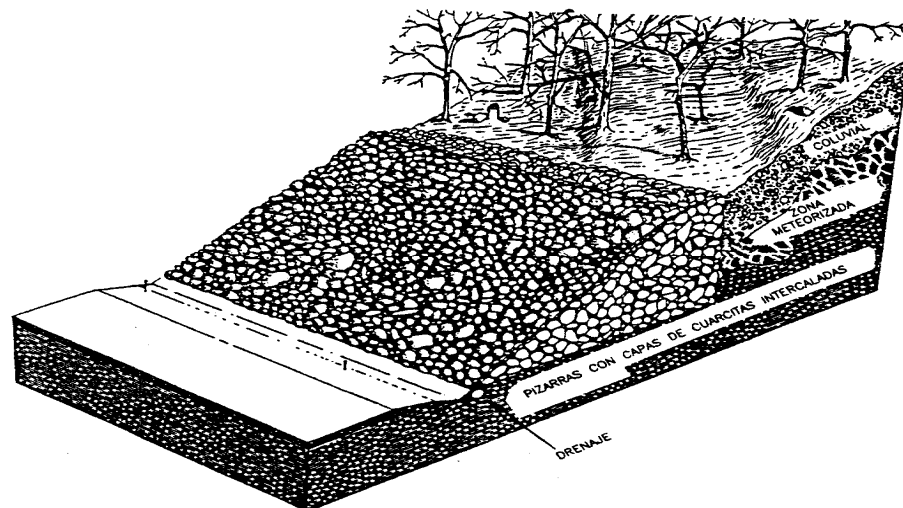


Figura 26. Muros de escollera.

⇒ Muros de neumáticos usados.- En la actualidad se está generando un gran problema de almacenamiento de cierto tipo de residuos, entre los cuales se encuentran los derivados del parque automovilístico. En diversos países industrializados, como Estados Unidos, este problema ha generado diversas controversias sobre el almacenamiento de neumáticos usados. Si se suma este punto al alto costo de los materiales de construcción, se ha llegado a la conclusión de que los neumáticos usados podrían ser reutilizados para la construcción de muros de contención.

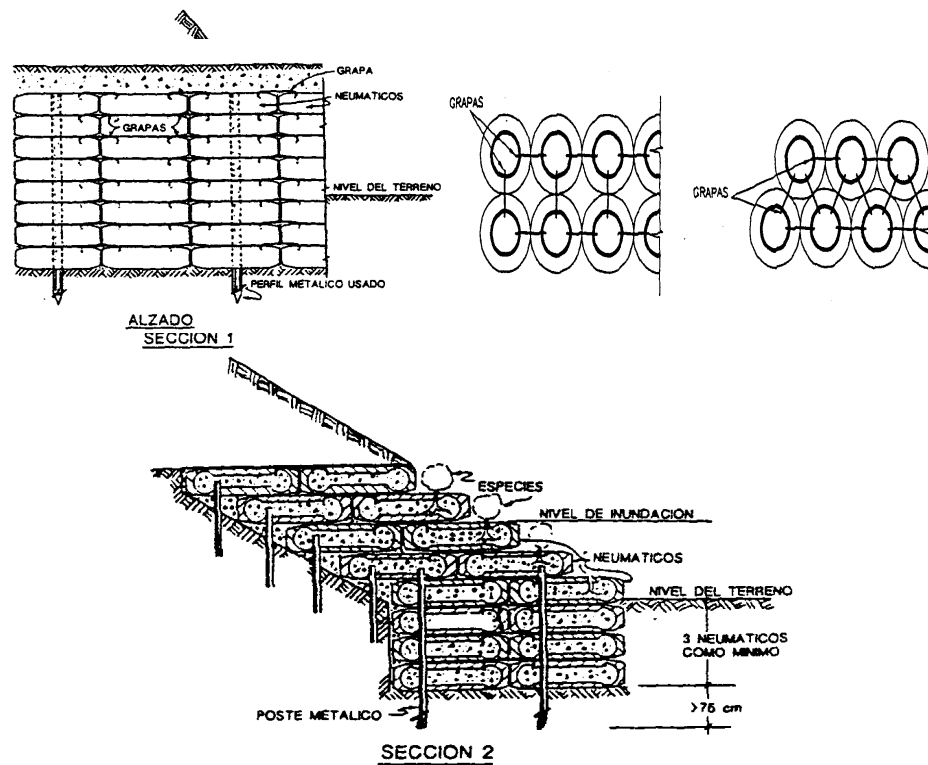


Figura 27 Muros de neumáticos usados

⇒ Muros de tierra armada.- Son muros construidos mediante tongadas de materiales de relleno, colocados entre éstos elementos tales como bandas metálicas, materiales plásticos, elementos prefabricados de hormigón o geotextiles, reforzando el muro y proporcionando, mediante el rozamiento entre el suelo y los diferentes elementos estructurales, estabilidad al conjunto.

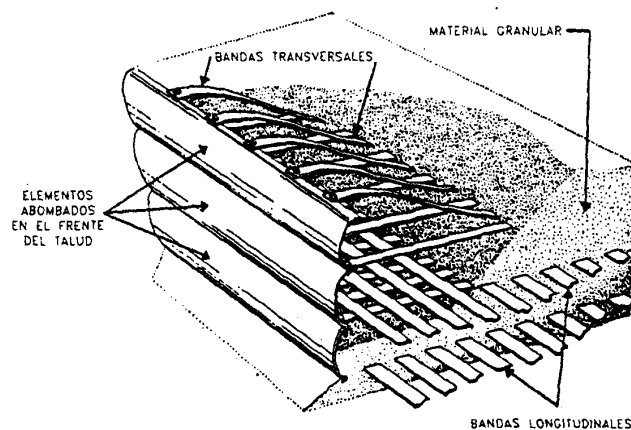
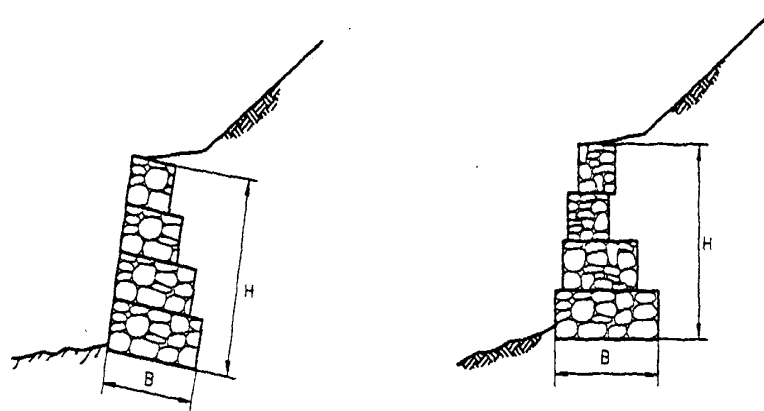


Figura 28. Muros de tierra armada.

⇒ Muros de gaviones.- Un gavión consiste en una estructura paralelepípedica elaborada con mallas de alambre galvanizado de triple torsión y rellenas con la piedras.



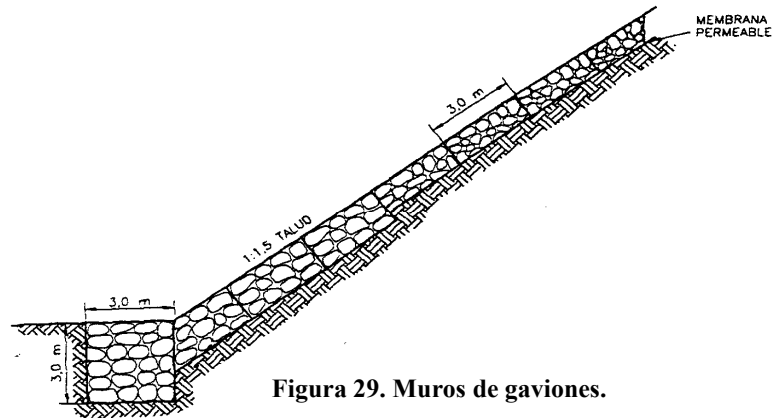


Figura 29. Muros de gaviones.

- **Refuerzos.-** Los sistemas de refuerzo son cada vez más utilizados en aquellas situaciones en las que no existe la posibilidad de utilizar contrafuertes bien por problemas de espacio para instalar un muro de contención o por que existen dificultades para realizar la expropiación de los terrenos afectados por las obras.

⇒ Reticulado de micropilotes.- Los micropilotes son estructuras o elementos de pequeño diámetro (75 – 250 mm.), compuestos de acero y mortero. Para el acero de armadura se puede utilizar tubos, perfiles laminados o redondos.

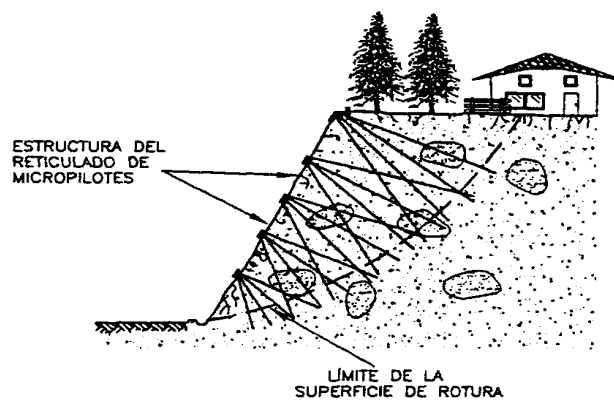


Figura 30. Reticulado de micropilotes.

⇒ Anclajes y bulones.- Los anclajes en suelos consisten en unos cables colocados dentro de taladros y pensionados después de que ha sido inyectado el hormigón. En el caso de excavaciones poco profundas, los anclajes en suelos trabajan más como elementos estructurales de sujeción. Por ejemplo, se pueden utilizar para sujetar determinados tipos de pantallas. También se puede usar para estabilizar taludes y para aumentar la resistencia de un suelo ya consolidado.

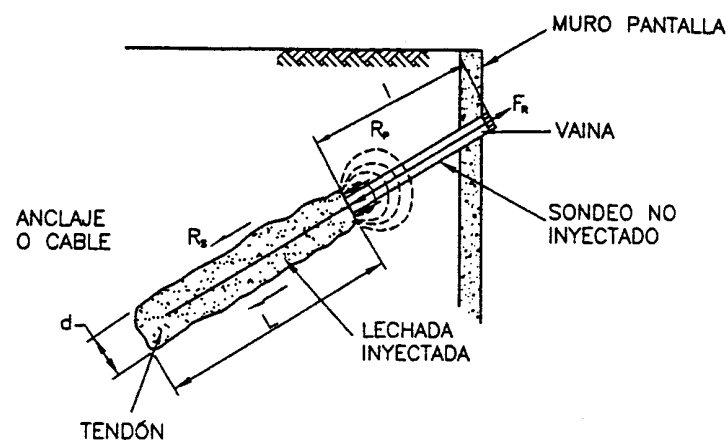


Figura 31. Anclajes y bulones

⇒ Columnas de grava.- Se utilizan para estabilizar o prevenir deslizamientos. Este método incrementa la resistencia al cizallamiento de un suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial. Reemplazando o desplazando el material in situ con varias series de columnas rellenas con gravas de gran diámetro. Adicionalmente, las columnas de grava actúan como un drenaje profundo muy efectivo.

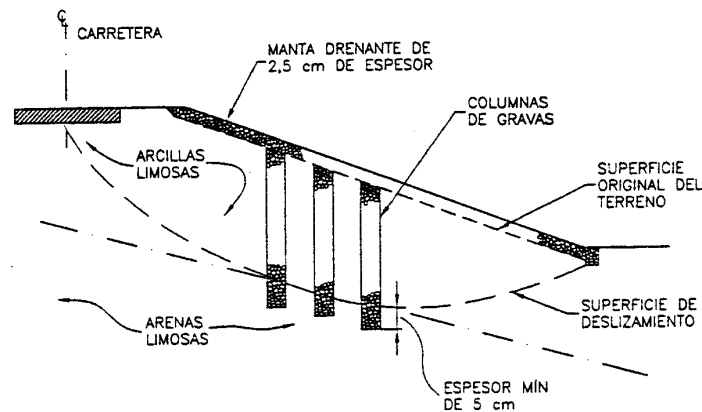


Figura 32. Columnas de grava.

- ⇒ Pilotes.- Los pilotes o pasadores son elementos de cimentación de gran longitud con respecto a su sección transversal que se empotran en una cavidad previamente excavada en el terreno. Antiguamente los pilotes que se usaban eran de madera, pero en la actualidad los únicos pilotes que se utilizan son principalmente de hormigón, aunque se puede utilizar también pasadores metálicos. Existen pilotes prefabricados y hormigonados in situ.
- ⇒ Mallas y redes metálicas.- La fijación de mallas y redes metálicas a la superficie de los taludes inmoviliza o amortigua el deslizamiento de materiales procedentes de la descomposición del sustrato y contribuye a la consolidación definitiva de dicho talud, favoreciendo a veces la colonización vegetal.

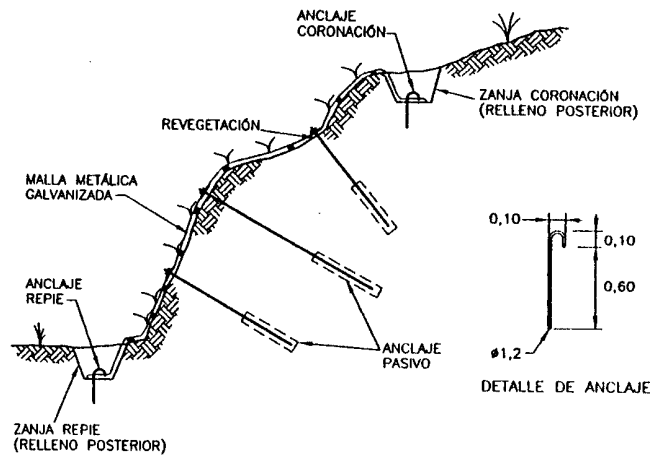


Figura 33. Mallas y redes metálicas.

► **Tratamientos del terreno.-** En muchas ocasiones, para estabilizar taludes, los métodos anteriormente expuestos no son lo suficientemente efectivos en suelos cohesivos, que tienen permeabilidad baja o muy baja, en estas situaciones, se deben considerar los siguientes métodos de tratamiento del terreno.

⇒ Tratamientos químicos.- La utilización de elementos químicos para el tratamiento de laderas o taludes inestables es una posibilidad que presenta diversos atractivos. Los tratamientos químicos más utilizados en la estabilización de laderas han sido las inyecciones de cementos pórtland, cloruros cálcicos, inyecciones de cal y las cenizas. Sin embargo, el gran problema a la hora de utilizar cualquiera de estos elementos químicos ha sido el conseguir un método adecuado para realizar las inyecciones en las zonas de inestabilidad.

⇒ Inyecciones de cal.- Las inyecciones de emulsiones de cal o de cal y cenizas volantes se emplean mucho en los Estados Unidos para el tratamiento de suelos arcillosos expansivos y limosos. Para lograr una emulsión acuosa espesa con cal y que sea fácilmente bombeable, se suele mezclar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2), con agua limpia, de forma que exista en dicha

emulsión una concentración máxima del 40 % en sólidos. Con el fin de inyectar la emulsión en el terreno se deben emplear equipos adecuados. La emulsión al ser inyectada en el suelo sigue las zonas de debilidad, planos de estratificación, fisuras naturales, etc.

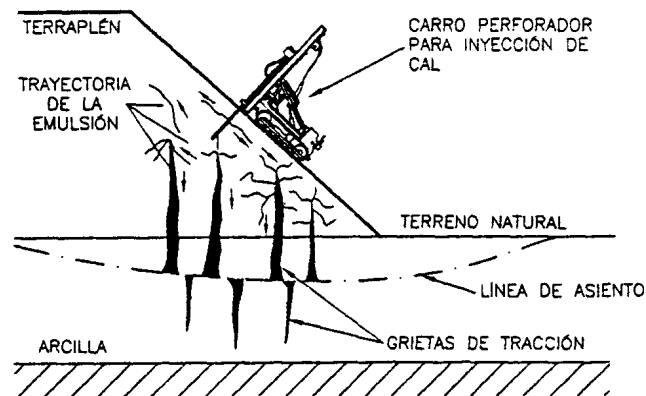


Figura 34. Inyecciones de cal

- ⇒ Columnas de cal.- Las columnas de cal fueron utilizadas por primera vez por los ingenieros Suecos. Las columnas de cal se construyen in situ mezclando cal viva con el terreno mediante el empleo de un tornillo sin fin (Auger). Este penetra en el subsuelo hasta una profundidad por debajo de la superficie deslizante y en el hueco generado es donde se inyecta la lechada de cal.
- ⇒ Tratamientos térmicos.- Los tratamientos de alta temperatura secan los materiales arcillosos, provocando el pegado de las partículas y como consecuencia se incrementa la estabilidad del terreno.

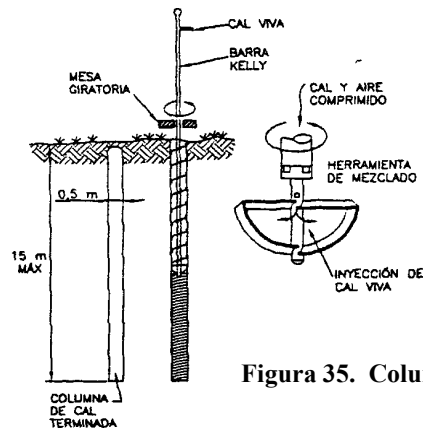


Figura 35. Columnas de cal

⇒ Pilotes de cal.- Este sistema ha sido empleado en diversos países desde los años 60 con el fin de mejorar la estabilidad de suelos saturados. Los pilotes se forman perforando unos barrenos en los que se inyectará y compactará la cal.

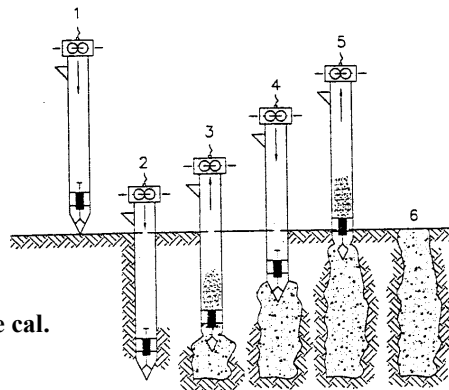


Figura 36. Pilotes de cal.

⇒ Tratamientos eléctricos.- Otra técnica que incrementa la resistencia de los suelos es la denominada como electroósmosis. Las publicaciones clásicas sobre esta técnica fueron desarrolladas por Casagrande (1948, 1952, 1953), pero existen numerosos casos históricos recogidos en la literatura por Holtz (1989) en los que se ha utilizado la técnica de la electroósmosis para estabilizar los cimientos de diques; sin embargo, la aplicación clásica de la electroósmosis ha sido la estabilización de laderas inestables.

1.1. GENERALIDADES

Los deslizamientos, son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

El presente proyecto de tesis de grado intenta presentar una alternativa en el análisis de los fenómenos que ocasionan los deslizamientos.

Cuando el ingeniero va a construir vías terrestres se ve enfrentado a problemas de inestabilidad tanto en corte como en terraplenes. Ambos casos son esencialmente diferentes.

No es muy frecuente la falla de terraplenes, esto debido, posiblemente a que estas estructuras se construyen con materiales seleccionados en principio, la construcción se realiza bajo una norma las cuales han tenido un avance significativo en los últimos años y por lo tanto estas estructuras se considera homogéneas y presentan un comportamiento predecible.

En cambio los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes "In Situ" con toda le heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto la influencia del constructor es limitada.

De tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

En general la construcción de los terraplenes es una tarea rutinaria y no ofrece dificultad, sin embargo existen algunos casos que hacen muy crítica su construcción tales como:

1. Terraplenes en suelo blando.
2. Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.
3. Terraplenes en laderas inclinadas.
4. Accesos a puentes y pasos a desnivel.
5. Terraplenes sobre suelos licuables.
6. Terraplenes con riego de tubificación.

Los cortes en cambio por su heterogeneidad, presentan frecuentes problemas de estabilidad que con ciertos cuidados pueden ser superados, sin embargo algunos casos que exigen tratamientos especiales en su construcción, tales como:

1. Cortes de gran altura.
2. Cortes de laderas inestables.
3. Cortes sujetos a flujos de agua.
4. Cortes en suelos erosionables.

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de predicción de la estabilidad, con el objeto de tomar medidas preventivas y/o correctivas.

Para hacer el análisis de estabilidad de un talud es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej. Causas del movimiento, velocidad del movimiento.
2. Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Seleccionar el método para cálculo de la estabilidad del talud.
4. Correlacionar las observaciones del campo con los resultados del cálculo.

1.2. DEFINICIÓN DE TALUD

Es toda aquella superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente las masas de suelo de rocas, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución.

Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

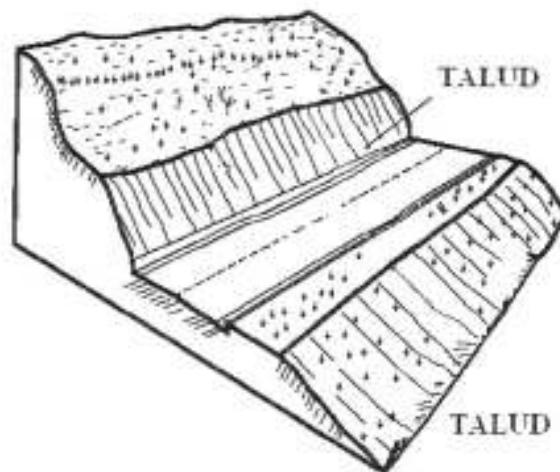


Figura 1. Talud en corte de una carretera.

1.3. NOMENCLATURA DE UN TALUD

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 2).

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

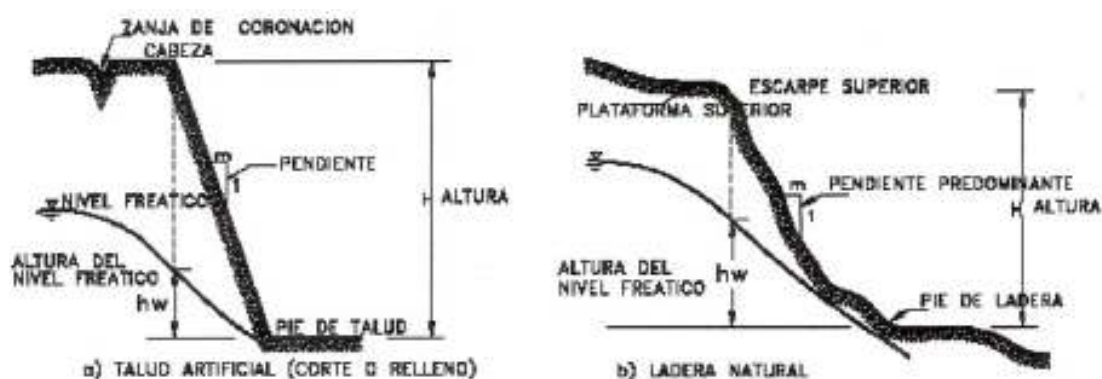


Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas.

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

1. **Altura.-** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie.-**Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe.-** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático.-** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente.-**Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación mil, en la cual “m” es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo:

Pendiente: 450, 100%, o IR: **IV**. Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

6. **Base firme.**- La base firme es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento

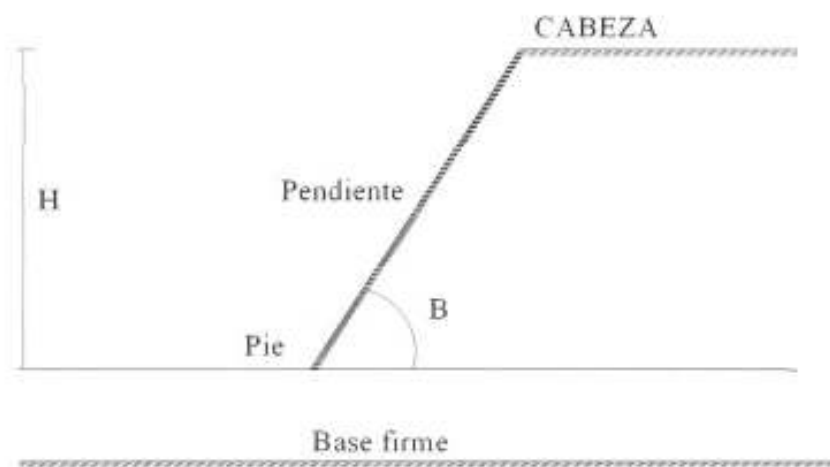


Figura 3. Esquema de partes de un talud.

La inclinación (B) de un talud depende de:

1. Altura del talud.
2. Condiciones topográficas.
3. Estructuras geológicas.
4. Tipo de suelo o roca.
5. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

La principal función de los taludes es la de garantizar en condiciones óptimas la transitabilidad de las carreteras, para la libre circulación vehicular, lo que implica que, en el talud no deben existir desprendimientos aislados o en bloque.

1.4. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LOS TALUDES

Los factores a tomar en cuenta para el diseño de los taludes en general son:

- Altura “H” desde el pie hasta la cresta talud.
- Ángulo que forma la cara del talud con la horizontal.
- Ángulo de fricción interno.
- Cohesión.
- Densidad del suelo del talud.
- Nivel freático.
- Cargas externas.
- Lluvias máximas.

1.5. TIPOS DE TALUDES

Los taludes se dividen en:

a. Taludes naturales o laderas son los conformados por las laderas que se han formado sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

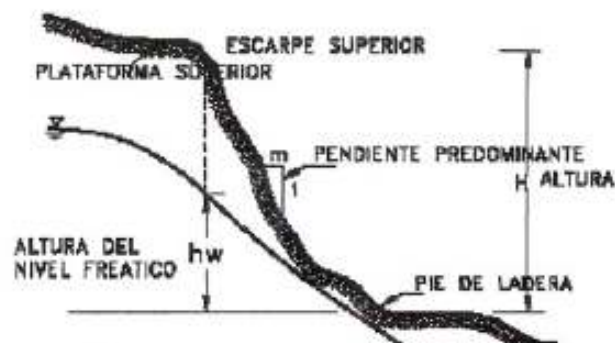


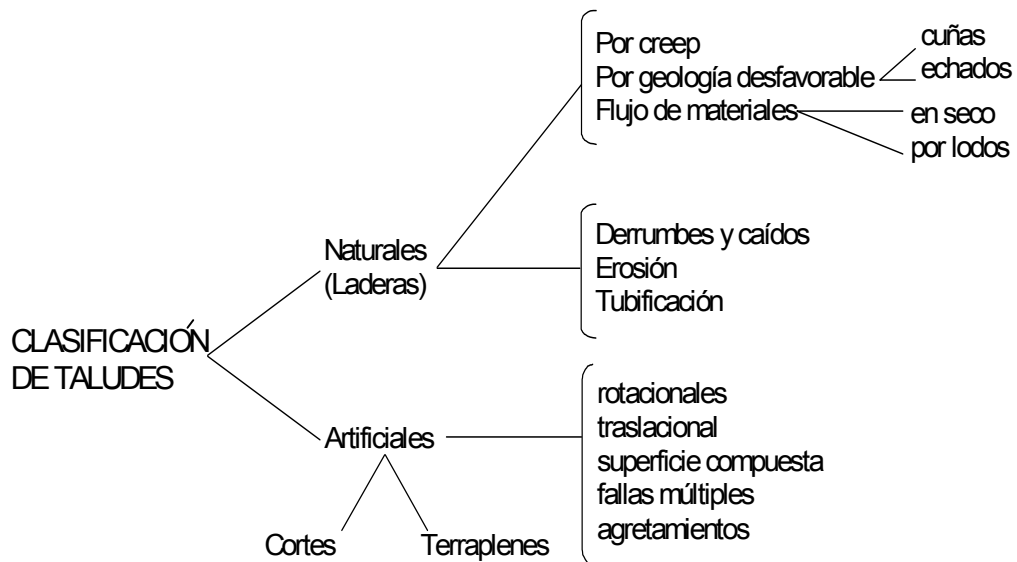
Figura 4. Talud natural.

b. **Taludes artificiales**, son estructuras diseñadas y construidas por el hombre y lo conforman los cortes y los terraplenes.



Figura 5. Talud artificial.

Por lo que podemos realizar la siguiente caracterización de cada uno de ellos, de acuerdo a lo siguiente:



Cuadro 1. Clasificación de taludes.

1.6. INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE CARRETERAS

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos.

Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

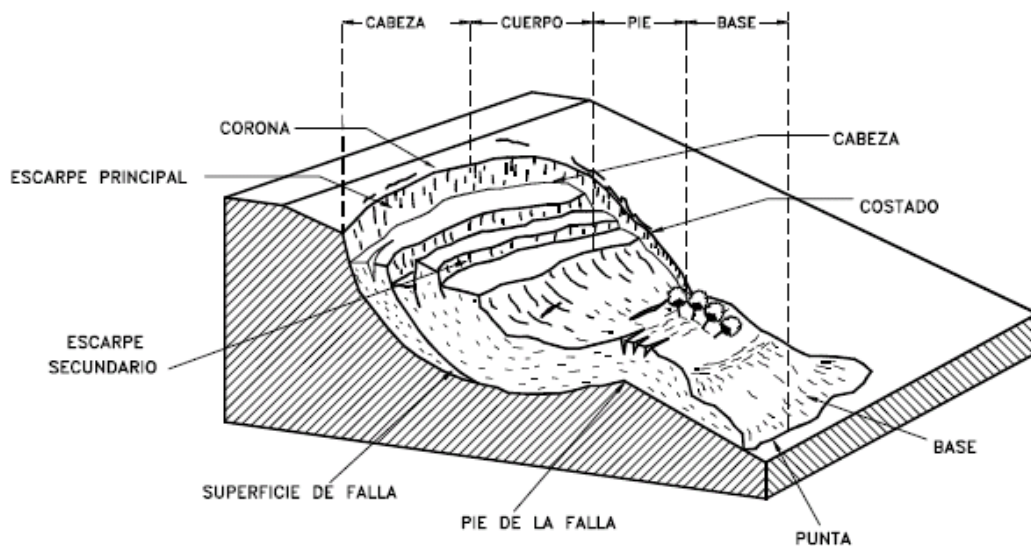


Figura 6. Deslizamiento o movimiento en masa típico.

En la Figura 6 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

1. **Escarpe principal.**- Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
2. **Escarpe secundario.**- Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

- 3. Cabeza.-** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 4. Cima.-** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 5. Corona.-** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- 6. Superficie de falla.-** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- 7. Pie de la superficie de falla.-** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- 8. Base.-** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- 9. Punta o uña.-** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- 10. Costado o flanco.-** Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- 11. Superficie original del terreno.-** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- 12. Derecha e izquierda.-** Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

1.6.1. Dimensiones

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 7):

- 1. Ancho de la masa desplazada W_d .-** Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

- 2. Ancho de la superficie de falla W_r .**- Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- 3. Longitud de la masa deslizada L_d .**- Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- 4. Longitud de la superficie de falla L_r .**- Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- 5. Profundidad de la masa desplazada D_d .**- Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- 6. Profundidad de la superficie de falla D_r .**- Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- 7. Longitud total L .**- Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- 8. Longitud de la línea central L_{cl} .**- Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se dilata. El término “Factor de expansión” puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento.

En algunas ocasiones como en el caso de roca el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

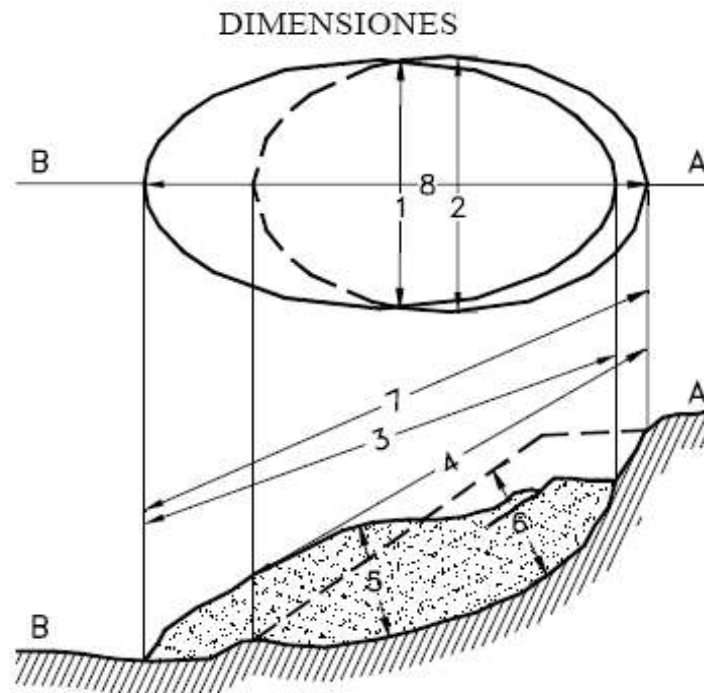


Figura 7. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG

1.7. FACTORES DE INESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE CARRETERAS

Algunos de los factores de inestabilidad de los taludes de carreteras son:

A. Geología de la región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen uno de los mecanismos de modificación (Schuster and Krizek 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial del deslizamiento de taludes.

El relieve y la topografía están determinados por la geología del área, lo que permite estimar la susceptibilidad al movimiento en el nivel regional.

En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas, sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves. A continuación se incluye una breve descripción de las características de estos relieves.

a. Taludes escarpados: En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de derrumbe en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca, por ello, una fuerte lluvia o un corte al pie del talud pueden activar el deslizamiento de la masa suprayacente.

b. Áreas de concentración de drenaje y filtración: Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Es probable que ocurran filtraciones con el subsecuente deslizamiento en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada. Es importante reconocer el peligro potencial de las áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas.

c. Áreas de concentración de fracturas: El movimiento de taludes puede estar estructuralmente condicionado por superficies débiles tales como fallas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales que pueden actuar independientemente una de la otra.

Por ello, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo sino como una serie de bloques individuales; estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación, lo cual debilita los bloques y reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, se debe buscar cuidadosamente las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando éstas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques que lo hacen más inestable.

B. Topografía y estabilidad

Los mapas topográficos representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos y, algunas veces, se puede identificar en ellos grandes áreas de deslizamiento. En los mapas topográficos, la escala y el intervalo de las curvas de nivel facilitan la identificación de los deslizamientos. Esta identificación se puede llevar a cabo mediante:

a. Características topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja.

b. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.

c. Movimientos menores o irregularidades en zonas de pendientes empinadas, acantilados, bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

La identificación de deslizamientos en mapas topográficos se verá ayudada por la escala y el intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

C. Efecto de la resistencia del suelo y la pendiente del talud

El suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera se llama también condición drenada o a largo plazo y la segunda, condición no drenada o a corto plazo.

D. Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de los taludes ya que influye en la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, generalmente no saturados, el efecto acumulativo puede llegar a saturar el terreno y activar un deslizamiento.

Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a) **El ciclo climático** en un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual versus baja precipitación anual
- b) **La acumulación de pluviosidad** en un año determinado en relación con la acumulación normal.
- c) **Intensidad** de una tormenta específica.

Guidicini e Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación con la pluviosidad y establecieron el coeficiente del ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente del ciclo fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil, la cual presenta un clima tropical caracterizado por una estación seca de junio hasta agosto y una estación húmeda desde enero hasta marzo.

Los resultados del estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno que eleva el nivel freático, por lo tanto, una tormenta durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda tendría un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad al final de la estación húmeda.

E. Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento. La erosión por agentes humanos incluye cualquier actividad que permite un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección, como la tala de árboles u otro tipo de vegetación que ayuda a fijar el suelo y mejorar la estabilidad del talud. La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, incrementa la incidencia de taludes inestables y puede resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión que en los lagos o embalses incrementan la turbidez de las aguas y crean un peligro para la vida acuática, contaminan el agua potable y reducen la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y cascajo. En taludes, la protección consiste en:

- a) **Sembrar vegetación** de rápido crecimiento además de instalar un sistema de control del drenaje superficial.
- b) **Instalar fajinas** en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas.
- c) **Sellar las grietas superficiales** con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración, lo cual reduce la erosión.

F. Licuefacción debido a acciones sísmicas

La mayoría de las fallas de los taludes durante sismos se debe al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos, sin embargo, también se han observado fallas en suelos cohesivos durante algunos eventos sísmicos de gran magnitud.

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas, la cual puede ser activada por la repetida aplicación de pequeños incrementos o decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La pérdida de resistencia es de tal magnitud que momentáneamente el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado y se originan grandes deformaciones.

Los fenómenos de licuefacción se han observado generalmente en depósitos aluviales recientes compuestos por granulares, como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos.

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son:

1. **La granulometría** (tamaño, gradación y forma de granos).
2. **La densidad relativa** del depósito.

Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas que contienen menos de 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tienen la tendencia a depositarse de manera suelta y presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno.

1.7.1. SUPERFICIES PREFERENCIALES DE FALLA

Llamamos falla a la ruptura de un estrato rocoso debido a un esfuerzo en la que se puede observar un desplazamiento. Si no hay desplazamiento decimos que hay una diaclasa, y si no atraviesa la roca decimos que es una fisura. Si el desplazamiento no consigue romper los estratos pero hay una acentuación significativa y brusca del buzamiento de los estratos, estirados y adelgazados, se llama flexión.

Las superficies de falla de un talud son aquellas zonas dentro del talud que delimita la superficie probable de rotura o deslizamiento, la cual se encuentra relacionada con las condiciones geotécnicas del talud, de allí la importancia del conocimiento del tipo de material, formación y estructura geológica y propiedades mecánicas del talud, entre otros, así como, los factores externos topográficos, sísmicos y climatológicos, complementados con las condiciones de aguas superficiales y subterráneas, que permitirán analizar el comportamiento de un talud (factores de seguridad) y definir las obras necesarias para su estabilización.

El movimiento se hace según una superficie de falla que no es siempre un plano de falla. La superficie es, algunas veces vertical y generalmente inclinada presentando una cierta pendiente. En este último caso, el labio superior, reposando sobre el plano de falla, es el techo el labio inferior es el muro.

La intersección de la superficie de falla con el terreno (o, si el relieve es fuerte, por un plano horizontal) es la traza, la línea de falla. La falla puede ser, con relación a la dirección (de las capas) longitudinales, direccionales, transversal, u oblicua.

1.7.1.1. Discontinuidades Heredadas

Las juntas, fracturas, foliaciones, planos de estratificación, laminaciones, diques, orientaciones de los minerales y demás discontinuidades de la roca original; se convierten en discontinuidades dentro de la masa de suelo residual que actúan generalmente como superficies de debilidad por su baja resistencia, relacionadas no sólo por la fractura en sí, sino también con la meteorización preferencial a lo largo de éstas, ya que actúan como conductos del agua y demás agentes meteorizantes, que facilitan no sólo el transporte y depósito de subproductos sino la formación de redes de presión de agua y de disipación de succión a lo largo de los planos de discontinuidad. Las juntas heredadas controlan, en la mayoría de los casos, el régimen del agua infiltrada después de una lluvia.

En la mayoría de los deslizamientos que ocurren en suelos residuales la superficie de falla coincide en áreas importantes con grupos de discontinuidades heredadas, las que algunas veces están rellenas de materiales débiles comúnmente arcillas que absorben agua, se expanden y se ablandan muy fácilmente; y es común que su existencia y significancia sólo se identifica después de que ha ocurrido una falla.

Observaciones del flujo de agua subterránea indican que el agua fluye a lo largo de rutas tales como las discontinuidades heredadas y conductos internos de erosión.

Las discontinuidades debidas a procesos de metamorfismo de las rocas , conocidos como pizarrosidad, esquistocidad, foliación etc. forman superficies generalmente paralelas de baja cohesión a través de las cuales los materiales se pueden partir fácilmente o producirse fenómenos de desmoronamiento y flujos secos de material desintegrado.

Muchos tipos de relleno diferente se pueden encontrar a lo largo de las discontinuidades pero generalmente se trata de materiales arcillosos y su espesor

puede variar desde capas microscópicas hasta centímetros. Este relleno puede provenir de materiales lavados de capas superiores o de meteorización en el sitio.

La detección y evaluación de los efectos de las estructuras heredadas es de primordial importancia en los estudios geotécnicos para casos de estabilidad de taludes, pero esta es muy difícil con el sistema de perforaciones con taladro. Irfan y Woods(1988) recomiendan hacer excavaciones de gran tamaño y reportan zanjas de hasta 20 metros de profundidad para establecer el "pattern" de discontinuidades heredadas; y estas excavaciones pueden programarse como parte de los cortes definitivos. Adicionalmente se recomienda el mapeo de las discontinuidades a medida que se avanza con los cortes para detectar la necesidad de modificar el diseño.

1.7.1.2. Espejos de Falla

Los espejos de falla son discontinuidades lisas, que pueden ser el producto de movimientos tectónicos en la roca original, los cuales se preservan en el suelo residual; o pueden ser causados también por movimientos diferenciales ocurridos dentro de suelos areno-limosos por acción del proceso de meteorización. Es difícil diferenciar entre superficies antiguas o recientes y en ocasiones se puede observar más de una dirección de estriado en la misma discontinuidad (Irfan y Woods- 1988).

La resistencia al corte a lo largo de los espejos de falla es particularmente baja y muchos deslizamientos son controlados por estas superficies de falla.

1.7.1.3. Zonas de Cambio de Permeabilidad

Para empezar diremos que la permeabilidad es el actor que mide la resistencia de los materiales al libre flujo del agua, y puede definir el régimen de aguas subterráneas, concentración de corrientes, etc.

Como su nombre lo indica son zonas en las que la permeabilidad cambia, la presión de poros elevada provoca deslizamientos y el flujo de agua, a través del suelo, puede originar tubificación y arrastre de partículas sólidas, es por este motivo que el cambio de permeabilidad en un talud es tan importante.

1.7.2. IMPORTANCIA DE LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

A. Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

Coeficiente de rozamiento = $\tan \Theta$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son:

- a) Tamaño de los granos.
- b) Forma de los granos.
- c) Distribución de los tamaños de granos.
- d) Densidad.

B. Cohesión

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.

La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y se los denomina Suelos no Cohesivos.

C. Cohesión aparente

En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares, a este fenómeno se lo conoce como cohesión aparente. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.

1.7.2.1. Suelos Cohesivos y No Cohesivos

Los suelos cohesivos poseen la propiedad de la atracción intermolecular, como ejemplo las arcillas.

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación, como la arena y la grava.

1.7.2.2. Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que es su conformación presentan gran cantidad de arcilla, éstos presentan características de cimentación, que depende de la cantidad de arcilla que presente el suelo en cuestión, los suelos arcillosos son muy buenos para la agricultura por la propiedad de almacenar agua, pero son muy malos para las obras civiles.

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico.

El tipo sílice se encuentra formado por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno. La unión entre partículas se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

El tipo alumínico está formado por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno.

1.8. MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. En los últimos años se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, pero se requiere todavía de un gran esfuerzo de investigación en este tema.

1.8.1. CONDICIONES DRENADAS Y NO DRENADAS

Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior, en suelos de baja permeabilidad, éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso se dice que las condiciones son no drenadas.

Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poro en exceso y se comportan en condiciones drenadas.

Para taras normales de carga, que equivalen a meses o semanas, suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg., se pueden considerar drenadas y suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg., se consideran no drenadas.

Mientras las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas.

Duncan (1996) recomienda que para los taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros debida a las lluvias, el problema debe analizarse como condición drenada.

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

Donde:

$$T = \text{Factor adimensional.} \quad T = \frac{C_v t}{D^2}$$

C_v = Coeficiente de consolidación

t = Tiempo de drenaje

D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T es mayor de 3 la condición es drenada.

Si T es menor de 0.01 la condición es no drenada.

Si T está entre 0.01 y 3.0 ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas.

En este caso deben analizarse ambas condiciones.

El caso drenado y el caso no drenado.

1.8.2. ANÁLISIS CON ESFUERZOS TOTALES O EFECTIVOS

Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada. Pero en la práctica sin embargo es virtualmente imposible determinar con precisión cuales son los excesos de presión de poro que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). Debido a esta razón no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, se puede trabajar todo el análisis utilizando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poro en las condiciones no drenadas.

1.8.3. RESISTENCIA AL CORTANTE

La resistencia al cortante para utilizar en los análisis puede ser medida de dos formas:

- a) En el laboratorio o en ensayos de campo, en tal forma que las cargas aplicadas, sean lo suficientemente lentas para que se produzca drenaje.
- b) En el laboratorio utilizando ensayos consolidados no drenados.

Las envolventes de falla determinadas usando estos dos métodos se han encontrado que son las mismas para todos los fines prácticos (Bishop y Bjerrum, 1960).

Estudios realizados por Skempton revelan que las resistencias drenadas pico de arcillas sobre consolidadas duras, son mayores en el laboratorio que las resistencias drenadas que pueden ser movilizadas en el campo en un período de tiempo.

Skempton recomienda realizar los ensayos remoldeando la arcilla en el laboratorio a un contenido de agua cercano al límite líquido, reconsolidándolo en el laboratorio y midiendo la resistencia en una condición normalmente consolidada. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda utilizar las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977, 1985).

Para suelos parcialmente saturados tales como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas deben obtenerse utilizando ensayos no consolidados no drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en el campo. La envolvente de falla para esos suelos generalmente, es curva y por lo tanto es importante utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento en los ensayos de laboratorio que en el campo.

Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada de ensayos no consolidados no drenados.

1.8.4. PESOS UNITARIOS Y PRESIONES DE PORO

Los problemas de estabilidad de taludes pueden formularse correctamente en términos de esfuerzos totales, utilizando pesos unitarios totales y límites externos de presión de poros.

Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático, y saturados por debajo del nivel freático. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático.

Las condiciones de presión de poros son generalmente, obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos:

1. Superficie freática

Esta superficie o línea en dos direcciones se define como el nivel libre del agua subterránea.

En una superficie freática la presión de poros es calculada de acuerdo a las condiciones de estado de régimen permanente (Steady-state), de acuerdo al diagrama que se muestra en la figura. Este concepto se basa en la suposición de que todas las líneas equipotenciales sean ortogonales. Entonces, si la inclinación del segmento de superficie freática es θ y la distancia vertical entre el punto y la superficie freática es hw , entonces la presión de poros está dada por la expresión $u = \gamma_w (hw \cos^2 \theta)$.

En el caso de líneas freáticas de gran pendiente, el cálculo anterior puede resultar sobre estimado y se requiere tener en cuenta que las líneas equipotenciales tienden a ser curvas.

2. Datos piezométricos

Es la especificación de presiones de poros en puntos discretos dentro del talud y la utilización de un esquema de interpolación para estimar las presiones de poro requeridas a cualquier punto. Las presiones piezométricas pueden determinarse mediante piezómetros, redes de flujo o soluciones numéricas, utilizando diferencias finitas o elementos finitos.

Aunque este sistema está disponible solamente en muy pocos de los programas de computador existentes, se recomienda por su confiabilidad para representar las condiciones reales en el campo (Chugh, 1981).

3. Relación de presión de poros

Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo a la definición:

Donde:
$$r_u = \frac{u}{\delta_v}$$

u = Presión de poros

δ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

Este factor se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro a diferentes partes del talud. En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores de r_u .

4. Superficie piezométrica

Esta superficie se define para el análisis de una determinada superficie de falla. Debe tenerse claridad en que la superficie piezométrica no es la superficie freática y que el método de calcular la presión de poros es diferente para los dos casos.

En la superficie piezométrica, la presión de poros es la distancia vertical entre la superficie piezométrica indicada y el punto (figura 1.3).

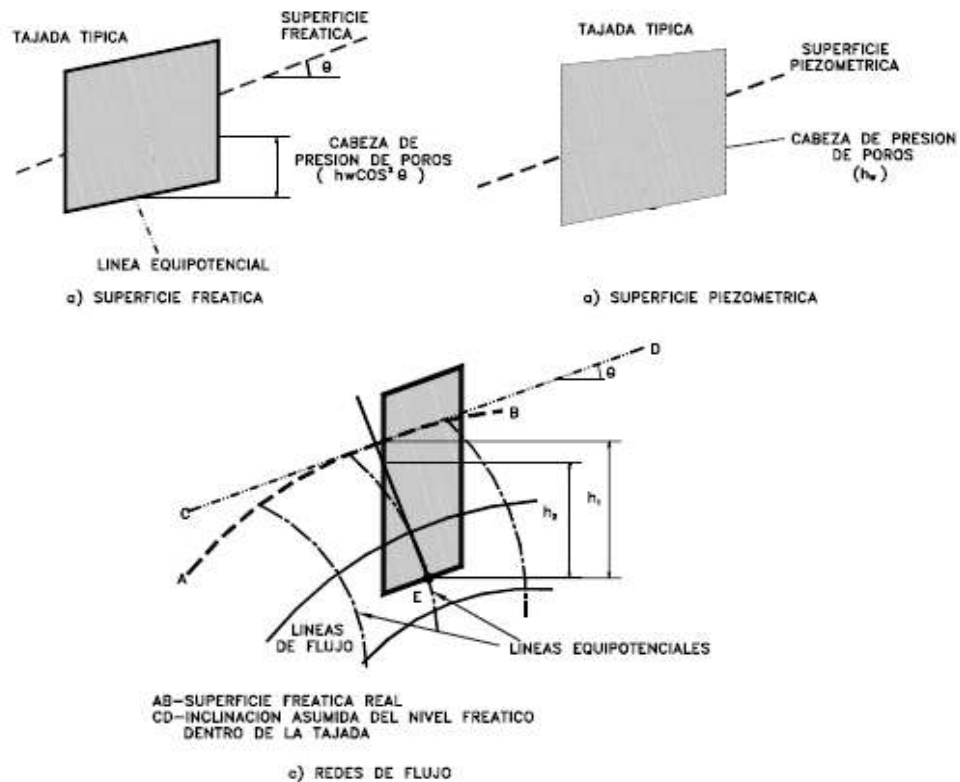


Figura 8. Presión de poros en las tajadas de análisis de estabilidad.

5. Presión de poros constante

Este procedimiento puede utilizarse si se desea especificar una presión de poros constante en una determinada capa de suelo. Este sistema puede utilizarse para analizar la estabilidad de rellenos colocados sobre suelos blandos, durante la construcción donde se generan presiones de poro, de acuerdo a la teoría de la Consolidación.

1.8.5. GRIETAS DE TENSIÓN EN LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar, la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente la grieta puede llenarse con agua, en el caso de lluvias.

La profundidad de las grietas de tensión puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión:

Donde:
$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Z_c = Profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

γ = Peso unitario del suelo

ϕ = Ángulo de fricción

Generalmente se recomienda la utilización de parámetros efectivos.

La presencia de grietas de tensión dificulta en forma considerable la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Las grietas de tensión son muy importantes y profundas en cortes de taludes, donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación.

1.9. EQUILIBRIO LÍMITE Y FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado . U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Morgenster n y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos Finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza Esfuerzos y Deformacio nes	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmi- ca	Espiral Logarítmi- ca	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Tabla. 1.

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

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia.al.Corte}}{\text{Esfuerzo.al.Corte}}$$

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

$$F.S. = \frac{\text{Momento.Resistente}}{\text{Momento.Actuante}}$$

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

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie (Tabla 2.1.).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

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

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias.al.Corte}}{\sum \text{Esfuerzos.al.Corte}}$$

1.9.1. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El análisis de la estabilidad de un talud es un proceso de tanteos, con suposiciones de las condiciones más críticas que en un momento dado in pueden presentar.

En términos generales los pasos a seguir son:

1. Se supone una superficie de falla, la cual puede ser
 - El pie del talud
 - La baso del talud
 - El talud

Después de haber hecho esto se habrá determinado:

- Una masa deslizante
- Una superficie de deslizamiento

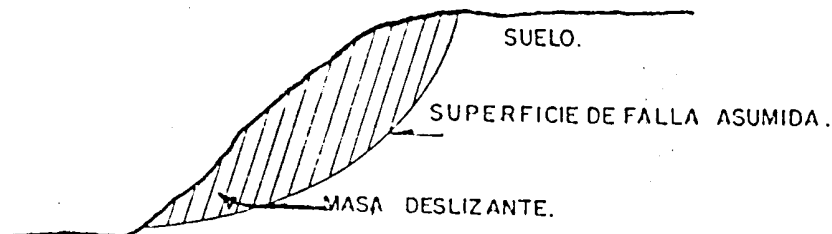


Figura 9. Determinación de la masa deslizante

Al haber definido la masa deslizante, se podrá calcular las fuerzas que producen el deslizamiento, llamadas también fuerzas motoras.

Al haber definido la superficie de falla se podrá calcular las fuerzas que se oponen al deslizamiento, llamadas también fuerzas resistentes.

2. Calcular los momentos:
 - Momentos resistentes
 - Momentos Motores o Deslizantes.
3. Calcular el factor de seguridad (F.S) para la superficie de falla dada
 - Si la falla es del tipo translacional, el F.S. resulta de comparar las fuerzas:

$$F. S. = \frac{\sum \text{Fzas Resistentes}}{\sum \text{Fzas Deslizantes}}$$
 - Si la falla es del tipo rotacional, el F.S. resulta de comparar los momentos.

$$F.S. = \frac{\sum \text{Mtos. Resistentes}}{\sum \text{Mtos. Deslizantes}}$$

El F.S. hallado es para la superficie de falla, asumida y no necesariamente es el F.S. del talud.

Al repetir los pasos anteriores para otras superficies de falla, se obtendrá un F.S. mínimo el cual corresponde al del talud.

Significado de los factores de seguridad (sowers y sowers).

F.S.	Significado
Menor que 1	Inseguro
1.0 - 1.2	Seguridad dudosa
1.2 - 1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudosa para presas
1.5	Seguro para presas

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

1.9.1.1. Método Sueco

Aplicable para suelos netamente cohesivos ($C \neq 0$, $\phi = 0$)

El F.S. calculado por éste método da valores entre 10 a 15% más bajos que otros métodos más exactos. Es empleado para casos de práctica común; debido a que es muy sencillo y en el caso de taludes en los cuales el riesgo no es grande.

Este método se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea independiente de los esfuerzos normales al plano de la falla ($T = C$), tales como las arcillas poco sobreconsolidadas y taludes después de construídos o en los casos de aplicación de nuevas cargas sobre él.

- Se elige una circunferencia que puede considerarse como posible círculo crítico.
- Se determinan las fuerzas actuantes y las resistentes.
- Se calculan los momentos.
- Por último se determina el factor de seguridad.

En la siguiente figura se indica los pasos a seguir:

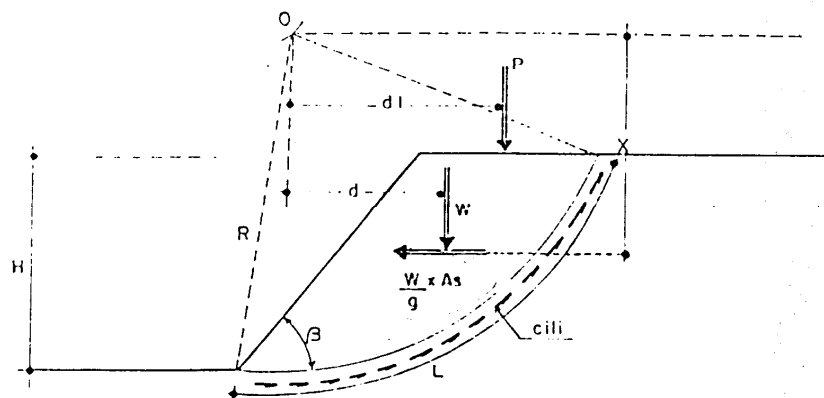


Figura 10. Fuerzas que actúan en el deslizamiento.

Cálculo de momentos actuantes o deslizantes:

$$M_m = W * d + p * d_1 + \frac{W}{g} * A_s + X$$

Cálculo de momentos resistentes:

$$M_r = R \quad C_i * L_i = R * C * L$$

Determinación del factor de seguridad (PS)

$$F.S. = M_r / M_m$$

1.9.1.2. Método Ordinario o de Fellenius

Es conveniente utilizar éste método cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es función de los esfuerzos normales o sea. : $T = C + \sigma \tan \phi$

Consiste en:

1. Darse una superficie de falla circular
2. Dividir la zona de falla en una serie de franjas verticales o dovelas de cualquier espesor.
3. Determinar las fuerzas que actúan en cada dovela.
4. Calcular los momentos resistentes y los momentos motores que actúan a lo largo de la superficie de falla.
5. Calcular el F.S.

Ejemplo: Para un suelo cuya resistencia está dada por la siguiente expresión: $T = C + \sigma \tan \phi$ (o sea con esfuerzos totales) sin N.F.

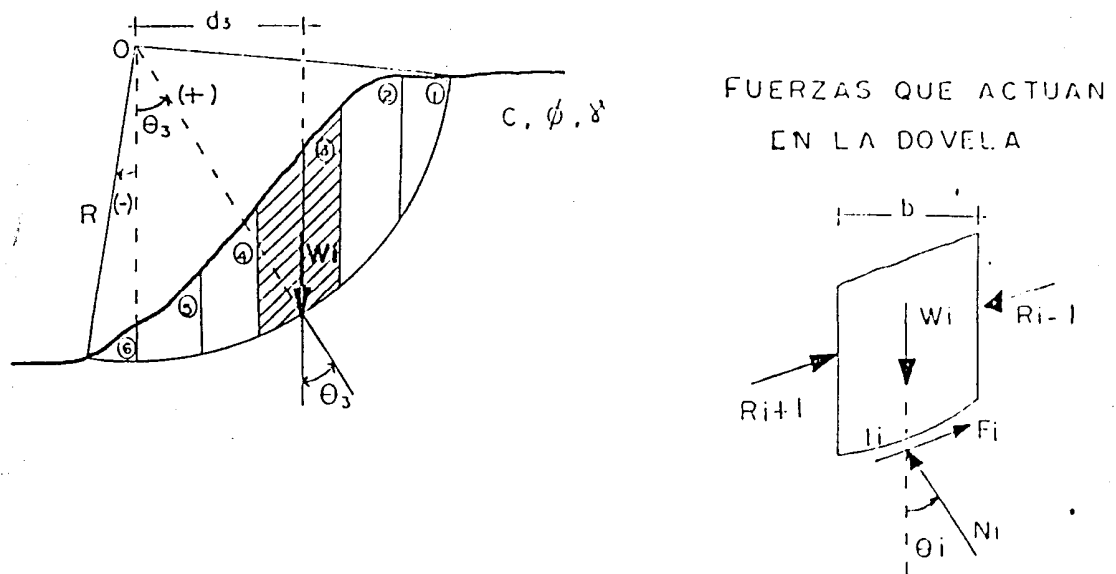


Figura 11. Diagrama utilizado por Fellenius.

- Donde:
- b = ancho de dovela
 - l_i = arco de la dovela
 - θ_i = ángulo que forma la vertical que pasa por el centro de gravedad de cada dovela y la normal a la base de la dovela, puede ser (+) o (-).
 - W_i = peso de cada dovela
 - R_{i-1} y R_{i+1} = Fuerzas laterales de las dovelas
 - F_i = Fuerzas tangenciales en la base de la dovela.
 - N_i = Fuerzas normales en la base de la dovela.

Este método asume que:

Las fuerzas R_{i-1} y R_{i+1} se convierten en reacciones interiores cuando se pasa de una dovela a otra y por lo tanto la suma de momentos de estas fuerzas es nulo.

Pues al sumar los momentos producidos por estas fuerzas, lo único que queda son las reacciones para los puntos extremos (primar y última dovela) donde la altura de cada dovela es nula, con lo que resulta valores nulos.

Fuerzas que se deben considerar según Fellenius.

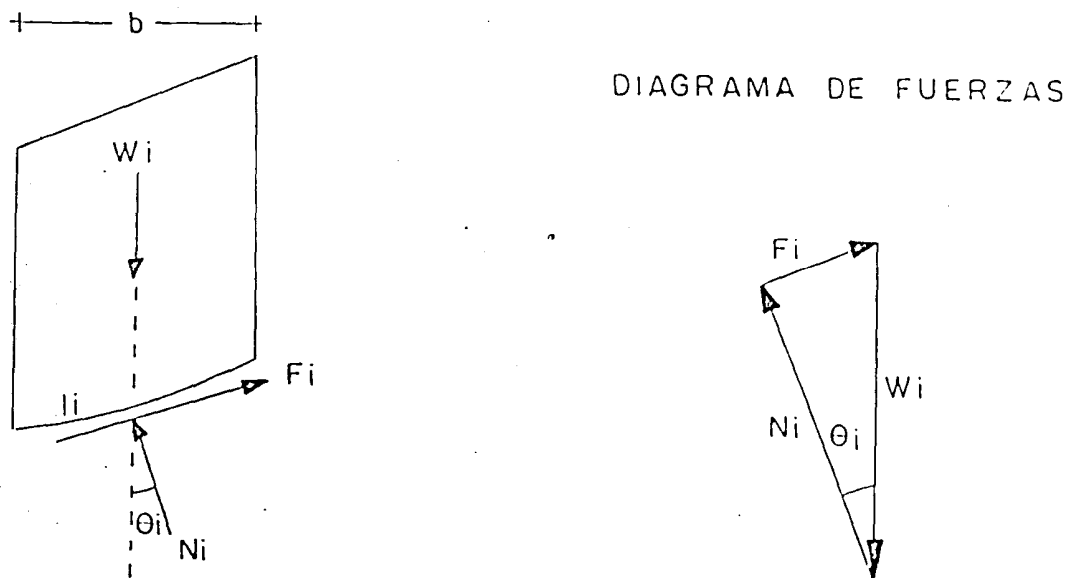


Figura 12. Fuerzas consideradas por Fellenius.

W_i - Conocida en magnitud y dirección

N_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

F_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

Cálculo de Momentos:

$$M_R = \sum R.FI = R \sum (C_i \cdot l_i + N_i \cdot \tan \phi)$$

$$N_i = W_i \cdot \cos \theta_i$$

$$M_R = R \sum (C_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)$$

$$M_m = \sum d_i \cdot W_i = R \sum W_i \cdot \sin \theta_i$$

$$F.S. = \frac{M_R}{M_m} = \frac{\sum (C_i \cdot l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i}$$

Observaciones a esta ecuación:

1) Para facilitar los cálculos y poderlos tabular se sustituye:

$$l_i = b / \cos \theta$$

2) El momento resistente depende de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y se desarrolla en la base de las dovelas y tiene siempre dirección contraria al movimiento, la suma que se hace es aritmética.

3) En cuanto al momento motor, existen dovelas que dan momentos estabilizantes y desestabilizantes, por lo tanto la suma es algebraica.

4) Se aconseja tomar de 8 a 12 dovelas como máximo, para obtener un resultado satisfactorio.

5) El F.S. calculado es para el círculo asumido y no es el del talud.

Casos que se pueden contemplar con este método:

a) Cuando hay varios estratos con diferentes resistencias al esfuerzo cortante.

- Se puede aplicar la misma expresión, pero teniendo en cuenta que:

C_i = Es la cohesión en la base de cada dovela.

ϕ_i = Es el ángulo de fricción interna en la base de cada dovela

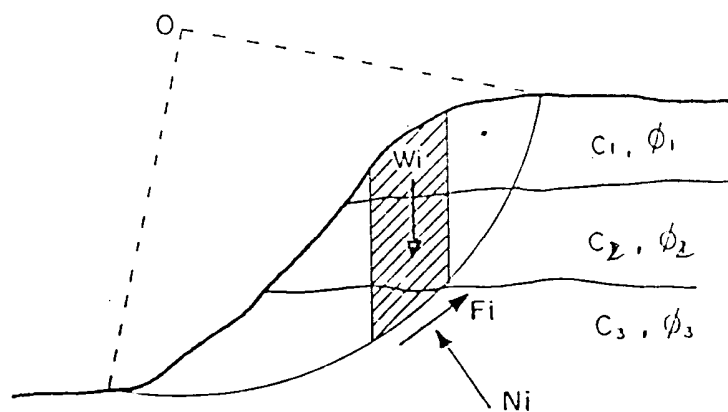


Figura 13. Talud con diferentes estratos

b) Si hay sobrecarga su efecto se debe incluir sobre las dovelas en las cuales actúa y puede haber sobrecargas estabilizantes y desestabilizantes.

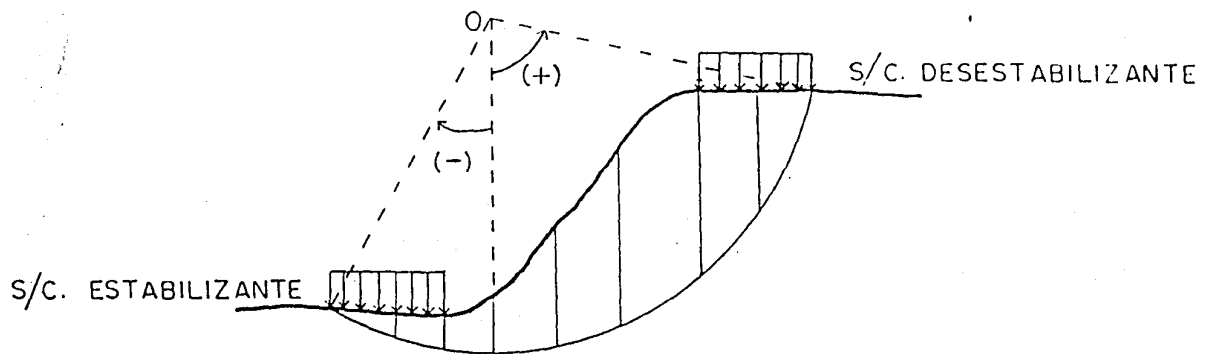


Figura 14. Talud con cargas externas.

c) Si el talud está parcialmente sumergido y experimenta flujo interno de agua, se puede aplicar este método.

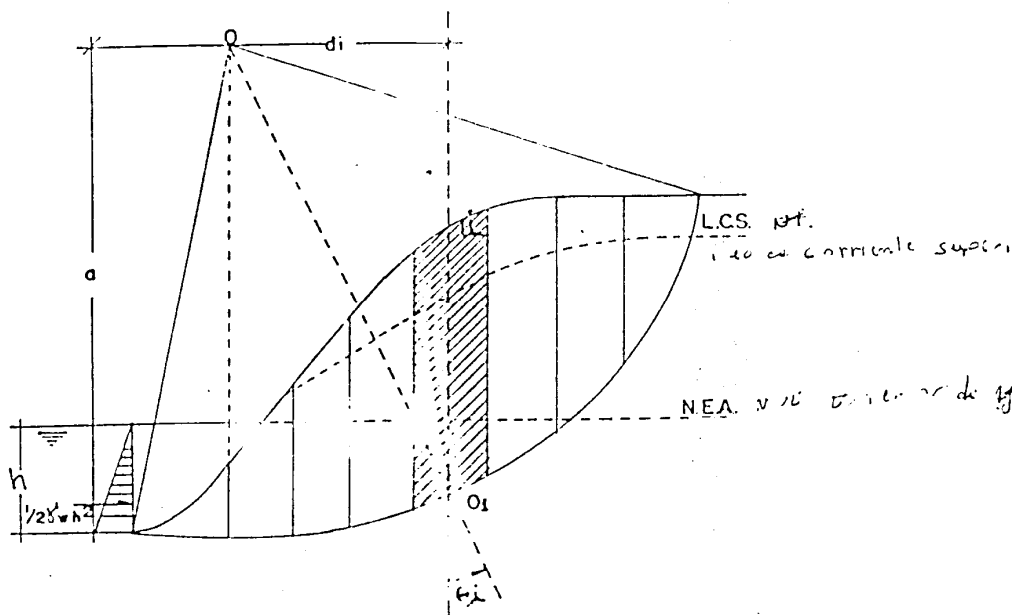


Figura 15. Talud parcialmente sumergido.

Nuevamente haciendo un análisis de las fuerzas que actúan en una dovela típica y con base en la suposición de Fellenius el cual asume que las fuerzas en las caras laterales son nulas, se tienen las siguientes fuerzas que deben considerarse según Fellenius

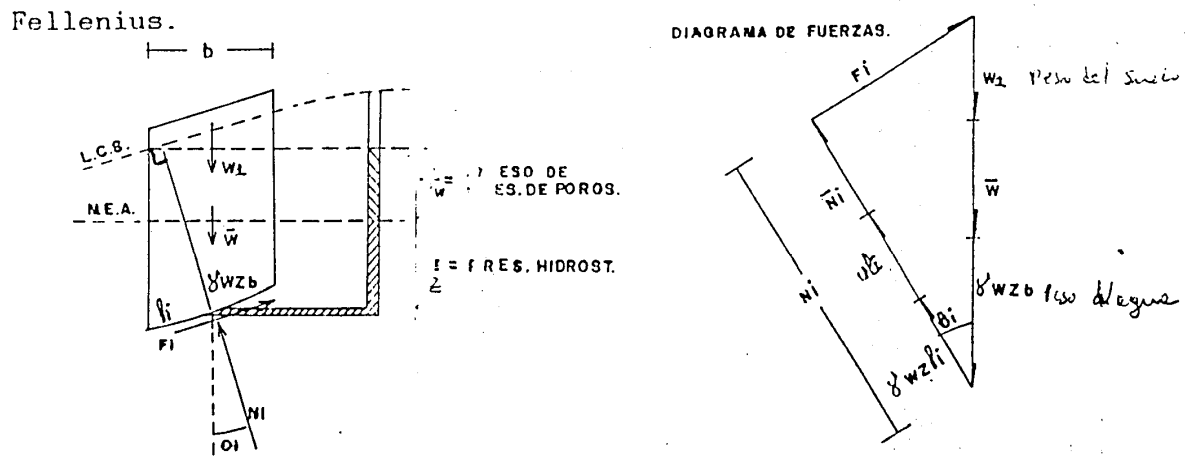


Figura 16. Fuerzas actuantes en talud parcialmente sumergido.

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A., se calcula con γ

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A., se calcula con

$$\gamma = \gamma - \gamma_w$$

$\gamma_w Z_b$ = Peso del agua de la parte de la dovela que está por debajo del N.E.A.

u = Exceso de presión de poros. Se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Cálculo del momento resistente

Este momento depende de la resistencia que se desarrolla en la base de la dovela. Puede ser en esfuerzos efectivos.

$$F_i = C_i l_i + \bar{N}_i \tan \phi$$

Según el polígono de fuerzas

$$\bar{N}_i = (W_i + \bar{W} \cos \theta_i - \mu l_i)$$

El momento resistente

$$M_R = R \sum (c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi)$$

Cálculo del momento motor

$$M_m = R \sum (W_1 + W) \text{Sen} \theta_i$$

$$F.S. = \frac{\sum c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi}{\sum (W_1 + \bar{W}) \text{Sen} \theta_i}$$

1.9.1.3. Método de Bishop

Para superficie de falla circular, se siguen los mismos pasos del método de Fellenius.

Este método supone que las fuerzas que actúan en las caras laterales de una dovela, tienen una resultante nula en la dirección vertical o sea que

$\sum (V_n - V_{n-1}) = 0$, con lo cual elimina correctamente las fuerzas E_i , en general mucho más importante que las fuerzas V_i .

Fuerzas que actúan en
en una dovela.

Fuerzas que actúan en una dovela
según Bishop modificado.

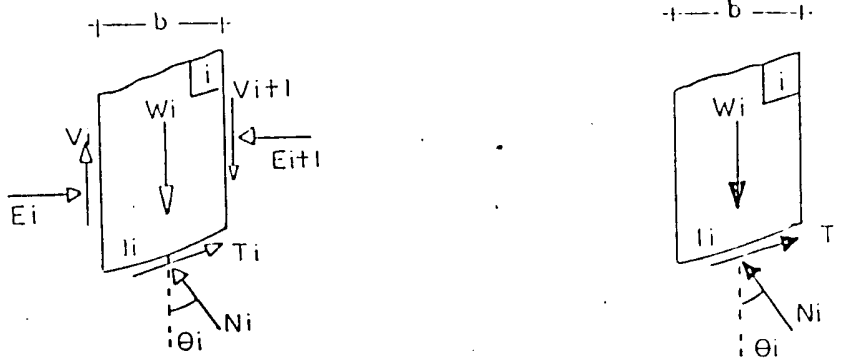


Figura 17. Fuerzas actuantes según Bishop.

Donde:

W_i = Peso de la dovela

N_i = Fuerza normal a la base de la dovela

T_i = Fuerza resistente que está actuando en el momento del análisis.

$$T_i = \frac{T}{F.S.} T$$

Para el equilibrio de la masa se debe cumplir que:

$$\Sigma F_V = 0$$

$$\Sigma M_o = 0$$

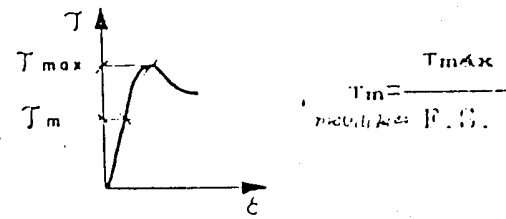


Figura 18. Gráfica de esfuerzos.

Después de hacer el equilibrio de fuerzas y de momentos se llega a la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Wit \tan \theta) / (\cos \theta i + \operatorname{sen} \theta i * \frac{\tan \theta}{F.S.})}{\sum(Wi \operatorname{sen} \theta i)}$$

Pero: $M \theta i = \cos \theta i + \operatorname{sen} \theta i \frac{\tan \theta}{F.S.}$

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Wit \tan \theta) / M \theta i}{\sum(Wi \operatorname{sen} \theta i)}$$

Donde:

C_i = Cohesión en la base de la dovela

b = Ancho de la dovela

W_i = Peso de la dovela

θ_i = Ángulo que forma la vertical y la normal en el centro de gravedad de la base de la dovela y puede ser (+) o (-)

$M\theta_i$ = Se calcula con una fórmula que se basa en θ_i y $\tan\phi/F.S.$

Nota: Esta ecuación da un F.S. para un cálculo tentativo, debe resolverse por un proceso interactivo, debido a que el F.S. está en ambos lados de la ecuación, pero su convergencia es rápida.

Cuando el talud está parcialmente sumergido y hay flujo de agua.

$$F.S. = \frac{\sum [c \cdot l + (W_1 + \bar{W} - ulb) \tan\phi] / M\theta_i}{\sum (W_1 + \bar{W}) \sin\theta_i}$$

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A. se calcula con γ .

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A. se calcula con $\gamma = \gamma - \gamma_w$

M = Exceso de presión de poros, se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Nota: Para medir el exceso de presión de poros, si no se ha trazado la Red de Flujo es buena aproximación medir μ en la vertical de cada dovela.

1.9.1.4. Comparación de los Diferentes Métodos

Es demasiada la cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, se considera el método de Morgenstern-Price el más exacto y complejo, considerándolo como referencia algunos autores concluyen que el método de Bishop presenta errores máximos del 7 %, siendo lo más normal del 2 %, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%, Esta aseveración fue documentada por Freddlund y Krahn (1977), otros autores concluyen que el método de Fellenius puede originar graves errores, hasta de un 40 %. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de F.S.

Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos y más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú.

En la práctica, el método de Morgenstern-Price resulta mucho más laborioso en su aplicación, por lo que su utilización se ve relegada a casos muy especiales o a temas relativos a la comparación de otros más simplificados.

1.10. OBRAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Las obras para estabilizar taludes se pueden dividir en dos grandes grupos, por un lado los métodos de protección, y por otro los de estabilización o refuerzo.

La principal diferencia entre ambos se centra en que los primeros tratan de evitar que se desarrollen posibles fenómenos de alteración en la zona del talud, lo que puede dar lugar a inestabilidades; mientras que los métodos de refuerzo o estabilización se caracterizan por actuar de forma activa en el caso que se produzcan dichos fenómenos.

En la actualidad existen variados métodos para estabilizar los taludes, estos métodos dependen generalmente del tipo de terreno.

1.10.1. Descripción de Diversas Obras de Estabilidad de Taludes en Carreteras

Existen diversas formas de estabilizar los taludes, siendo las más comunes:

- ▶ **Remodelado geométrico de los taludes.**- Este método de estabilización se refiere al cambio de la forma del talud dando una mayor inclinación, es decir realizando una descarga de los taludes, esto se puede llevar a cabo mediante:

⇒ Descabezamiento de un talud.- Al quitar peso de la parte superior del talud.

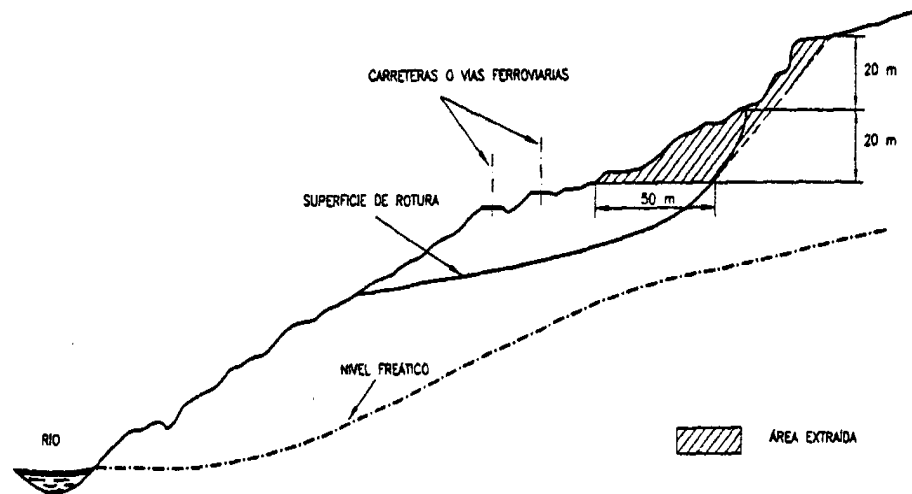


Figura 19. Descabezamiento de un talud

- ⇒ Retiro de materiales inestables.- Retiro de todos los materiales inestables o potencialmente inestables.
- ⇒ Tendido o reperfilado de los taludes.- Tender los taludes (darles mayor inclinación).

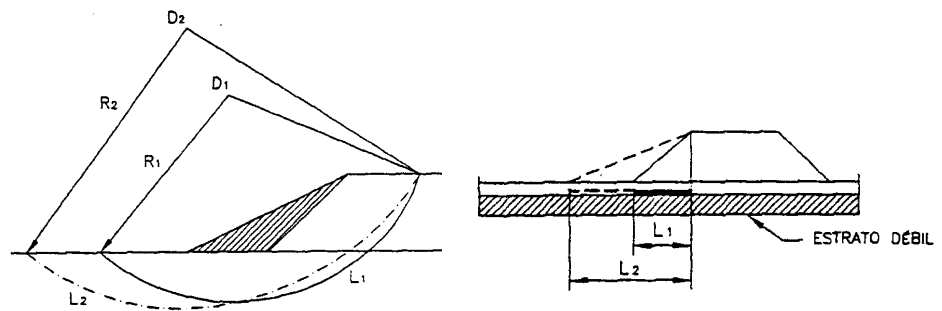


Figura 20. Tendido de Taludes

⇒ Banqueo de los taludes.- Modificar la morfología de un talud de gran altura en varios de alturas más pequeñas, por este motivo las bermas deben ser suficientemente anchas para evitar la caída de bloques de unos niveles a otros.

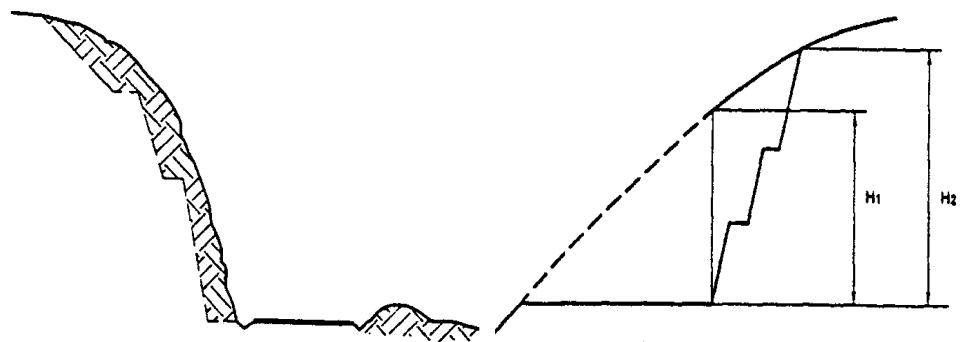


Figura 21. Banqueo de Taludes

► **Muros.**- Este método hace referencia a la utilización de muros de contención.

⇒ Muros de hormigón en masa o de gravedad.- Son los más antiguos y en ellos el propio peso actúa como estabilizador. Su relación altura/ancho (H/B) de estos muros suele estar comprendida entre 1,5 a 2, y se destaca su facilidad constructiva y reducido costo cuando son de poca altura.

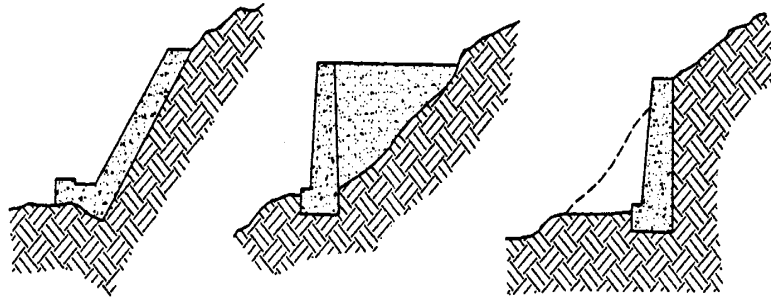


Figura 22. Muros de hormigón en masa

⇒ Muros de hormigón armado.- Son muros armados interiormente con redondos de acero y diseñados para soportar esfuerzos de tracción. Estos exigen menor cantidad de hormigón que los anteriores.

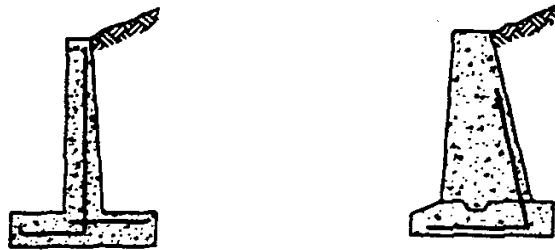


Figura 23. Muros de hormigón armado.

⇒ Muros de fábrica.- Son muros de piedras naturales ejecutados de forma natural, también se pueden utilizar ladrillos o bloques de hormigón.

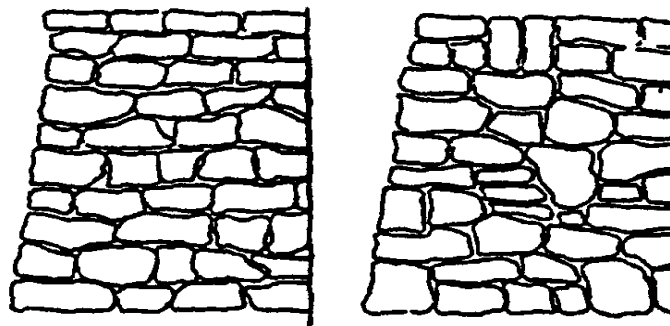


Figura 24. Muros de fábrica.

⇒ Muros Jaula.- Este tipo de muros es muy utilizado en países como Australia, Estados Unidos, Gran Bretaña, Nueva Zelanda.

Básicamente, son estructuras compuestas por cajas de madera que forman un entramado o jaula y que posteriormente se rellenan con materiales granulares incrementando así la resistencia del talud. Este tipo de muros actúan como los muros de gravedad aprovechando el propio peso de las jaulas rellenas.

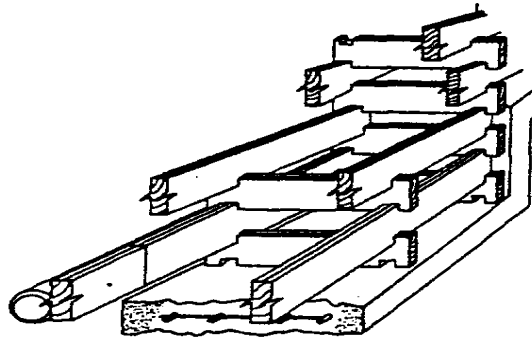


Figura 25. Muros jaula.

⇒ Muros de escollera.- El enchado consiste en la colocación de bloques de piedra natural sana compacta y resistente tales como caliza, granito, gabros, cuarcitas, etc. Con un peso específico normalmente superior a 2 Tn/m^3 y una resistencia a la compresión simple superior a los 70 Mpa. El peso de los bloques puede superar los 250 Kg.

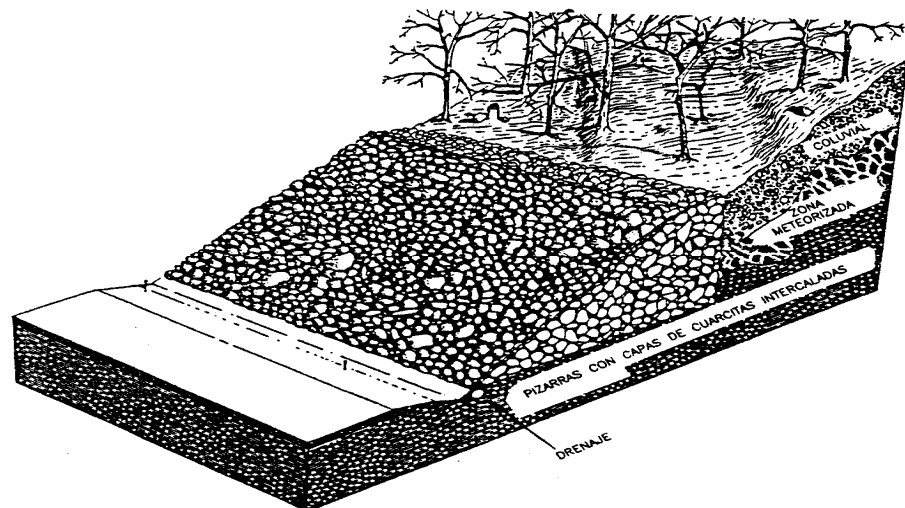


Figura 26. Muros de escollera.

⇒ Muros de neumáticos usados.- En la actualidad se está generando un gran problema de almacenamiento de cierto tipo de residuos, entre los cuales se encuentran los derivados del parque automovilístico. En diversos países industrializados, como Estados Unidos, este problema ha generado diversas controversias sobre el almacenamiento de neumáticos usados. Si se suma este punto al alto costo de los materiales de construcción, se ha llegado a la conclusión de que los neumáticos usados podrían ser reutilizados para la construcción de muros de contención.

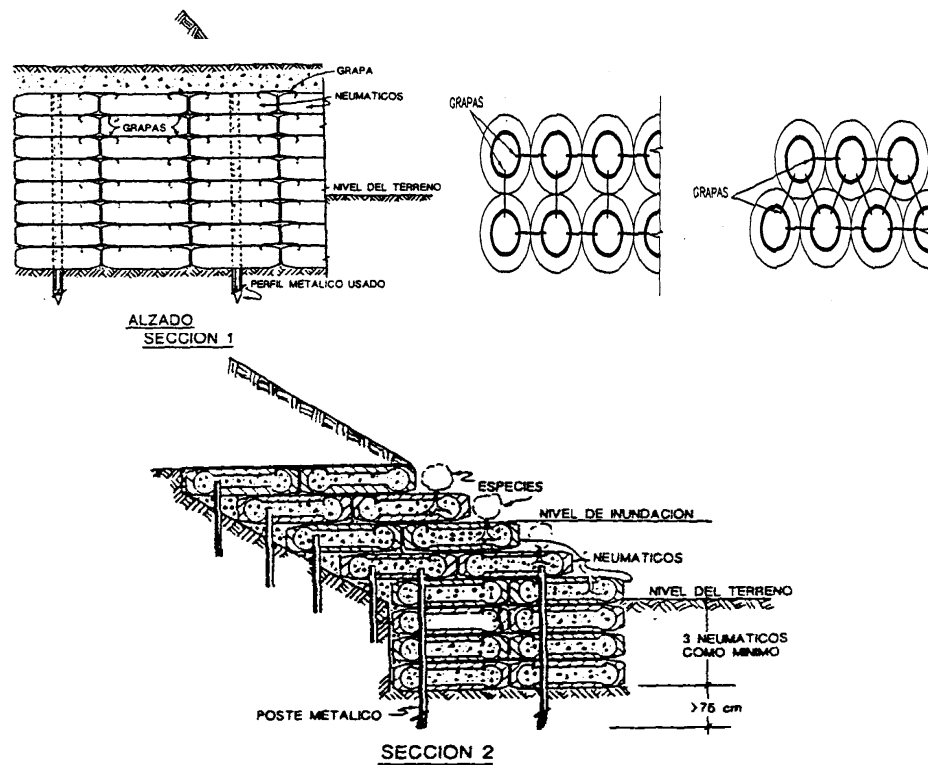


Figura 27 Muros de neumáticos usados

⇒ Muros de tierra armada.- Son muros construidos mediante tongadas de materiales de relleno, colocados entre éstos elementos tales como bandas metálicas, materiales plásticos, elementos prefabricados de hormigón o geotextiles, reforzando el muro y proporcionando, mediante el rozamiento entre el suelo y los diferentes elementos estructurales, estabilidad al conjunto.

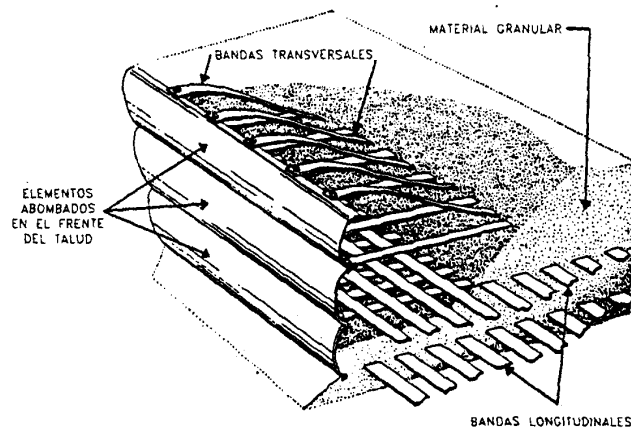
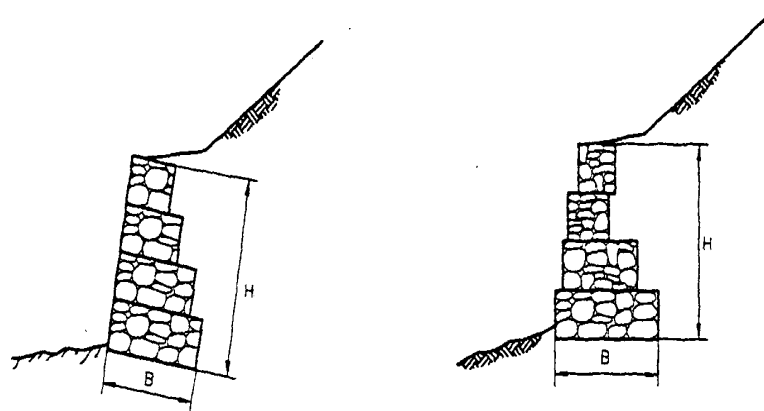


Figura 28. Muros de tierra armada.

⇒ Muros de gaviones.- Un gavión consiste en una estructura paralelepípedica elaborada con mallas de alambre galvanizado de triple torsión y rellenas con la piedras.



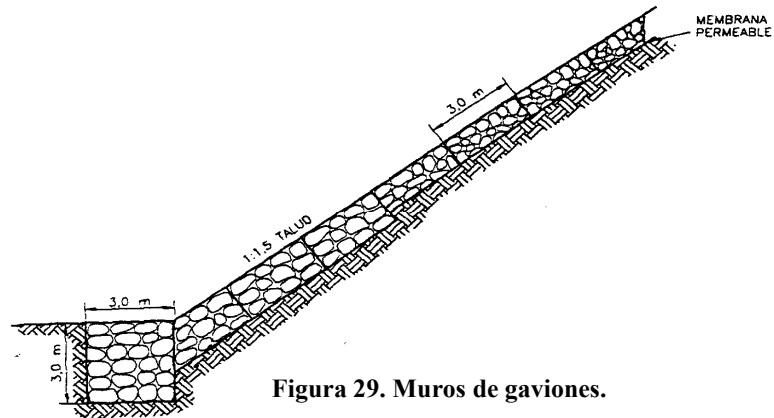


Figura 29. Muros de gaviones.

- ▶ **Refuerzos.-** Los sistemas de refuerzo son cada vez más utilizados en aquellas situaciones en las que no existe la posibilidad de utilizar contrafuertes bien por problemas de espacio para instalar un muro de contención o por que existen dificultades para realizar la expropiación de los terrenos afectados por las obras.

⇒ Reticulado de micropilotes.- Los micropilotes son estructuras o elementos de pequeño diámetro (75 – 250 mm.), compuestos de acero y mortero. Para el acero de armadura se puede utilizar tubos, perfiles laminados o redondos.

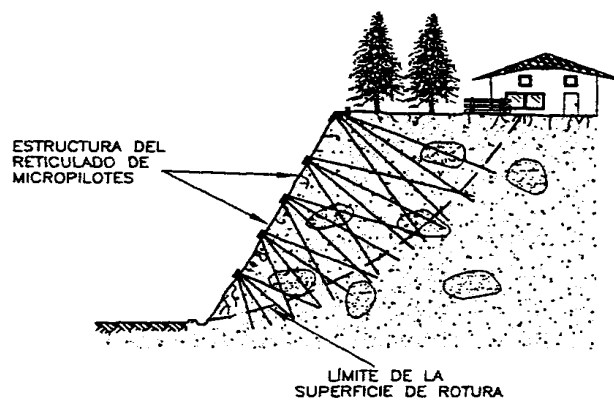


Figura 30. Reticulado de micropilotes.

⇒ Anclajes y bulones.- Los anclajes en suelos consisten en unos cables colocados dentro de taladros y pensionados después de que ha sido inyectado el hormigón. En el caso de excavaciones poco profundas, los anclajes en suelos trabajan más como elementos estructurales de sujeción. Por ejemplo, se pueden utilizar para sujetar determinados tipos de pantallas. También se puede usar para estabilizar taludes y para aumentar la resistencia de un suelo ya consolidado.

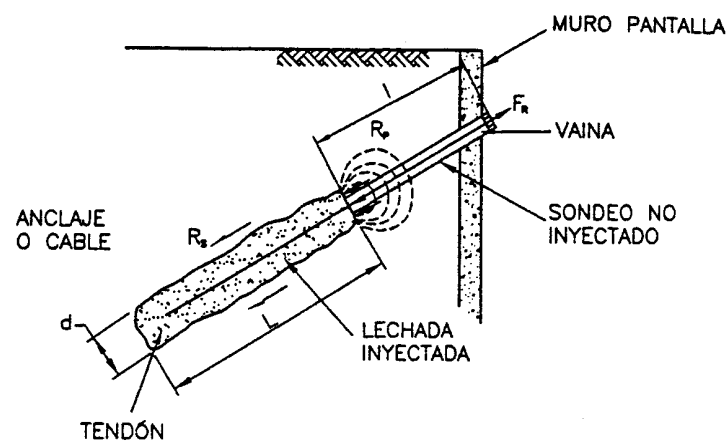


Figura 31. Anclajes y bulones

⇒ Columnas de grava.- Se utilizan para estabilizar o prevenir deslizamientos. Este método incrementa la resistencia al cizallamiento de un suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial. Reemplazando o desplazando el material in situ con varias series de columnas rellenas con gravas de gran diámetro. Adicionalmente, las columnas de grava actúan como un drenaje profundo muy efectivo.

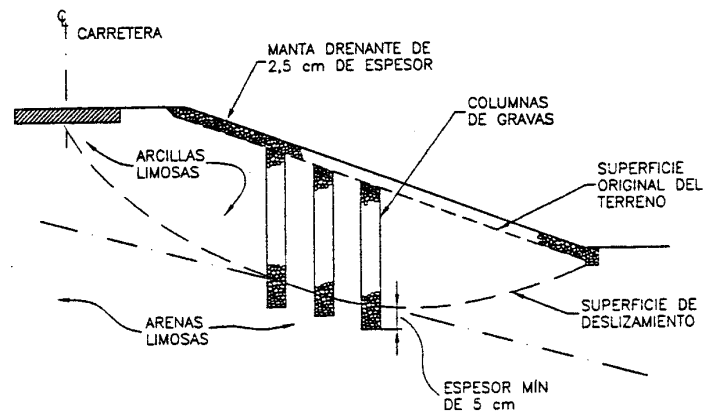


Figura 32. Columnas de grava.

- ⇒ Pilotes.- Los pilotes o pasadores son elementos de cimentación de gran longitud con respecto a su sección transversal que se empotran en una cavidad previamente excavada en el terreno. Antiguamente los pilotes que se usaban eran de madera, pero en la actualidad los únicos pilotes que se utilizan son principalmente de hormigón, aunque se puede utilizar también pasadores metálicos. Existen pilotes prefabricados y hormigonados in situ.
- ⇒ Mallas y redes metálicas.- La fijación de mallas y redes metálicas a la superficie de los taludes inmoviliza o amortigua el deslizamiento de materiales procedentes de la descomposición del sustrato y contribuye a la consolidación definitiva de dicho talud, favoreciendo a veces la colonización vegetal.

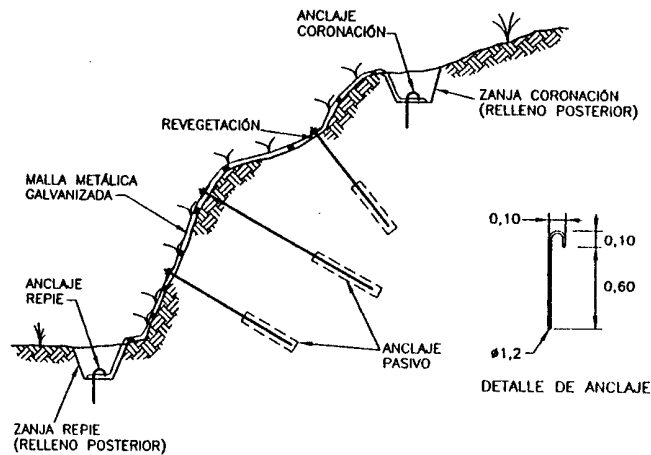


Figura 33. Mallas y redes metálicas.

► **Tratamientos del terreno.-** En muchas ocasiones, para estabilizar taludes, los métodos anteriormente expuestos no son lo suficientemente efectivos en suelos cohesivos, que tienen permeabilidad baja o muy baja, en estas situaciones, se deben considerar los siguientes métodos de tratamiento del terreno.

⇒ Tratamientos químicos.- La utilización de elementos químicos para el tratamiento de laderas o taludes inestables es una posibilidad que presenta diversos atractivos. Los tratamientos químicos más utilizados en la estabilización de laderas han sido las inyecciones de cementos pórtland, cloruros cálcicos, inyecciones de cal y las cenizas. Sin embargo, el gran problema a la hora de utilizar cualquiera de estos elementos químicos ha sido el conseguir un método adecuado para realizar las inyecciones en las zonas de inestabilidad.

⇒ Inyecciones de cal.- Las inyecciones de emulsiones de cal o de cal y cenizas volantes se emplean mucho en los Estados Unidos para el tratamiento de suelos arcillosos expansivos y limosos. Para lograr una emulsión acuosa espesa con cal y que sea fácilmente bombeable, se suele mezclar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2), con agua limpia, de forma que exista en dicha

emulsión una concentración máxima del 40 % en sólidos. Con el fin de inyectar la emulsión en el terreno se deben emplear equipos adecuados. La emulsión al ser inyectada en el suelo sigue las zonas de debilidad, planos de estratificación, fisuras naturales, etc.

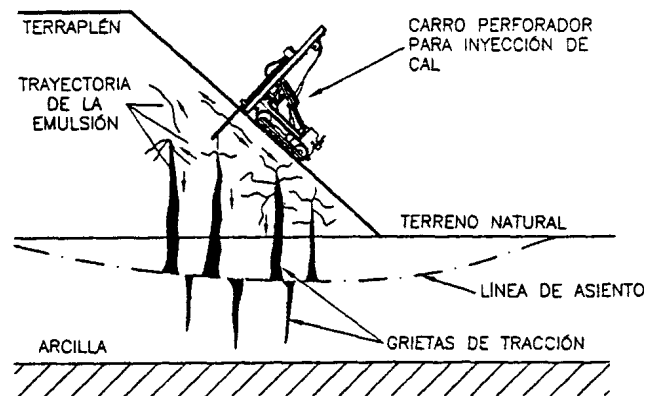


Figura 34. Inyecciones de cal

- ⇒ Columnas de cal.- Las columnas de cal fueron utilizadas por primera vez por los ingenieros Suecos. Las columnas de cal se construyen in situ mezclando cal viva con el terreno mediante el empleo de un tornillo sin fin (Auger). Este penetra en el subsuelo hasta una profundidad por debajo de la superficie deslizante y en el hueco generado es donde se inyecta la lechada de cal.
- ⇒ Tratamientos térmicos.- Los tratamientos de alta temperatura secan los materiales arcillosos, provocando el pegado de las partículas y como consecuencia se incrementa la estabilidad del terreno.

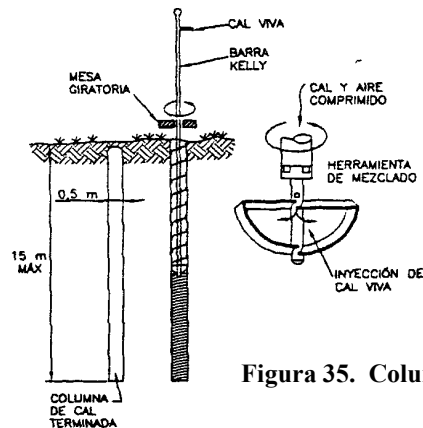


Figura 35. Columnas de cal

⇒ Pilotes de cal.- Este sistema ha sido empleado en diversos países desde los años 60 con el fin de mejorar la estabilidad de suelos saturados. Los pilotes se forman perforando unos barrenos en los que se inyectará y compactará la cal.

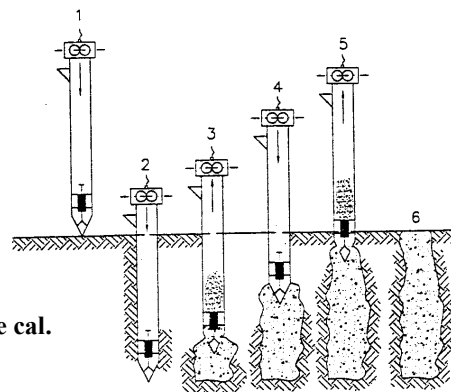


Figura 36. Pilotes de cal.

⇒ Tratamientos eléctricos.- Otra técnica que incrementa la resistencia de los suelos es la denominada como electroósmosis. Las publicaciones clásicas sobre esta técnica fueron desarrolladas por Casagrande (1948, 1952, 1953), pero existen numerosos casos históricos recogidos en la literatura por Holtz (1989) en los que se ha utilizado la técnica de la electroósmosis para estabilizar los cimientos de diques; sin embargo, la aplicación clásica de la electroósmosis ha sido la estabilización de laderas inestables.

1.1. GENERALIDADES

Los deslizamientos, son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

El presente proyecto de tesis de grado intenta presentar una alternativa en el análisis de los fenómenos que ocasionan los deslizamientos.

Cuando el ingeniero va a construir vías terrestres se ve enfrentado a problemas de inestabilidad tanto en corte como en terraplenes. Ambos casos son esencialmente diferentes.

No es muy frecuente la falla de terraplenes, esto debido, posiblemente a que estas estructuras se construyen con materiales seleccionados en principio, la construcción se realiza bajo una norma las cuales han tenido un avance significativo en los últimos años y por lo tanto estas estructuras se considera homogéneas y presentan un comportamiento predecible.

En cambio los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes "In Situ" con toda le heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto la influencia del constructor es limitada.

De tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

En general la construcción de los terraplenes es una tarea rutinaria y no ofrece dificultad, sin embargo existen algunos casos que hacen muy crítica su construcción tales como:

1. Terraplenes en suelo blando.
2. Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.
3. Terraplenes en laderas inclinadas.
4. Accesos a puentes y pasos a desnivel.
5. Terraplenes sobre suelos licuables.
6. Terraplenes con riego de tubificación.

Los cortes en cambio por su heterogeneidad, presentan frecuentes problemas de estabilidad que con ciertos cuidados pueden ser superados, sin embargo algunos casos que exigen tratamientos especiales en su construcción, tales como:

1. Cortes de gran altura.
2. Cortes de laderas inestables.
3. Cortes sujetos a flujos de agua.
4. Cortes en suelos erosionables.

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de predicción de la estabilidad, con el objeto de tomar medidas preventivas y/o correctivas.

Para hacer el análisis de estabilidad de un talud es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej. Causas del movimiento, velocidad del movimiento.
2. Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Seleccionar el método para cálculo de la estabilidad del talud.
4. Correlacionar las observaciones del campo con los resultados del cálculo.

1.2. DEFINICIÓN DE TALUD

Es toda aquella superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente las masas de suelo de rocas, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución.

Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

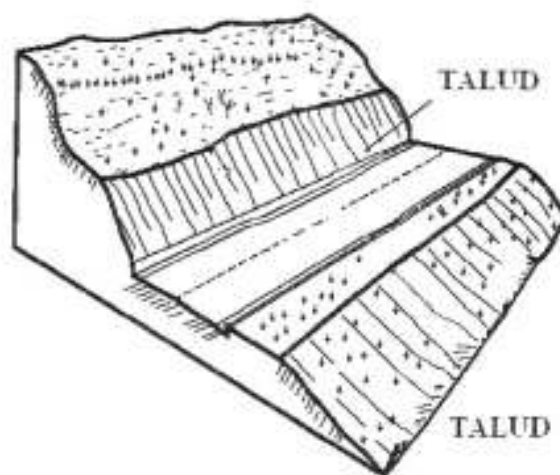


Figura 1. Talud en corte de una carretera.

1.3. NOMENCLATURA DE UN TALUD

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 2).

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

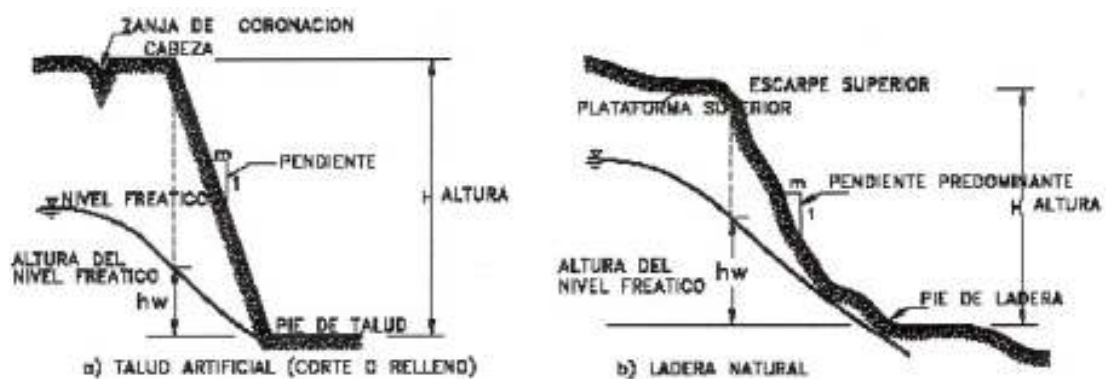


Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas.

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

1. **Altura.-** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie.-**Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe.-** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático.-** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente.-**Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación mil, en la cual “m” es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo:

Pendiente: 450, 100%, o IR: **IV**. Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

6. **Base firme.**- La base firme es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento

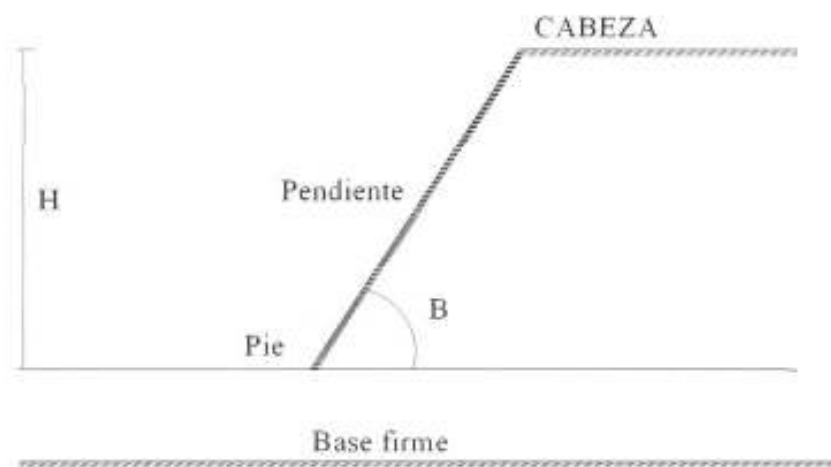


Figura 3. Esquema de partes de un talud.

La inclinación (B) de un talud depende de:

1. Altura del talud.
2. Condiciones topográficas.
3. Estructuras geológicas.
4. Tipo de suelo o roca.
5. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

La principal función de los taludes es la de garantizar en condiciones óptimas la transitabilidad de las carreteras, para la libre circulación vehicular, lo que implica que, en el talud no deben existir desprendimientos aislados o en bloque.

1.4. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LOS TALUDES

Los factores a tomar en cuenta para el diseño de los taludes en general son:

- Altura “H” desde el pie hasta la cresta talud.
- Ángulo que forma la cara del talud con la horizontal.
- Ángulo de fricción interno.
- Cohesión.
- Densidad del suelo del talud.
- Nivel freático.
- Cargas externas.
- Lluvias máximas.

1.5. TIPOS DE TALUDES

Los taludes se dividen en:

a. Taludes naturales o laderas son los conformados por las laderas que se han formado sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

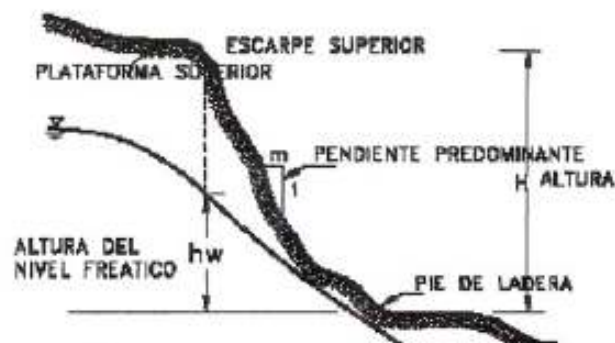


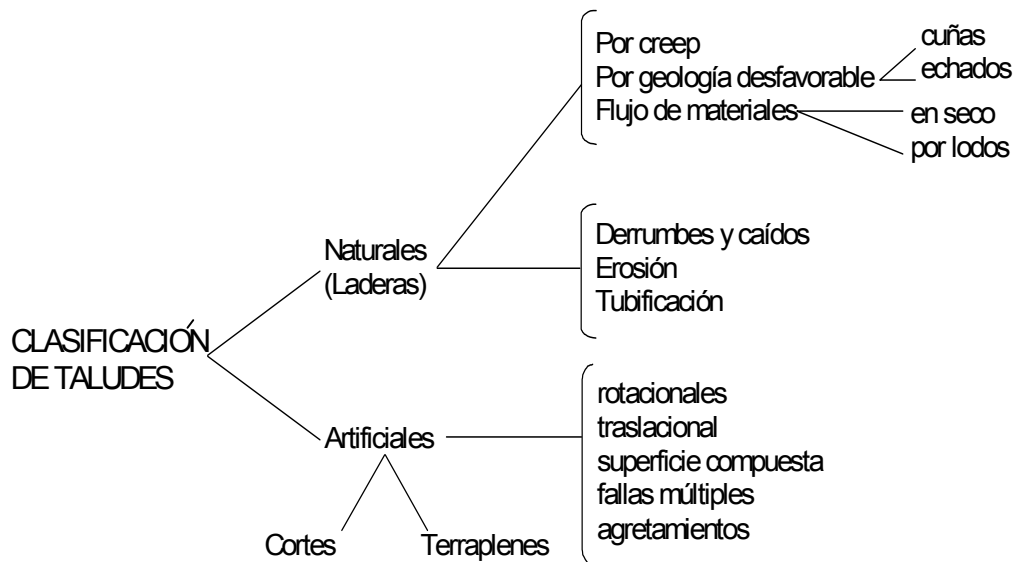
Figura 4. Talud natural.

b. **Taludes artificiales**, son estructuras diseñadas y construidas por el hombre y lo conforman los cortes y los terraplenes.



Figura 5. Talud artificial.

Por lo que podemos realizar la siguiente caracterización de cada uno de ellos, de acuerdo a lo siguiente:



Cuadro 1. Clasificación de taludes.

1.6. INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE CARRETERAS

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos.

Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

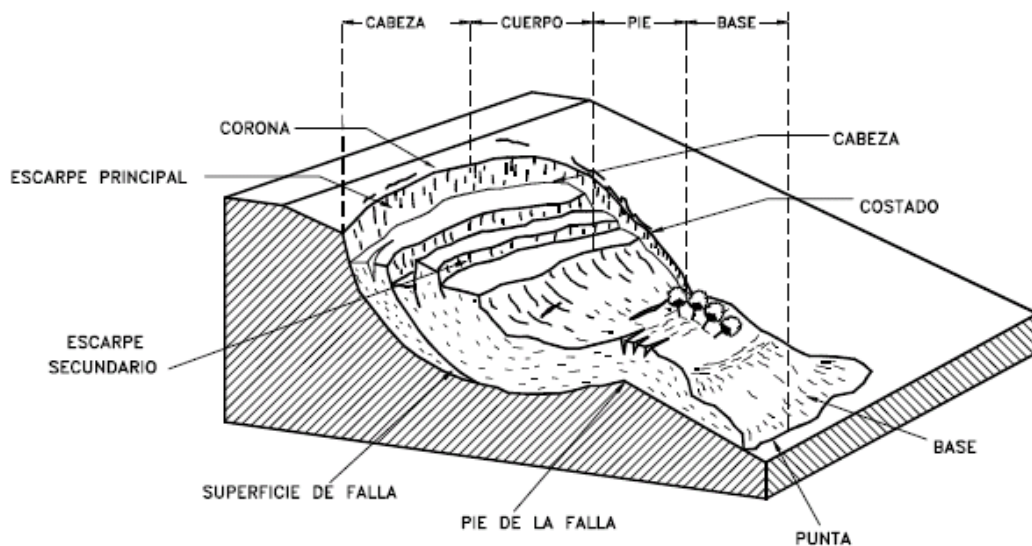


Figura 6. Deslizamiento o movimiento en masa típico.

En la Figura 6 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

- 1. Escarpe principal.-** Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
- 2. Escarpe secundario.-** Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

- 3. Cabeza.-** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 4. Cima.-** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 5. Corona.-** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- 6. Superficie de falla.-** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- 7. Pie de la superficie de falla.-** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- 8. Base.-** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- 9. Punta o uña.-** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- 10. Costado o flanco.-** Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- 11. Superficie original del terreno.-** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- 12. Derecha e izquierda.-** Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

1.6.1. Dimensiones

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 7):

- 1. Ancho de la masa desplazada W_d .-** Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

- 2. Ancho de la superficie de falla W_r .**- Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- 3. Longitud de la masa deslizada L_d .**- Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- 4. Longitud de la superficie de falla L_r .**- Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- 5. Profundidad de la masa desplazada D_d .**- Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- 6. Profundidad de la superficie de falla D_r .**- Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- 7. Longitud total L .**- Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- 8. Longitud de la línea central L_{cl} .**- Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se dilata. El término “Factor de expansión” puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento.

En algunas ocasiones como en el caso de roca el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

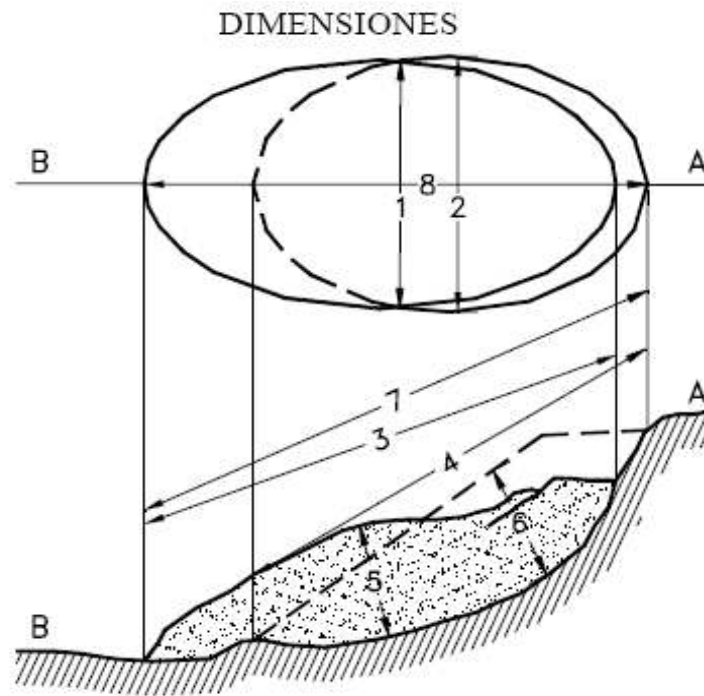


Figura 7. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG

1.7. FACTORES DE INESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE CARRETERAS

Algunos de los factores de inestabilidad de los taludes de carreteras son:

A. Geología de la región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen uno de los mecanismos de modificación (Schuster and Krizek 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial del deslizamiento de taludes.

El relieve y la topografía están determinados por la geología del área, lo que permite estimar la susceptibilidad al movimiento en el nivel regional.

En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas, sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves. A continuación se incluye una breve descripción de las características de estos relieves.

a. Taludes escarpados: En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de derrumbe en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca, por ello, una fuerte lluvia o un corte al pie del talud pueden activar el deslizamiento de la masa suprayacente.

b. Áreas de concentración de drenaje y filtración: Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Es probable que ocurran filtraciones con el subsecuente deslizamiento en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada. Es importante reconocer el peligro potencial de las áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas.

c. Áreas de concentración de fracturas: El movimiento de taludes puede estar estructuralmente condicionado por superficies débiles tales como fallas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales que pueden actuar independientemente una de la otra.

Por ello, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo sino como una serie de bloques individuales; estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación, lo cual debilita los bloques y reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, se debe buscar cuidadosamente las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando éstas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques que lo hacen más inestable.

B. Topografía y estabilidad

Los mapas topográficos representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos y, algunas veces, se puede identificar en ellos grandes áreas de deslizamiento. En los mapas topográficos, la escala y el intervalo de las curvas de nivel facilitan la identificación de los deslizamientos. Esta identificación se puede llevar a cabo mediante:

a. Características topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja.

b. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.

c. Movimientos menores o irregularidades en zonas de pendientes empinadas, acantilados, bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

La identificación de deslizamientos en mapas topográficos se verá ayudada por la escala y el intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

C. Efecto de la resistencia del suelo y la pendiente del talud

El suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera se llama también condición drenada o a largo plazo y la segunda, condición no drenada o a corto plazo.

D. Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de los taludes ya que influye en la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, generalmente no saturados, el efecto acumulativo puede llegar a saturar el terreno y activar un deslizamiento.

Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a) **El ciclo climático** en un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual versus baja precipitación anual
- b) **La acumulación de pluviosidad** en un año determinado en relación con la acumulación normal.
- c) **Intensidad** de una tormenta específica.

Guidicini e Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación con la pluviosidad y establecieron el coeficiente del ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente del ciclo fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil, la cual presenta un clima tropical caracterizado por una estación seca de junio hasta agosto y una estación húmeda desde enero hasta marzo.

Los resultados del estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno que eleva el nivel freático, por lo tanto, una tormenta durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda tendría un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad al final de la estación húmeda.

E. Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento. La erosión por agentes humanos incluye cualquier actividad que permite un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección, como la tala de árboles u otro tipo de vegetación que ayuda a fijar el suelo y mejorar la estabilidad del talud. La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, incrementa la incidencia de taludes inestables y puede resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión que en los lagos o embalses incrementan la turbidez de las aguas y crean un peligro para la vida acuática, contaminan el agua potable y reducen la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y cascajo. En taludes, la protección consiste en:

- a) **Sembrar vegetación** de rápido crecimiento además de instalar un sistema de control del drenaje superficial.
- b) **Instalar fajinas** en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas.
- c) **Sellar las grietas superficiales** con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración, lo cual reduce la erosión.

F. Licuefacción debido a acciones sísmicas

La mayoría de las fallas de los taludes durante sismos se debe al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos, sin embargo, también se han observado fallas en suelos cohesivos durante algunos eventos sísmicos de gran magnitud.

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas, la cual puede ser activada por la repetida aplicación de pequeños incrementos o decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La pérdida de resistencia es de tal magnitud que momentáneamente el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado y se originan grandes deformaciones.

Los fenómenos de licuefacción se han observado generalmente en depósitos aluviales recientes compuestos por granulares, como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos.

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son:

1. **La granulometría** (tamaño, gradación y forma de granos).
2. **La densidad relativa** del depósito.

Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas que contienen menos de 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tienen la tendencia a depositarse de manera suelta y presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno.

1.7.1. SUPERFICIES PREFERENCIALES DE FALLA

Llamamos falla a la ruptura de un estrato rocoso debido a un esfuerzo en la que se puede observar un desplazamiento. Si no hay desplazamiento decimos que hay una diaclasa, y si no atraviesa la roca decimos que es una fisura. Si el desplazamiento no consigue romper los estratos pero hay una acentuación significativa y brusca del buzamiento de los estratos, estirados y adelgazados, se llama flexión.

Las superficies de falla de un talud son aquellas zonas dentro del talud que delimita la superficie probable de rotura o deslizamiento, la cual se encuentra relacionada con las condiciones geotécnicas del talud, de allí la importancia del conocimiento del tipo de material, formación y estructura geológica y propiedades mecánicas del talud, entre otros, así como, los factores externos topográficos, sísmicos y climatológicos, complementados con las condiciones de aguas superficiales y subterráneas, que permitirán analizar el comportamiento de un talud (factores de seguridad) y definir las obras necesarias para su estabilización.

El movimiento se hace según una superficie de falla que no es siempre un plano de falla. La superficie es, algunas veces vertical y generalmente inclinada presentando una cierta pendiente. En este último caso, el labio superior, reposando sobre el plano de falla, es el techo el labio inferior es el muro.

La intersección de la superficie de falla con el terreno (o, si el relieve es fuerte, por un plano horizontal) es la traza, la línea de falla. La falla puede ser, con relación a la dirección (de las capas) longitudinales, direccionales, transversal, u oblicua.

1.7.1.1. Discontinuidades Heredadas

Las juntas, fracturas, foliaciones, planos de estratificación, laminaciones, diques, orientaciones de los minerales y demás discontinuidades de la roca original; se convierten en discontinuidades dentro de la masa de suelo residual que actúan generalmente como superficies de debilidad por su baja resistencia, relacionadas no sólo por la fractura en sí, sino también con la meteorización preferencial a lo largo de éstas, ya que actúan como conductos del agua y demás agentes meteorizantes, que facilitan no sólo el transporte y depósito de subproductos sino la formación de redes de presión de agua y de disipación de succión a lo largo de los planos de discontinuidad. Las juntas heredadas controlan, en la mayoría de los casos, el régimen del agua infiltrada después de una lluvia.

En la mayoría de los deslizamientos que ocurren en suelos residuales la superficie de falla coincide en áreas importantes con grupos de discontinuidades heredadas, las que algunas veces están rellenas de materiales débiles comúnmente arcillas que absorben agua, se expanden y se ablandan muy fácilmente; y es común que su existencia y significancia sólo se identifica después de que ha ocurrido una falla.

Observaciones del flujo de agua subterránea indican que el agua fluye a lo largo de rutas tales como las discontinuidades heredadas y conductos internos de erosión.

Las discontinuidades debidas a procesos de metamorfismo de las rocas , conocidos como pizarrosidad, esquistocidad, foliación etc. forman superficies generalmente paralelas de baja cohesión a través de las cuales los materiales se pueden partir fácilmente o producirse fenómenos de desmoronamiento y flujos secos de material desintegrado.

Muchos tipos de relleno diferente se pueden encontrar a lo largo de las discontinuidades pero generalmente se trata de materiales arcillosos y su espesor

puede variar desde capas microscópicas hasta centímetros. Este relleno puede provenir de materiales lavados de capas superiores o de meteorización en el sitio.

La detección y evaluación de los efectos de las estructuras heredadas es de primordial importancia en los estudios geotécnicos para casos de estabilidad de taludes, pero esta es muy difícil con el sistema de perforaciones con taladro. Irfan y Woods(1988) recomiendan hacer excavaciones de gran tamaño y reportan zanjas de hasta 20 metros de profundidad para establecer el "pattern" de discontinuidades heredadas; y estas excavaciones pueden programarse como parte de los cortes definitivos. Adicionalmente se recomienda el mapeo de las discontinuidades a medida que se avanza con los cortes para detectar la necesidad de modificar el diseño.

1.7.1.2. Espejos de Falla

Los espejos de falla son discontinuidades lisas, que pueden ser el producto de movimientos tectónicos en la roca original, los cuales se preservan en el suelo residual; o pueden ser causados también por movimientos diferenciales ocurridos dentro de suelos areno-limosos por acción del proceso de meteorización. Es difícil diferenciar entre superficies antiguas o recientes y en ocasiones se puede observar más de una dirección de estriado en la misma discontinuidad (Irfan y Woods- 1988).

La resistencia al corte a lo largo de los espejos de falla es particularmente baja y muchos deslizamientos son controlados por estas superficies de falla.

1.7.1.3. Zonas de Cambio de Permeabilidad

Para empezar diremos que la permeabilidad es el actor que mide la resistencia de los materiales al libre flujo del agua, y puede definir el régimen de aguas subterráneas, concentración de corrientes, etc.

Como su nombre lo indica son zonas en las que la permeabilidad cambia, la presión de poros elevada provoca deslizamientos y el flujo de agua, a través del suelo, puede originar tubificación y arrastre de partículas sólidas, es por este motivo que el cambio de permeabilidad en un talud es tan importante.

1.7.2. IMPORTANCIA DE LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

A. Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

Coeficiente de rozamiento = $\tan \Theta$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son:

- a) Tamaño de los granos.
- b) Forma de los granos.
- c) Distribución de los tamaños de granos.
- d) Densidad.

B. Cohesión

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.

La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y se los denomina Suelos no Cohesivos.

C. Cohesión aparente

En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares, a este fenómeno se lo conoce como cohesión aparente. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.

1.7.2.1. Suelos Cohesivos y No Cohesivos

Los suelos cohesivos poseen la propiedad de la atracción intermolecular, como ejemplo las arcillas.

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación, como la arena y la grava.

1.7.2.2. Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que es su conformación presentan gran cantidad de arcilla, éstos presentan características de cimentación, que depende de la cantidad de arcilla que presente el suelo en cuestión, los suelos arcillosos son muy buenos para la agricultura por la propiedad de almacenar agua, pero son muy malos para las obras civiles.

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico.

El tipo sílice se encuentra formado por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno. La unión entre partículas se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

El tipo alumínico está formado por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno.

1.8. MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. En los últimos años se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, pero se requiere todavía de un gran esfuerzo de investigación en este tema.

1.8.1. CONDICIONES DRENADAS Y NO DRENADAS

Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior, en suelos de baja permeabilidad, éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso se dice que las condiciones son no drenadas.

Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poro en exceso y se comportan en condiciones drenadas.

Para tasas normales de carga, que equivalen a meses o semanas, suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg., se pueden considerar drenadas y suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg., se consideran no drenadas.

Mientras las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas.

Duncan (1996) recomienda que para los taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros debida a las lluvias, el problema debe analizarse como condición drenada.

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

Donde:

$$T = \text{Factor adimensional.} \quad T = \frac{C_v t}{D^2}$$

C_v = Coeficiente de consolidación

t = Tiempo de drenaje

D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T es mayor de 3 la condición es drenada.

Si T es menor de 0.01 la condición es no drenada.

Si T está entre 0.01 y 3.0 ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas.

En este caso deben analizarse ambas condiciones.

El caso drenado y el caso no drenado.

1.8.2. ANÁLISIS CON ESFUERZOS TOTALES O EFECTIVOS

Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada. Pero en la práctica sin embargo es virtualmente imposible determinar con precisión cuales son los excesos de presión de poro que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). Debido a esta razón no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, se puede trabajar todo el análisis utilizando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poro en las condiciones no drenadas.

1.8.3. RESISTENCIA AL CORTANTE

La resistencia al cortante para utilizar en los análisis puede ser medida de dos formas:

- a) En el laboratorio o en ensayos de campo, en tal forma que las cargas aplicadas, sean lo suficientemente lentas para que se produzca drenaje.
- b) En el laboratorio utilizando ensayos consolidados no drenados.

Las envolventes de falla determinadas usando estos dos métodos se han encontrado que son las mismas para todos los fines prácticos (Bishop y Bjerrum, 1960).

Estudios realizados por Skempton revelan que las resistencias drenadas pico de arcillas sobre consolidadas duras, son mayores en el laboratorio que las resistencias drenadas que pueden ser movilizadas en el campo en un período de tiempo.

Skempton recomienda realizar los ensayos remoldeando la arcilla en el laboratorio a un contenido de agua cercano al límite líquido, reconsolidándolo en el laboratorio y midiendo la resistencia en una condición normalmente consolidada. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda utilizar las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977, 1985).

Para suelos parcialmente saturados tales como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas deben obtenerse utilizando ensayos no consolidados no drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en el campo. La envolvente de falla para esos suelos generalmente, es curva y por lo tanto es importante utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento en los ensayos de laboratorio que en el campo.

Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada de ensayos no consolidados no drenados.

1.8.4. PESOS UNITARIOS Y PRESIONES DE PORO

Los problemas de estabilidad de taludes pueden formularse correctamente en términos de esfuerzos totales, utilizando pesos unitarios totales y límites externos de presión de poros.

Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático, y saturados por debajo del nivel freático. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático.

Las condiciones de presión de poros son generalmente, obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos:

1. Superficie freática

Esta superficie o línea en dos direcciones se define como el nivel libre del agua subterránea.

En una superficie freática la presión de poros es calculada de acuerdo a las condiciones de estado de régimen permanente (Steady-state), de acuerdo al diagrama que se muestra en la figura. Este concepto se basa en la suposición de que todas las líneas equipotenciales sean ortogonales. Entonces, si la inclinación del segmento de superficie freática es θ y la distancia vertical entre el punto y la superficie freática es hw , entonces la presión de poros está dada por la expresión $u = \gamma w (hw \cos^2 \theta)$.

En el caso de líneas freáticas de gran pendiente, el cálculo anterior puede resultar sobre estimado y se requiere tener en cuenta que las líneas equipotenciales tienden a ser curvas.

2. Datos piezométricos

Es la especificación de presiones de poros en puntos discretos dentro del talud y la utilización de un esquema de interpolación para estimar las presiones de poro requeridas a cualquier punto. Las presiones piezométricas pueden determinarse mediante piezómetros, redes de flujo o soluciones numéricas, utilizando diferencias finitas o elementos finitos.

Aunque este sistema está disponible solamente en muy pocos de los programas de computador existentes, se recomienda por su confiabilidad para representar las condiciones reales en el campo (Chugh, 1981).

3. Relación de presión de poros

Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo a la definición:

Donde:
$$r_u = \frac{u}{\delta_v}$$

u = Presión de poros

δ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

Este factor se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro a diferentes partes del talud. En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores de r_u .

4. Superficie piezométrica

Esta superficie se define para el análisis de una determinada superficie de falla. Debe tenerse claridad en que la superficie piezométrica no es la superficie freática y que el método de calcular la presión de poros es diferente para los dos casos.

En la superficie piezométrica, la presión de poros es la distancia vertical entre la superficie piezométrica indicada y el punto (figura 1.3).

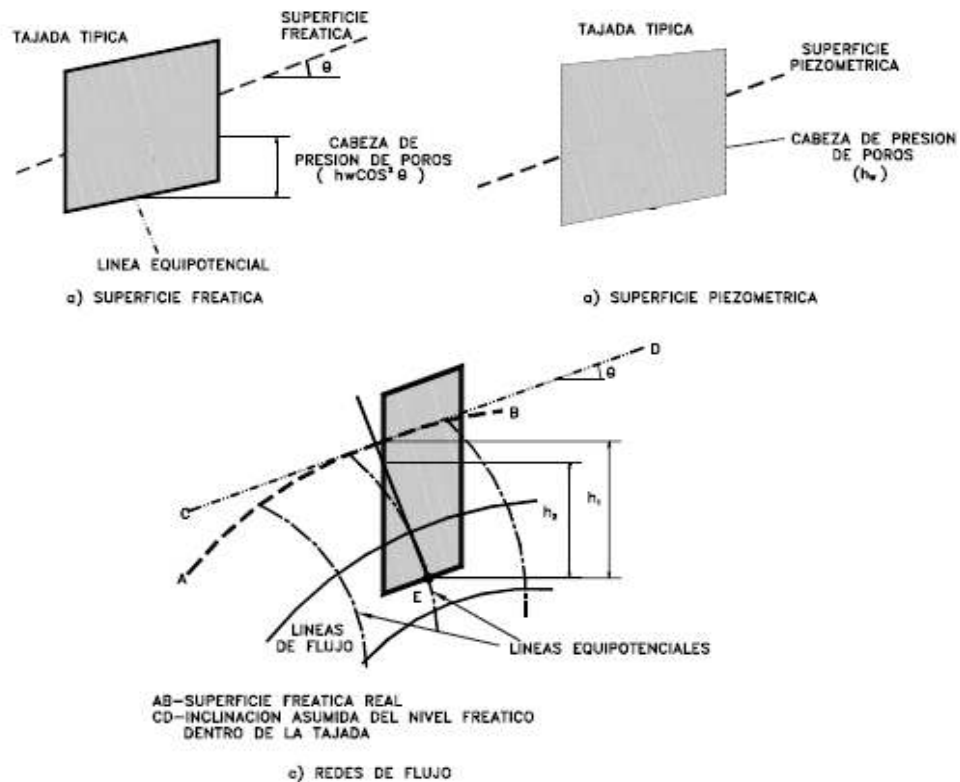


Figura 8. Presión de poros en las tajadas de análisis de estabilidad.

5. Presión de poros constante

Este procedimiento puede utilizarse si se desea especificar una presión de poros constante en una determinada capa de suelo. Este sistema puede utilizarse para analizar la estabilidad de rellenos colocados sobre suelos blandos, durante la construcción donde se generan presiones de poro, de acuerdo a la teoría de la Consolidación.

1.8.5. GRIETAS DE TENSIÓN EN LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar, la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente la grieta puede llenarse con agua, en el caso de lluvias.

La profundidad de las grietas de tensión puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión:

Donde:
$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Z_c = Profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

γ = Peso unitario del suelo

ϕ = Ángulo de fricción

Generalmente se recomienda la utilización de parámetros efectivos.

La presencia de grietas de tensión dificulta en forma considerable la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Las grietas de tensión son muy importantes y profundas en cortes de taludes, donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación.

1.9. EQUILIBRIO LÍMITE Y FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado . U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Morgenster n y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos Finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza Esfuerzos y Deformacio nes	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmi- ca	Espiral Logarítmi- ca	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Tabla. 1.

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

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia.al.Corte}}{\text{Esfuerzo.al.Corte}}$$

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

$$F.S. = \frac{\text{Momento.Resistente}}{\text{Momento.Actuante}}$$

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

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie (Tabla 2.1.).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

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

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias.al.Corte}}{\sum \text{Esfuerzos.al.Corte}}$$

1.9.1. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El análisis de la estabilidad de un talud es un proceso de tanteos, con suposiciones de las condiciones más críticas que en un momento dado in pueden presentar.

En términos generales los pasos a seguir son:

1. Se supone una superficie de falla, la cual puede ser
 - El pie del talud
 - La baso del talud
 - El talud

Después de haber hecho esto se habrá determinado:

- Una masa deslizante
- Una superficie de deslizamiento

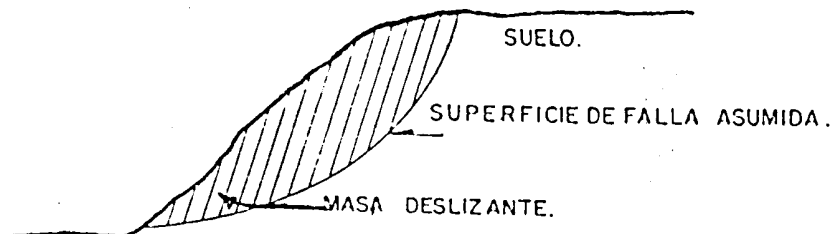


Figura 9. Determinación de la masa deslizante

Al haber definido la masa deslizante, se podrá calcular las fuerzas que producen el deslizamiento, llamadas también fuerzas motoras.

Al haber definido la superficie de falla se podrá calcular las fuerzas que se oponen al deslizamiento, llamadas también fuerzas resistentes.

2. Calcular los momentos:
 - Momentos resistentes
 - Momentos Motores o Deslizantes.
3. Calcular el factor de seguridad (F.S) para la superficie de falla dada
 - Si la falla es del tipo translacional, el F.S. resulta de comparar las fuerzas:

$$F. S. = \frac{\sum Fzas Resistentes}{\sum Fzas Deslizantes}.$$
 - Si la falla es del tipo rotacional, el F.S. resulta de comparar los momentos.

$$F.S. = \frac{\sum Mtos. Resistentes}{\sum Mtos. Deslizantes}$$

El F.S. hallado es para la superficie de falla, asumida y no necesariamente es el F.S. del talud.

Al repetir los pasos anteriores para otras superficies de falla, se obtendrá un F.S. mínimo el cual corresponde al del talud.

Significado de los factores de seguridad (sowers y sowers).

F.S.	Significado
Menor que 1	Inseguro
1.0 - 1.2	Seguridad dudosa
1.2 - 1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudosa para presas
1.5	Seguro para presas

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

1.9.1.1. Método Sueco

Aplicable para suelos netamente cohesivos ($C \neq 0$, $\phi = 0$)

El F.S. calculado por éste método da valores entre 10 a 15% más bajos que otros métodos más exactos. Es empleado para casos de práctica común; debido a que es muy sencillo y en el caso de taludes en los cuales el riesgo no es grande.

Este método se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea independiente de los esfuerzos normales al plano de la falla ($T = C$), tales como las arcillas poco sobreconsolidadas y taludes después de construídos o en los casos de aplicación de nuevas cargas sobre él.

- Se elige una circunferencia que puede considerarse como posible círculo crítico.
- Se determinan las fuerzas actuantes y las resistentes.
- Se calculan los momentos.
- Por último se determina el factor de seguridad.

En la siguiente figura se indica los pasos a seguir:

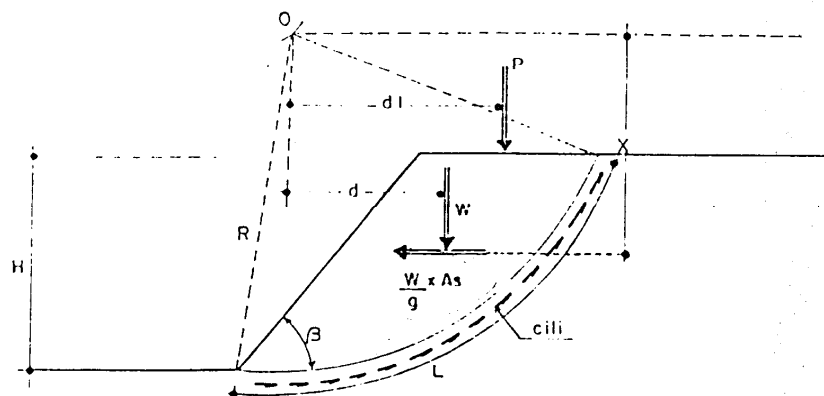


Figura 10. Fuerzas que actúan en el deslizamiento.

Cálculo de momentos actuantes o deslizantes:

$$M_m = W * d + p * d_1 + \frac{W}{g} * A_s + X$$

Cálculo de momentos resistentes:

$$M_r = R \quad C_i * L_i = R * C * L$$

Determinación del factor de seguridad (PS)

$$F.S. = M_r / M_m$$

1.9.1.2. Método Ordinario o de Fellenius

Es conveniente utilizar éste método cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es función de los esfuerzos normales o sea. : $T = C + \text{Ontan}\emptyset$

Consiste en:

1. Darse una superficie de falla circular
2. Dividir la zona de falla en una serie de franjas verticales o dovelas de cualquier espesor.
3. Determinar las fuerzas que actúan en cada dovela.
4. Calcular los momentos resistentes y los momentos motores que actúan a lo largo de la superficie de falla.
5. Calcular el F.S.

Ejemplo: Para un suelo cuya resistencia está dada por la siguiente expresión: $T = C + \text{Ontan}\emptyset$ (o sea con esfuerzos totales) sin N.F.

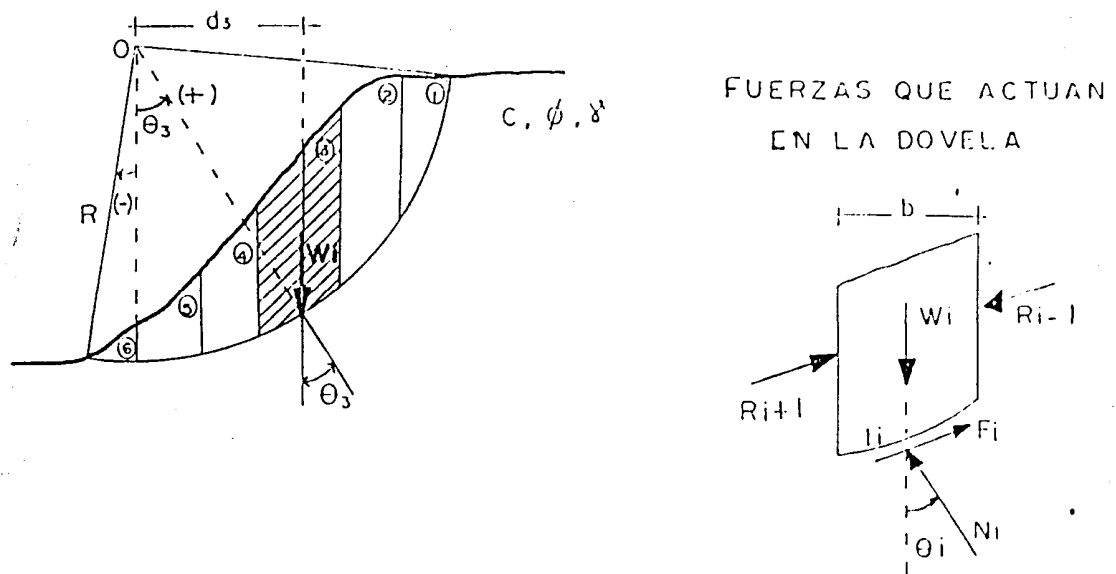


Figura 11. Diagrama utilizado por Fellenius.

- Donde:
- b = ancho de dovela
 - l_i = arco de la dovela
 - θ_i = ángulo que forma la vertical que pasa por el centro de gravedad de cada dovela y la normal a la base de la dovela, puede ser (+) o (-).
 - W_i = peso de cada dovela
 - R_{i-1} y R_{i+1} = Fuerzas laterales de las dovelas
 - F_i = Fuerzas tangenciales en la base de la dovela.
 - N_i = Fuerzas normales en la base de la dovela.

Este método asume que:

Las fuerzas R_{i-1} y R_{i+1} se convierten en reacciones interiores cuando se pasa de una dovela a otra y por lo tanto la suma de momentos de estas fuerzas es nulo.

Pues al sumar los momentos producidos por estas fuerzas, lo único que queda son las reacciones para los puntos extremos (primar y última dovela) donde la altura de cada dovela es nula, con lo que resulta valores nulos.

Fuerzas que se deben considerar según Fellenius.

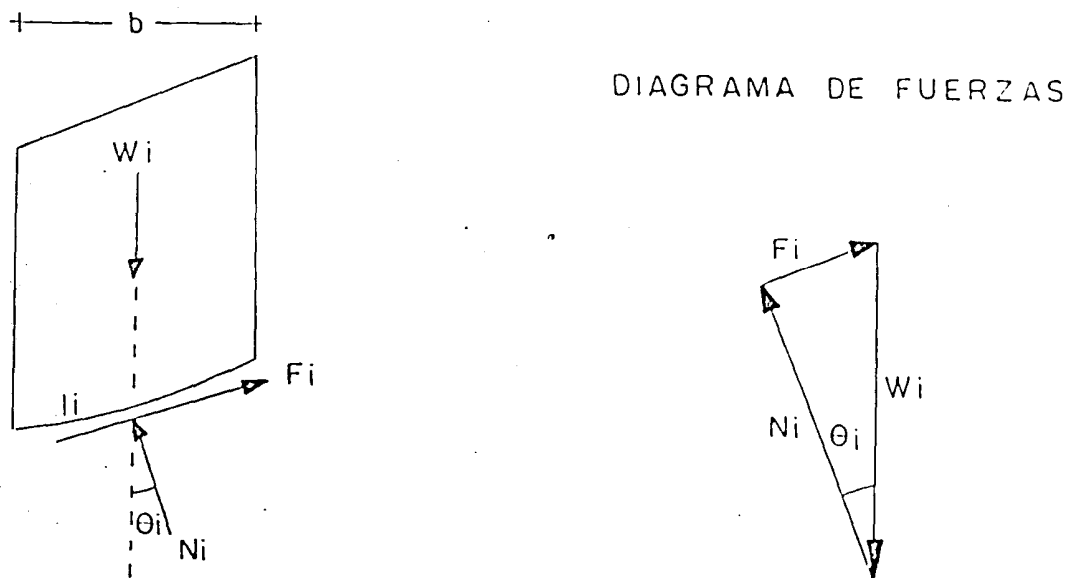


Figura 12. Fuerzas consideradas por Fellenius.

W_i - Conocida en magnitud y dirección

N_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

F_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

Cálculo de Momentos:

$$M_R = \sum R.FI = R \sum (C_i \cdot l_i + N_i \cdot \tan \phi)$$

$$N_i = W_i \cdot \cos \theta_i$$

$$M_R = R \sum (C_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)$$

$$M_m = \sum d_i \cdot W_i = R \sum W_i \cdot \sin \theta_i$$

$$F.S. = \frac{M_R}{M_m} = \frac{\sum (C_i \cdot l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i}$$

Observaciones a esta ecuación:

1) Para facilitar los cálculos y poderlos tabular se sustituye:

$$l_i = b / \cos \theta$$

2) El momento resistente depende de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y se desarrolla en la base de las dovelas y tiene siempre dirección contraria al movimiento, la suma que se hace es aritmética.

3) En cuanto al momento motor, existen dovelas que dan momentos estabilizantes y desestabilizantes, por lo tanto la suma es algebraica.

4) Se aconseja tomar de 8 a 12 dovelas como máximo, para obtener un resultado satisfactorio.

5) El F.S. calculado es para el círculo asumido y no es el del talud.

Casos que se pueden contemplar con este método:

a) Cuando hay varios estratos con diferentes resistencias al esfuerzo cortante.

- Se puede aplicar la misma expresión, pero teniendo en cuenta que:

C_i = Es la cohesión en la base de cada dovela.

ϕ_i = Es el ángulo de fricción interna en la base de cada dovela

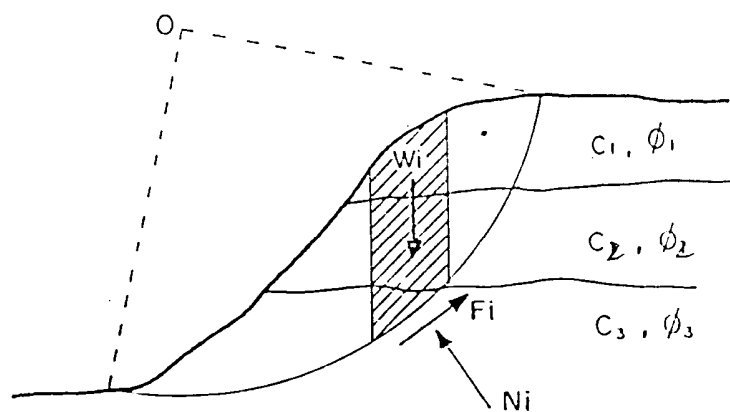


Figura 13. Talud con diferentes estratos

b) Si hay sobrecarga su efecto se debe incluir sobre las dovelas en las cuales actúa y puede haber sobrecargas estabilizantes y desestabilizantes.

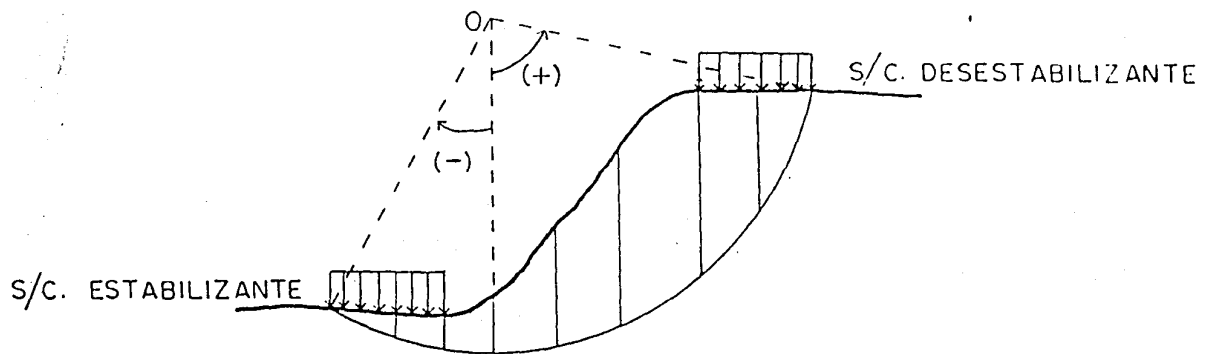


Figura 14. Talud con cargas externas.

c) Si el talud está parcialmente sumergido y experimenta flujo interno de agua, se puede aplicar este método.

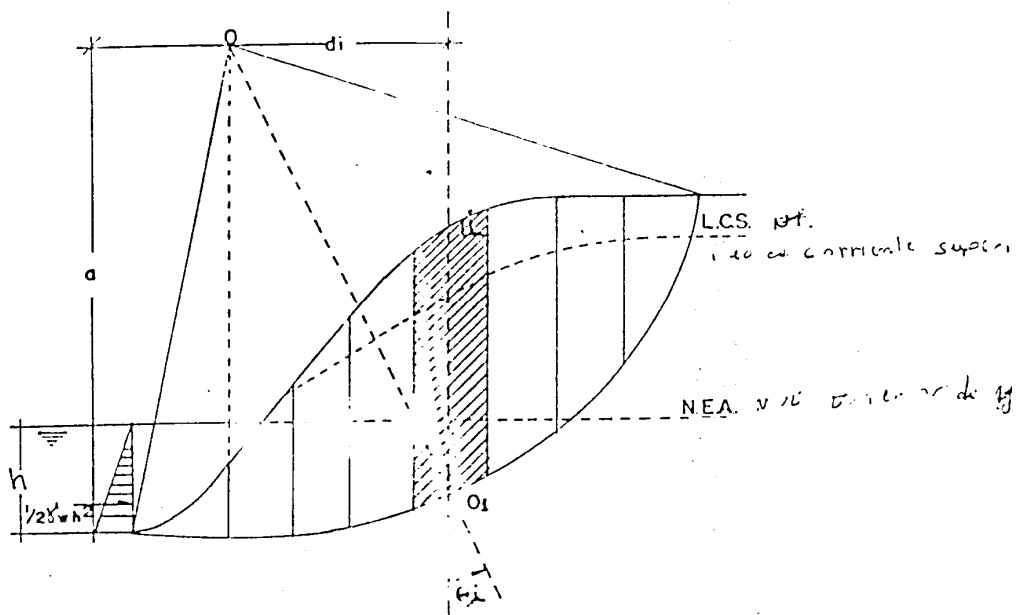


Figura 15. Talud parcialmente sumergido.

Nuevamente haciendo un análisis de las fuerzas que actúan en una dovela típica y con base en la suposición de Fellenius el cual asume que las fuerzas en las caras laterales son nulas, se tienen las siguientes fuerzas que deben considerarse según Fellenius

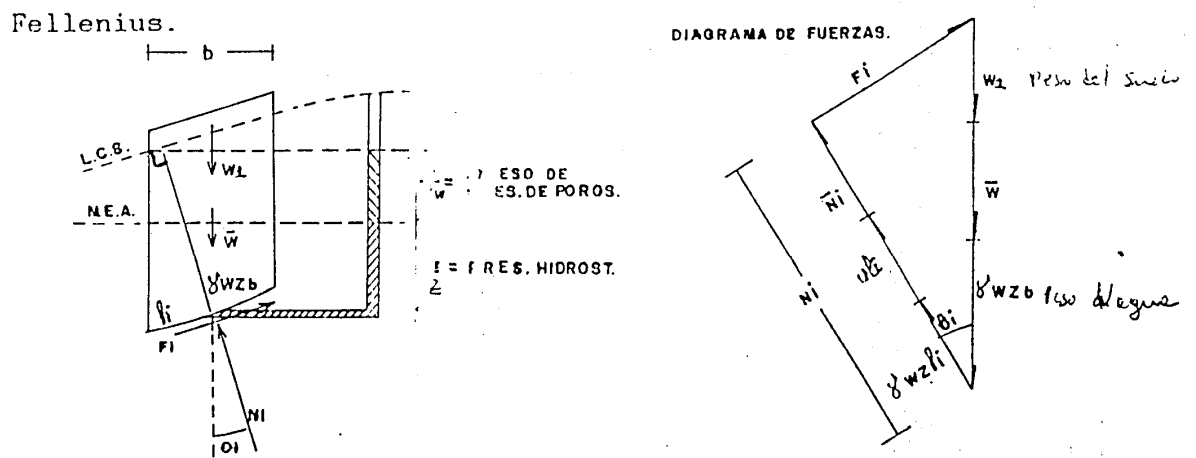


Figura 16. Fuerzas actuantes en talud parcialmente sumergido.

Donde:

W_i = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A., se calcula con γ

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A., se calcula con

$$\gamma = \gamma - \gamma_w$$

$\gamma_w Z_b$ = Peso del agua de la parte de la dovela que está por debajo del N.E.A.

μ = Exceso de presión de poros. Se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Cálculo del momento resistente

Este momento depende de la resistencia que se desarrolla en la base de la dovela.

Puede ser en esfuerzos efectivos.

$$F_i = C_i l_i + \bar{N}_i \tan \phi$$

Según el polígono de fuerzas

$$\bar{N}_i = (W_i + \bar{W} \cos \theta_i - \mu l_i)$$

El momento resistente

$$M_R = R \sum (c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi)$$

Cálculo del momento motor

$$M_m = R \sum (W_1 + W) \text{Sen} \theta_i$$

$$F.S. = \frac{\sum c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi}{\sum (W_1 + \bar{W}) \text{Sen} \theta_i}$$

1.9.1.3. Método de Bishop

Para superficie de falla circular, se siguen los mismos pasos del método de Fellenius.

Este método supone que las fuerzas que actúan en las caras laterales de una dovela, tienen una resultante nula en la dirección vertical o sea que

$\sum (V_n - V_{n-1}) = 0$, con lo cual elimina correctamente las fuerzas E_i , en general mucho más importante que las fuerzas V_i .

Fuerzas que actúan en
en una dovela.

Fuerzas que actúan en una dovela
según Bishop modificado.

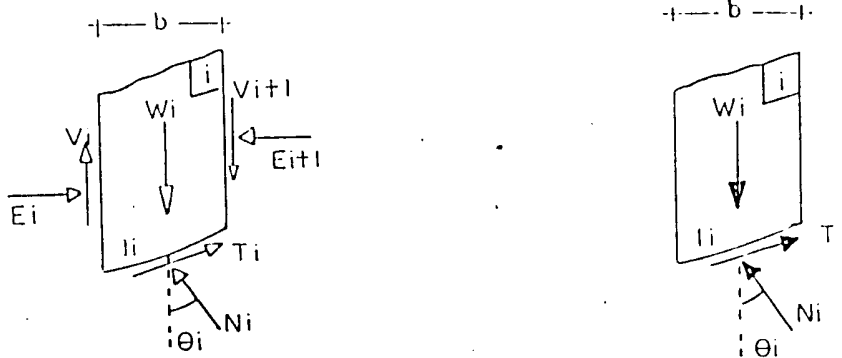


Figura 17. Fuerzas actuantes según Bishop.

Donde:

W_i = Peso de la dovela

N_i = Fuerza normal a la base de la dovela

T_i = Fuerza resistente que está actuando en el momento del análisis.

$$T_i = \frac{T}{F.S.} T$$

Para el equilibrio de la masa se debe cumplir que:

$$\Sigma F_V = 0$$

$$\Sigma M_o = 0$$

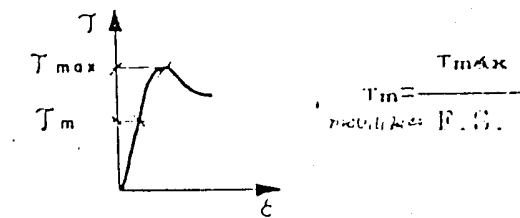


Figura 18. Gráfica de esfuerzos.

Después de hacer el equilibrio de fuerzas y de momentos se llega a la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / (\cos\theta_i + \text{sen}\theta_i * \frac{\tan\theta}{F.S.})}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Pero: $M\theta_i = \cos\theta_i + \text{sen}\theta_i \frac{\tan\theta}{F.S.}$

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / M\theta_i}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Donde:

C_i = Cohesión en la base de la dovela

b = Ancho de la dovela

W_i = Peso de la dovela

θ_i = Ángulo que forma la vertical y la normal en el centro de gravedad de la base de la dovela y puede ser (+) o (-)

$M\theta_i$ = Se calcula con una fórmula que se basa en θ_i y $\tan\phi/F.S.$

Nota: Esta ecuación da un F.S. para un cálculo tentativo, debe resolverse por un proceso interactivo, debido a que el F.S. está en ambos lados de la ecuación, pero su convergencia es rápida.

Cuando el talud está parcialmente sumergido y hay flujo de agua.

$$F.S. = \frac{\sum [c \cdot l + (W_1 + \bar{W} - ulb) \tan\phi] / M\theta_i}{\sum (W_1 + \bar{W}) \sin\theta_i}$$

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A. se calcula con γ .

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A. se calcula con $\gamma = \gamma - \gamma_w$

M = Exceso de presión de poros, se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Nota: Para medir el exceso de presión de poros, si no se ha trazado la Red de Flujo es buena aproximación medir μ en la vertical de cada dovela.

1.9.1.4. Comparación de los Diferentes Métodos

Es demasiada la cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, se considera el método de Morgenstern-Price el más exacto y complejo, considerándolo como referencia algunos autores concluyen que el método de Bishop presenta errores máximos del 7 %, siendo lo más normal del 2 %, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%, Esta aseveración fue documentada por Freddlund y Krahn (1977), otros autores concluyen que el método de Fellenius puede originar graves errores, hasta de un 40 %. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de F.S.

Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos y más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú.

En la práctica, el método de Morgenstern-Price resulta mucho más laborioso en su aplicación, por lo que su utilización se ve relegada a casos muy especiales o a temas relativos a la comparación de otros más simplificados.

1.10. OBRAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Las obras para estabilizar taludes se pueden dividir en dos grandes grupos, por un lado los métodos de protección, y por otro los de estabilización o refuerzo.

La principal diferencia entre ambos se centra en que los primeros tratan de evitar que se desarrollen posibles fenómenos de alteración en la zona del talud, lo que puede dar lugar a inestabilidades; mientras que los métodos de refuerzo o estabilización se caracterizan por actuar de forma activa en el caso que se produzcan dichos fenómenos.

En la actualidad existen variados métodos para estabilizar los taludes, estos métodos dependen generalmente del tipo de terreno.

1.10.1. Descripción de Diversas Obras de Estabilidad de Taludes en Carreteras

Existen diversas formas de estabilizar los taludes, siendo las más comunes:

- ▶ **Remodelado geométrico de los taludes.-** Este método de estabilización se refiere al cambio de la forma del talud dando una mayor inclinación, es decir realizando una descarga de los taludes, esto se puede llevar a cabo mediante:

⇒ Descabezamiento de un talud.- Al quitar peso de la parte superior del talud.

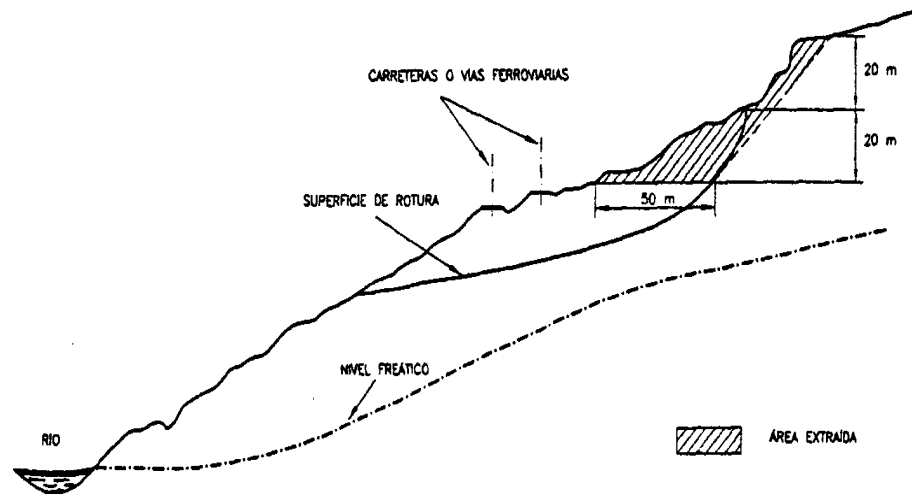


Figura 19. Descabezamiento de un talud

- ⇒ Retiro de materiales inestables.- Retiro de todos los materiales inestables o potencialmente inestables.
- ⇒ Tendido o reperfilado de los taludes.- Tender los taludes (darles mayor inclinación).

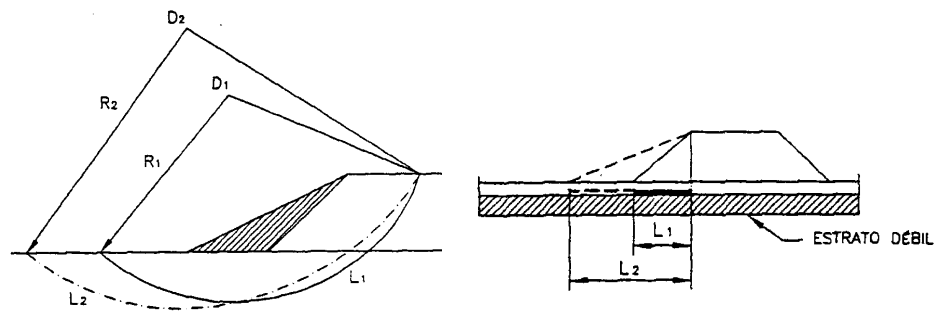


Figura 20. Tendido de Taludes

⇒ Banqueo de los taludes.- Modificar la morfología de un talud de gran altura en varios de alturas más pequeñas, por este motivo las bermas deben ser suficientemente anchas para evitar la caída de bloques de unos niveles a otros.

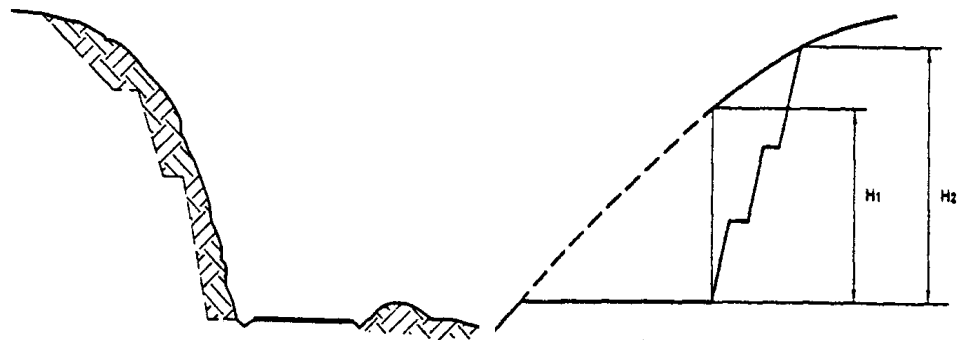


Figura 21. Banqueo de Taludes

► **Muros.**- Este método hace referencia a la utilización de muros de contención.

⇒ Muros de hormigón en masa o de gravedad.- Son los más antiguos y en ellos el propio peso actúa como estabilizador. Su relación altura/ancho (H/B) de estos muros suele estar comprendida entre 1,5 a 2, y se destaca su facilidad constructiva y reducido costo cuando son de poca altura.

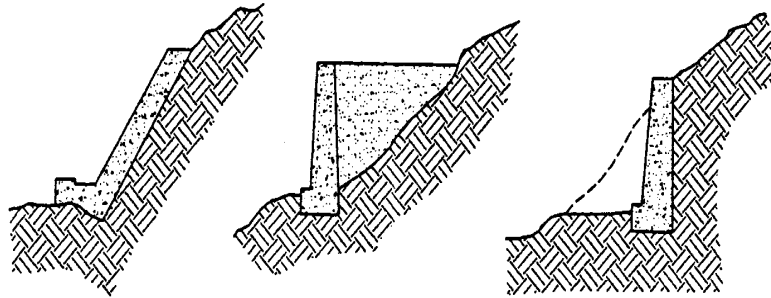


Figura 22. Muros de hormigón en masa

⇒ Muros de hormigón armado.- Son muros armados interiormente con redondos de acero y diseñados para soportar esfuerzos de tracción. Estos exigen menor cantidad de hormigón que los anteriores.

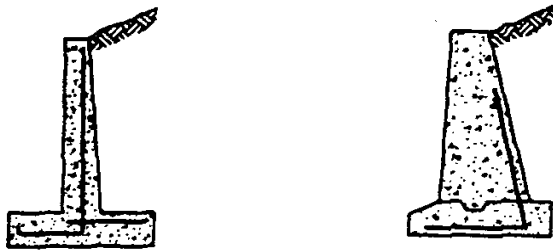


Figura 23. Muros de hormigón armado.

⇒ Muros de fábrica.- Son muros de piedras naturales ejecutados de forma natural, también se pueden utilizar ladrillos o bloques de hormigón.

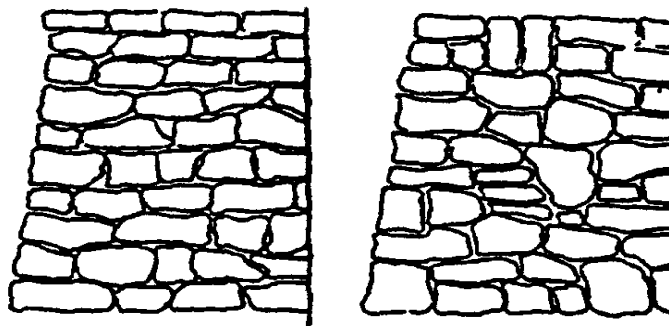


Figura 24. Muros de fábrica.

⇒ Muros Jaula.- Este tipo de muros es muy utilizado en países como Australia, Estados Unidos, Gran Bretaña, Nueva Zelanda.

Básicamente, son estructuras compuestas por cajas de madera que forman un entramado o jaula y que posteriormente se rellenan con materiales granulares incrementando así la resistencia del talud. Este tipo de muros actúan como los muros de gravedad aprovechando el propio peso de las jaulas rellenas.

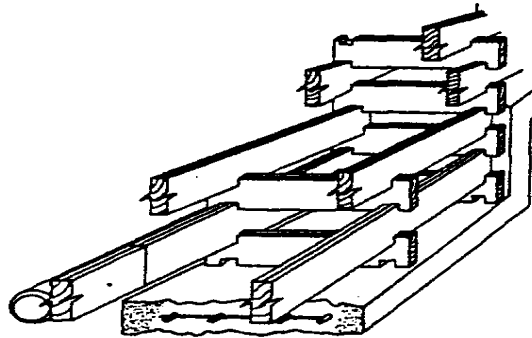


Figura 25. Muros jaula.

⇒ Muros de escollera.- El enchado consiste en la colocación de bloques de piedra natural sana compacta y resistente tales como caliza, granito, gabros, cuarcitas, etc. Con un peso específico normalmente superior a 2 Tn/m^3 y una resistencia a la compresión simple superior a los 70 Mpa. El peso de los bloques puede superar los 250 Kg.

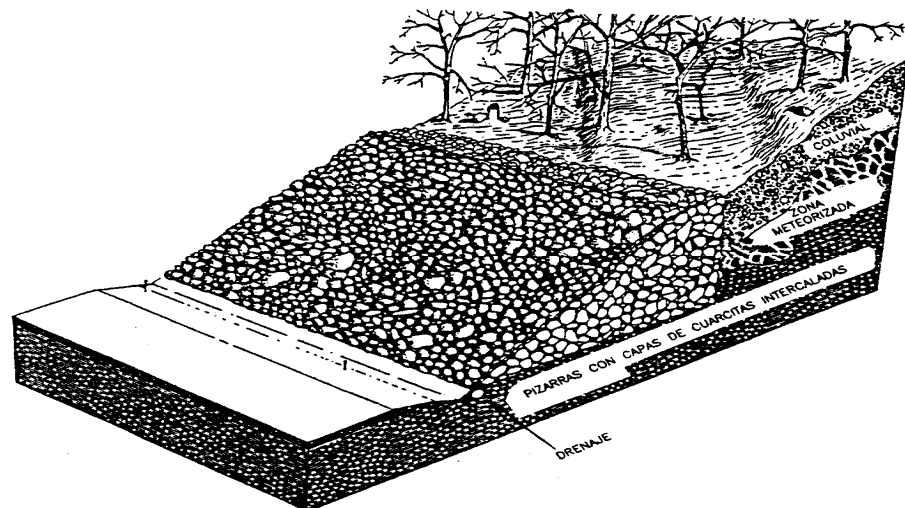


Figura 26. Muros de escollera.

⇒ Muros de neumáticos usados.- En la actualidad se está generando un gran problema de almacenamiento de cierto tipo de residuos, entre los cuales se encuentran los derivados del parque automovilístico. En diversos países industrializados, como Estados Unidos, este problema ha generado diversas controversias sobre el almacenamiento de neumáticos usados. Si se suma este punto al alto costo de los materiales de construcción, se ha llegado a la conclusión de que los neumáticos usados podrían ser reutilizados para la construcción de muros de contención.

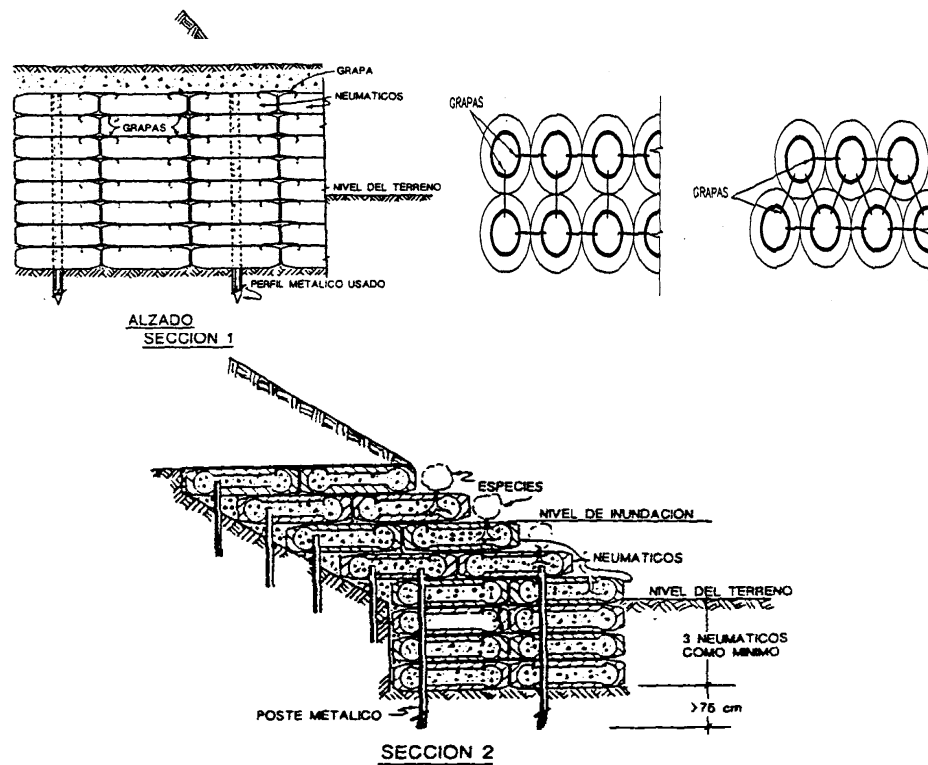


Figura 27 Muros de neumáticos usados

⇒ Muros de tierra armada.- Son muros construidos mediante tongadas de materiales de relleno, colocados entre éstos elementos tales como bandas metálicas, materiales plásticos, elementos prefabricados de hormigón o geotextiles, reforzando el muro y proporcionando, mediante el rozamiento entre el suelo y los diferentes elementos estructurales, estabilidad al conjunto.

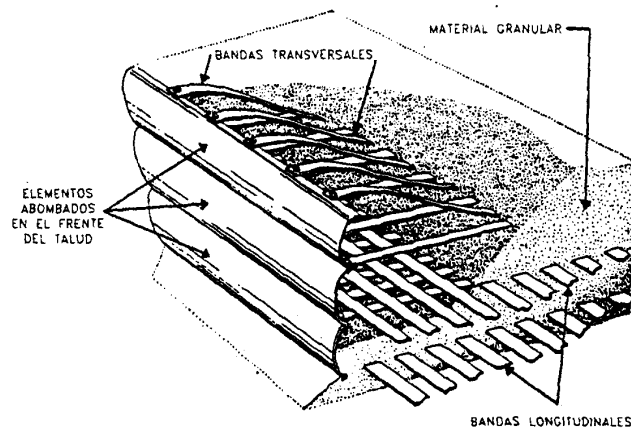
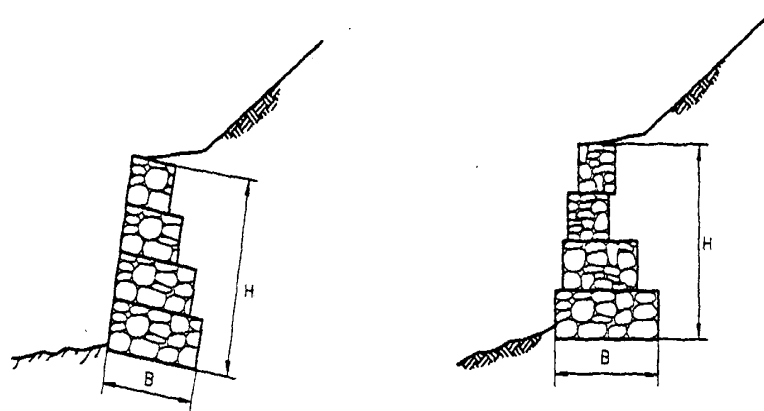


Figura 28. Muros de tierra armada.

⇒ Muros de gaviones.- Un gavión consiste en una estructura paralelepípedica elaborada con mallas de alambre galvanizado de triple torsión y rellenas con la piedras.



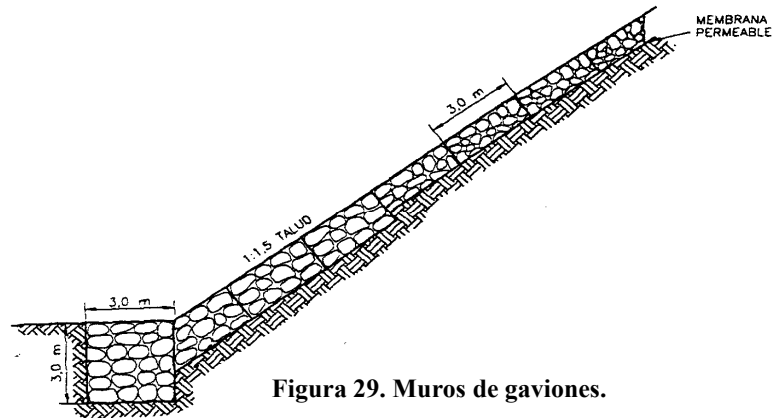


Figura 29. Muros de gaviones.

- ▶ **Refuerzos.-** Los sistemas de refuerzo son cada vez más utilizados en aquellas situaciones en las que no existe la posibilidad de utilizar contrafuertes bien por problemas de espacio para instalar un muro de contención o por que existen dificultades para realizar la expropiación de los terrenos afectados por las obras.

⇒ Reticulado de micropilotes.- Los micropilotes son estructuras o elementos de pequeño diámetro (75 – 250 mm.), compuestos de acero y mortero. Para el acero de armadura se puede utilizar tubos, perfiles laminados o redondos.

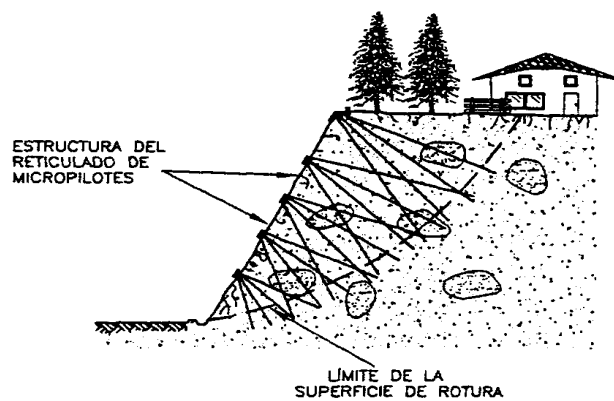


Figura 30. Reticulado de micropilotes.

⇒ Anclajes y bulones.- Los anclajes en suelos consisten en unos cables colocados dentro de taladros y pensionados después de que ha sido inyectado el hormigón. En el caso de excavaciones poco profundas, los anclajes en suelos trabajan más como elementos estructurales de sujeción. Por ejemplo, se pueden utilizar para sujetar determinados tipos de pantallas. También se puede usar para estabilizar taludes y para aumentar la resistencia de un suelo ya consolidado.

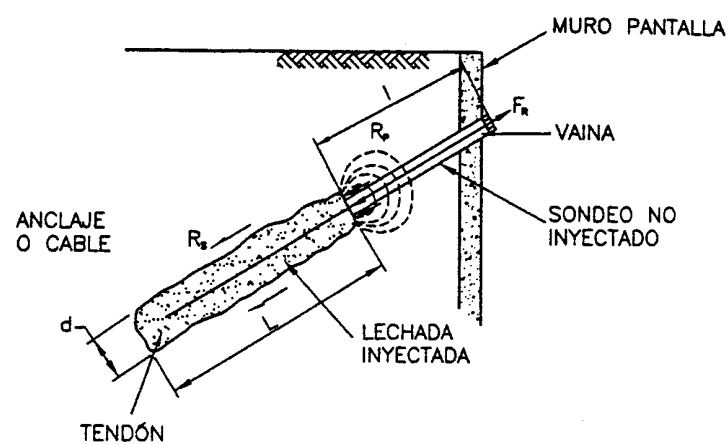


Figura 31. Anclajes y bulones

⇒ Columnas de grava.- Se utilizan para estabilizar o prevenir deslizamientos. Este método incrementa la resistencia al cizallamiento de un suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial. Reemplazando o desplazando el material in situ con varias series de columnas rellenas con gravas de gran diámetro. Adicionalmente, las columnas de grava actúan como un drenaje profundo muy efectivo.

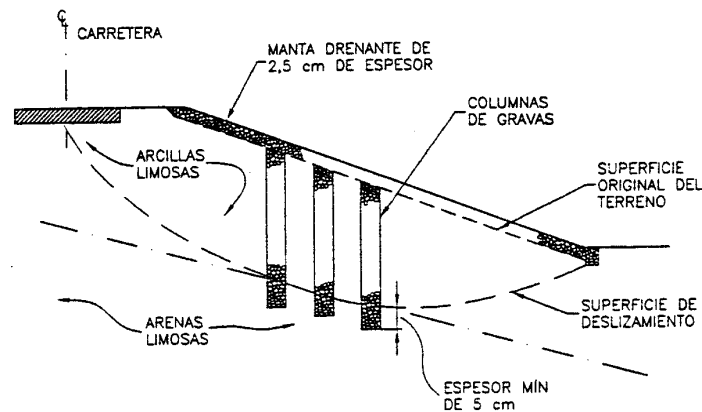


Figura 32. Columnas de grava.

- ⇒ Pilotes.- Los pilotes o pasadores son elementos de cimentación de gran longitud con respecto a su sección transversal que se empotran en una cavidad previamente excavada en el terreno. Antiguamente los pilotes que se usaban eran de madera, pero en la actualidad los únicos pilotes que se utilizan son principalmente de hormigón, aunque se puede utilizar también pasadores metálicos. Existen pilotes prefabricados y hormigonados in situ.
- ⇒ Mallas y redes metálicas.- La fijación de mallas y redes metálicas a la superficie de los taludes inmoviliza o amortigua el deslizamiento de materiales procedentes de la descomposición del sustrato y contribuye a la consolidación definitiva de dicho talud, favoreciendo a veces la colonización vegetal.

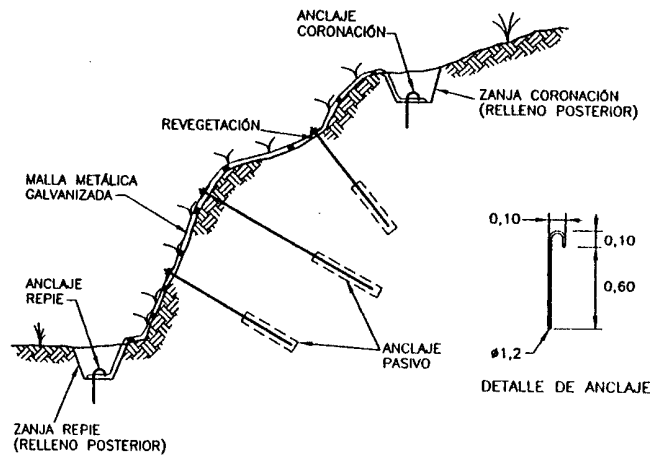


Figura 33. Mallas y redes metálicas.

► **Tratamientos del terreno.-** En muchas ocasiones, para estabilizar taludes, los métodos anteriormente expuestos no son lo suficientemente efectivos en suelos cohesivos, que tienen permeabilidad baja o muy baja, en estas situaciones, se deben considerar los siguientes métodos de tratamiento del terreno.

⇒ Tratamientos químicos.- La utilización de elementos químicos para el tratamiento de laderas o taludes inestables es una posibilidad que presenta diversos atractivos. Los tratamientos químicos más utilizados en la estabilización de laderas han sido las inyecciones de cementos pórtland, cloruros cálcicos, inyecciones de cal y las cenizas. Sin embargo, el gran problema a la hora de utilizar cualquiera de estos elementos químicos ha sido el conseguir un método adecuado para realizar las inyecciones en las zonas de inestabilidad.

⇒ Inyecciones de cal.- Las inyecciones de emulsiones de cal o de cal y cenizas volantes se emplean mucho en los Estados Unidos para el tratamiento de suelos arcillosos expansivos y limosos. Para lograr una emulsión acuosa espesa con cal y que sea fácilmente bombeable, se suele mezclar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2), con agua limpia, de forma que exista en dicha

emulsión una concentración máxima del 40 % en sólidos. Con el fin de inyectar la emulsión en el terreno se deben emplear equipos adecuados. La emulsión al ser inyectada en el suelo sigue las zonas de debilidad, planos de estratificación, fisuras naturales, etc.

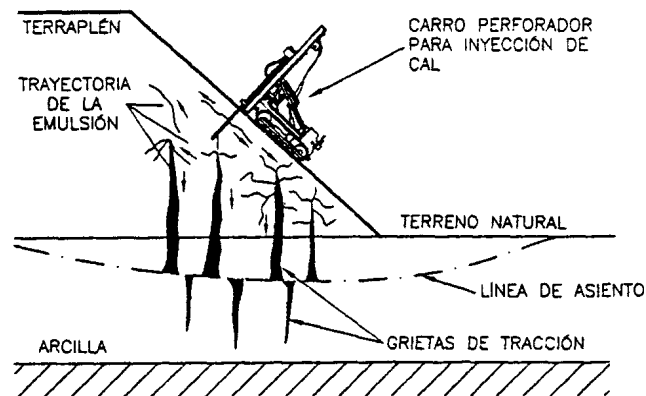


Figura 34. Inyecciones de cal

- ⇒ Columnas de cal.- Las columnas de cal fueron utilizadas por primera vez por los ingenieros Suecos. Las columnas de cal se construyen in situ mezclando cal viva con el terreno mediante el empleo de un tornillo sin fin (Auger). Este penetra en el subsuelo hasta una profundidad por debajo de la superficie deslizante y en el hueco generado es donde se inyecta la lechada de cal.
- ⇒ Tratamientos térmicos.- Los tratamientos de alta temperatura secan los materiales arcillosos, provocando el pegado de las partículas y como consecuencia se incrementa la estabilidad del terreno.

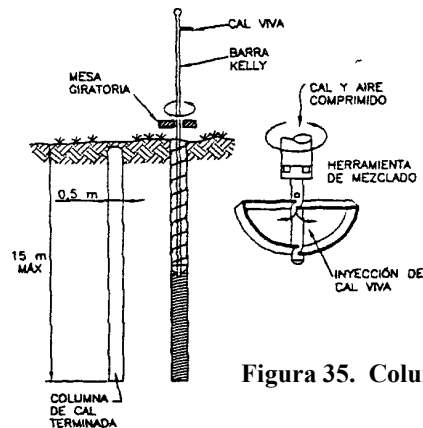


Figura 35. Columnas de cal

⇒ Pilotes de cal.- Este sistema ha sido empleado en diversos países desde los años 60 con el fin de mejorar la estabilidad de suelos saturados. Los pilotes se forman perforando unos barrenos en los que se inyectará y compactará la cal.

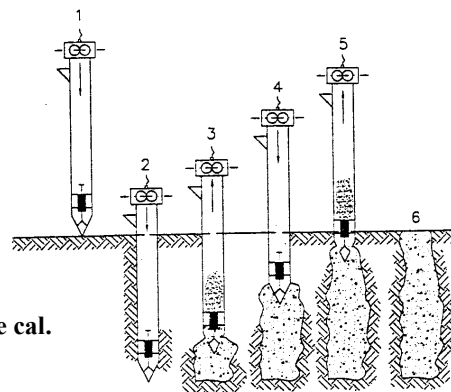


Figura 36. Pilotes de cal.

⇒ Tratamientos eléctricos.- Otra técnica que incrementa la resistencia de los suelos es la denominada como electroósmosis. Las publicaciones clásicas sobre esta técnica fueron desarrolladas por Casagrande (1948, 1952, 1953), pero existen numerosos casos históricos recogidos en la literatura por Holtz (1989) en los que se ha utilizado la técnica de la electroósmosis para estabilizar los cimientos de diques; sin embargo, la aplicación clásica de la electroósmosis ha sido la estabilización de laderas inestables.

1.1. GENERALIDADES

Los deslizamientos, son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb-1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control.

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia, tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas.

El presente proyecto de tesis de grado intenta presentar una alternativa en el análisis de los fenómenos que ocasionan los deslizamientos.

Cuando el ingeniero va a construir vías terrestres se ve enfrentado a problemas de inestabilidad tanto en corte como en terraplenes. Ambos casos son esencialmente diferentes.

No es muy frecuente la falla de terraplenes, esto debido, posiblemente a que estas estructuras se construyen con materiales seleccionados en principio, la construcción se realiza bajo una norma las cuales han tenido un avance significativo en los últimos años y por lo tanto estas estructuras se considera homogéneas y presentan un comportamiento predecible.

En cambio los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes "In Situ" con toda le heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto la influencia del constructor es limitada.

De tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

En general la construcción de los terraplenes es una tarea rutinaria y no ofrece dificultad, sin embargo existen algunos casos que hacen muy crítica su construcción tales como:

1. Terraplenes en suelo blando.
2. Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.
3. Terraplenes en laderas inclinadas.
4. Accesos a puentes y pasos a desnivel.
5. Terraplenes sobre suelos licuables.
6. Terraplenes con riego de tubificación.

Los cortes en cambio por su heterogeneidad, presentan frecuentes problemas de estabilidad que con ciertos cuidados pueden ser superados, sin embargo algunos casos que exigen tratamientos especiales en su construcción, tales como:

1. Cortes de gran altura.
2. Cortes de laderas inestables.
3. Cortes sujetos a flujos de agua.
4. Cortes en suelos erosionables.

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de predicción de la estabilidad, con el objeto de tomar medidas preventivas y/o correctivas.

Para hacer el análisis de estabilidad de un talud es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej. Causas del movimiento, velocidad del movimiento.
2. Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Seleccionar el método para cálculo de la estabilidad del talud.
4. Correlacionar las observaciones del campo con los resultados del cálculo.

1.2. DEFINICIÓN DE TALUD

Es toda aquella superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente las masas de suelo de rocas, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución.

Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

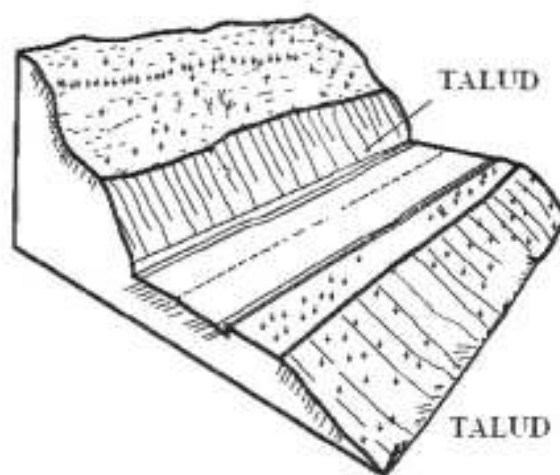


Figura 1. Talud en corte de una carretera.

1.3. NOMENCLATURA DE UN TALUD

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 2).

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

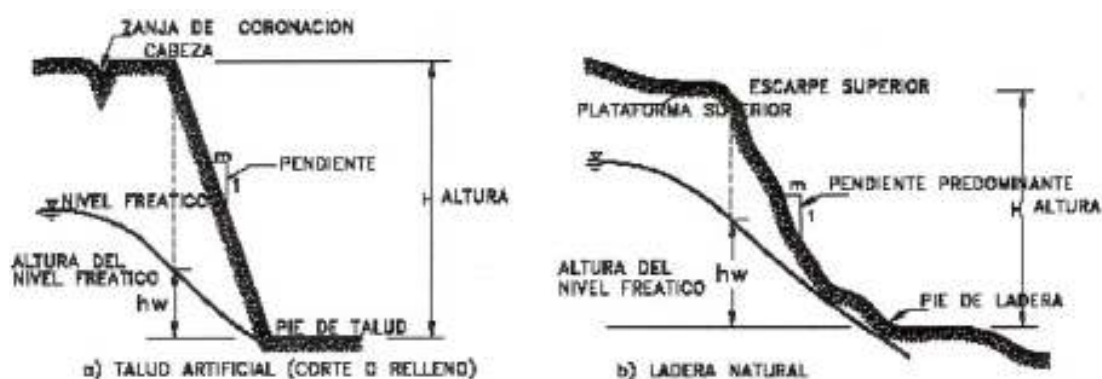


Figura 2. Nomenclatura de taludes y laderas.

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

1. **Altura.-** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
2. **Pie.-**Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
3. **Cabeza o escarpe.-** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
4. **Altura de nivel freático.-** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
5. **Pendiente.-**Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación mil, en la cual “m” es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo:

Pendiente: 450, 100%, o IR: **IV**. Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

6. **Base firme.-** La base firme es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento

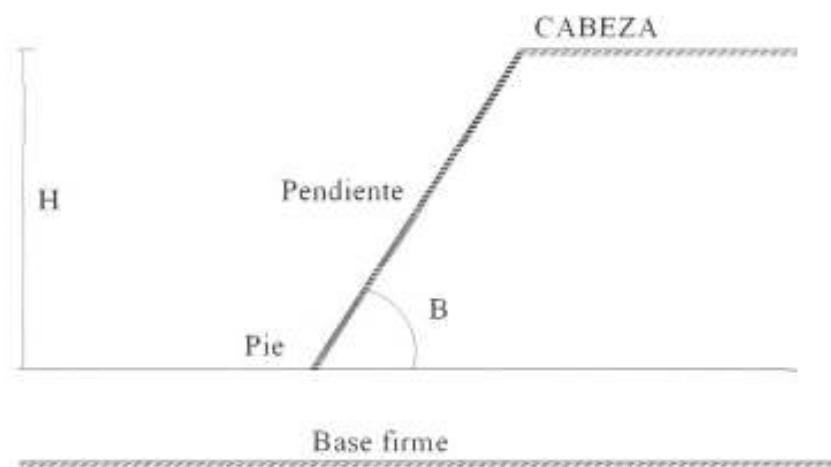


Figura 3. Esquema de partes de un talud.

La inclinación (B) de un talud depende de:

1. Altura del talud.
2. Condiciones topográficas.
3. Estructuras geológicas.
4. Tipo de suelo o roca.
5. Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

La principal función de los taludes es la de garantizar en condiciones óptimas la transitabilidad de las carreteras, para la libre circulación vehicular, lo que implica que, en el talud no deben existir desprendimientos aislados o en bloque.

1.4. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LOS TALUDES

Los factores a tomar en cuenta para el diseño de los taludes en general son:

- Altura “H” desde el pie hasta la cresta talud.
- Ángulo que forma la cara del talud con la horizontal.
- Ángulo de fricción interno.
- Cohesión.
- Densidad del suelo del talud.
- Nivel freático.
- Cargas externas.
- Lluvias máximas.

1.5. TIPOS DE TALUDES

Los taludes se dividen en:

a. Taludes naturales o laderas son los conformados por las laderas que se han formado sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

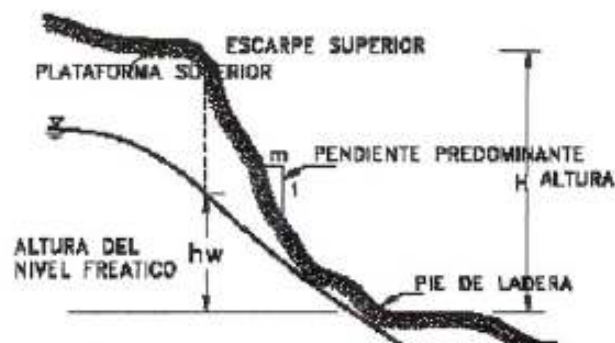


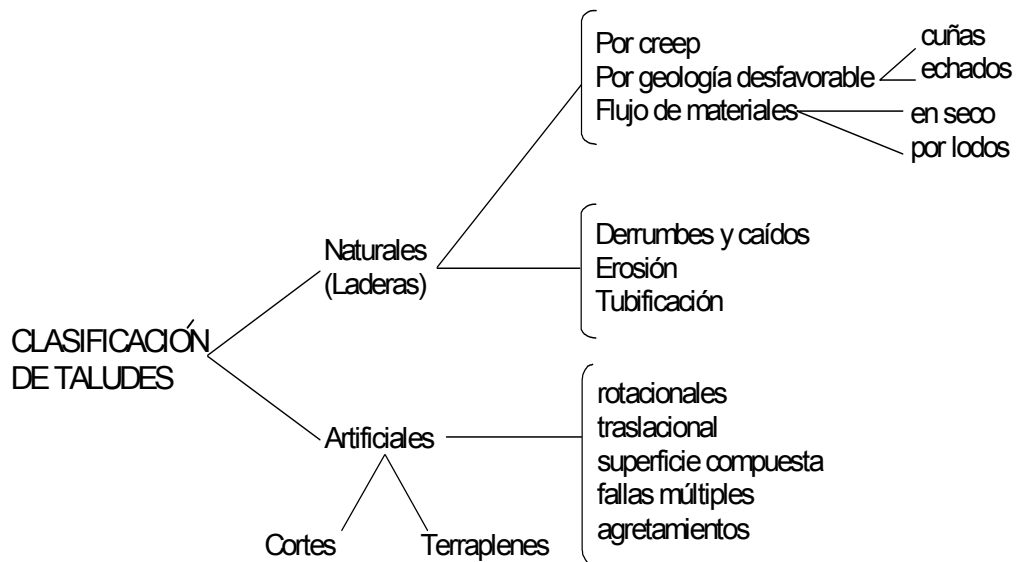
Figura 4. Talud natural.

b. **Taludes artificiales**, son estructuras diseñadas y construidas por el hombre y lo conforman los cortes y los terraplenes.



Figura 5. Talud artificial.

Por lo que podemos realizar la siguiente caracterización de cada uno de ellos, de acuerdo a lo siguiente:



Cuadro 1. Clasificación de taludes.

1.6. INTRODUCCIÓN A LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES DE CARRETERAS

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos.

Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

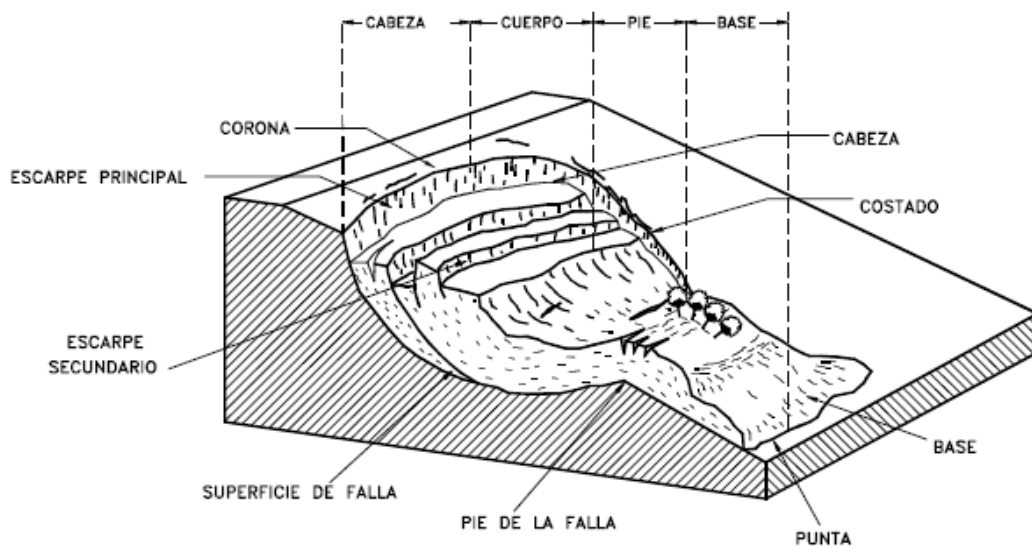


Figura 6. Deslizamiento o movimiento en masa típico.

En la Figura 6 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

1. **Escarpe principal.**- Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
2. **Escarpe secundario.**- Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

- 3. Cabeza.-** Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 4. Cima.-** El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- 5. Corona.-** El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- 6. Superficie de falla.-** Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- 7. Pie de la superficie de falla.-** La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- 8. Base.-** El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- 9. Punta o uña.-** El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- 10. Costado o flanco.-** Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- 11. Superficie original del terreno.-** La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.
- 12. Derecha e izquierda.-** Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

1.6.1. Dimensiones

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 7):

- 1. Ancho de la masa desplazada W_d .-** Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

- 2. Ancho de la superficie de falla W_r .**- Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .
- 3. Longitud de la masa deslizada L_d .**- Distancia mínima entre la punta y la cabeza.
- 4. Longitud de la superficie de falla L_r .**- Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.
- 5. Profundidad de la masa desplazada D_d .**- Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d .
- 6. Profundidad de la superficie de falla D_r .**- Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .
- 7. Longitud total L .**- Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
- 8. Longitud de la línea central L_{cl} .**- Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se dilata. El término “Factor de expansión” puede ser utilizado para describir este aumento en volumen, como un porcentaje del volumen antes del movimiento.

En algunas ocasiones como en el caso de roca el factor de expansión puede ser hasta de un 70%.

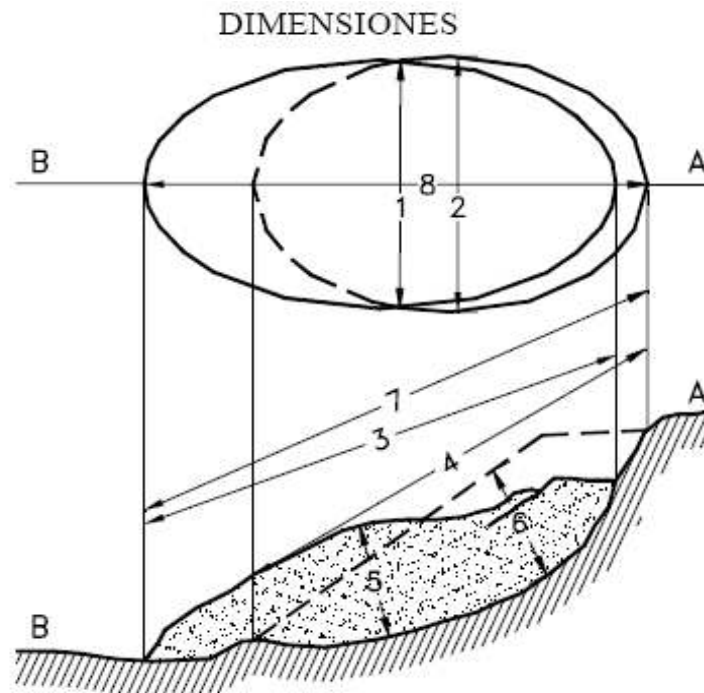


Figura 7. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG

1.7. FACTORES DE INESTABILIDAD EN LOS TALUDES DE CARRETERAS

Algunos de los factores de inestabilidad de los taludes de carreteras son:

A. Geología de la región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen uno de los mecanismos de modificación (Schuster and Krizek 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial del deslizamiento de taludes.

El relieve y la topografía están determinados por la geología del área, lo que permite estimar la susceptibilidad al movimiento en el nivel regional.

En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas, sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves. A continuación se incluye una breve descripción de las características de estos relieves.

a. Taludes escarpados: En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de derrumbe en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca, por ello, una fuerte lluvia o un corte al pie del talud pueden activar el deslizamiento de la masa suprayacente.

b. Áreas de concentración de drenaje y filtración: Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Es probable que ocurran filtraciones con el subsecuente deslizamiento en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada. Es importante reconocer el peligro potencial de las áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas.

c. Áreas de concentración de fracturas: El movimiento de taludes puede estar estructuralmente condicionado por superficies débiles tales como fallas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales que pueden actuar independientemente una de la otra.

Por ello, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo sino como una serie de bloques individuales; estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación, lo cual debilita los bloques y reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, se debe buscar cuidadosamente las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando éstas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques que lo hacen más inestable.

B. Topografía y estabilidad

Los mapas topográficos representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos y, algunas veces, se puede identificar en ellos grandes áreas de deslizamiento. En los mapas topográficos, la escala y el intervalo de las curvas de nivel facilitan la identificación de los deslizamientos. Esta identificación se puede llevar a cabo mediante:

a. Características topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja.

b. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.

c. Movimientos menores o irregularidades en zonas de pendientes empinadas, acantilados, bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

La identificación de deslizamientos en mapas topográficos se verá ayudada por la escala y el intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

C. Efecto de la resistencia del suelo y la pendiente del talud

El suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera se llama también condición drenada o a largo plazo y la segunda, condición no drenada o a corto plazo.

D. Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de los taludes ya que influye en la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, generalmente no saturados, el efecto acumulativo puede llegar a saturar el terreno y activar un deslizamiento.

Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a) **El ciclo climático** en un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual versus baja precipitación anual
- b) **La acumulación de pluviosidad** en un año determinado en relación con la acumulación normal.
- c) **Intensidad** de una tormenta específica.

Guidicini e Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación con la pluviosidad y establecieron el coeficiente del ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente del ciclo fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil, la cual presenta un clima tropical caracterizado por una estación seca de junio hasta agosto y una estación húmeda desde enero hasta marzo.

Los resultados del estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno que eleva el nivel freático, por lo tanto, una tormenta durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda tendría un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad al final de la estación húmeda.

E. Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento. La erosión por agentes humanos incluye cualquier actividad que permite un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección, como la tala de árboles u otro tipo de vegetación que ayuda a fijar el suelo y mejorar la estabilidad del talud. La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, incrementa la incidencia de taludes inestables y puede resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión que en los lagos o embalses incrementan la turbidez de las aguas y crean un peligro para la vida acuática, contaminan el agua potable y reducen la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y cascajo. En taludes, la protección consiste en:

- a) **Sembrar vegetación** de rápido crecimiento además de instalar un sistema de control del drenaje superficial.
- b) **Instalar fajinas** en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas.
- c) **Sellar las grietas superficiales** con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración, lo cual reduce la erosión.

F. Licuefacción debido a acciones sísmicas

La mayoría de las fallas de los taludes durante sismos se debe al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos, sin embargo, también se han observado fallas en suelos cohesivos durante algunos eventos sísmicos de gran magnitud.

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas, la cual puede ser activada por la repetida aplicación de pequeños incrementos o decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La pérdida de resistencia es de tal magnitud que momentáneamente el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado y se originan grandes deformaciones.

Los fenómenos de licuefacción se han observado generalmente en depósitos aluviales recientes compuestos por granulares, como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos.

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son:

1. **La granulometría** (tamaño, gradación y forma de granos).
2. **La densidad relativa** del depósito.

Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas que contienen menos de 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tienen la tendencia a depositarse de manera suelta y presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno.

1.7.1. SUPERFICIES PREFERENCIALES DE FALLA

Llamamos falla a la ruptura de un estrato rocoso debido a un esfuerzo en la que se puede observar un desplazamiento. Si no hay desplazamiento decimos que hay una diaclasa, y si no atraviesa la roca decimos que es una fisura. Si el desplazamiento no consigue romper los estratos pero hay una acentuación significativa y brusca del buzamiento de los estratos, estirados y adelgazados, se llama flexión.

Las superficies de falla de un talud son aquellas zonas dentro del talud que delimita la superficie probable de rotura o deslizamiento, la cual se encuentra relacionada con las condiciones geotécnicas del talud, de allí la importancia del conocimiento del tipo de material, formación y estructura geológica y propiedades mecánicas del talud, entre otros, así como, los factores externos topográficos, sísmicos y climatológicos, complementados con las condiciones de aguas superficiales y subterráneas, que permitirán analizar el comportamiento de un talud (factores de seguridad) y definir las obras necesarias para su estabilización.

El movimiento se hace según una superficie de falla que no es siempre un plano de falla. La superficie es, algunas veces vertical y generalmente inclinada presentando una cierta pendiente. En este último caso, el labio superior, reposando sobre el plano de falla, es el techo el labio inferior es el muro.

La intersección de la superficie de falla con el terreno (o, si el relieve es fuerte, por un plano horizontal) es la traza, la línea de falla. La falla puede ser, con relación a la dirección (de las capas) longitudinales, direccionales, transversal, u oblicua.

1.7.1.1. Discontinuidades Heredadas

Las juntas, fracturas, foliaciones, planos de estratificación, laminaciones, diques, orientaciones de los minerales y demás discontinuidades de la roca original; se convierten en discontinuidades dentro de la masa de suelo residual que actúan generalmente como superficies de debilidad por su baja resistencia, relacionadas no sólo por la fractura en sí, sino también con la meteorización preferencial a lo largo de éstas, ya que actúan como conductos del agua y demás agentes meteorizantes, que facilitan no sólo el transporte y depósito de subproductos sino la formación de redes de presión de agua y de disipación de succión a lo largo de los planos de discontinuidad. Las juntas heredadas controlan, en la mayoría de los casos, el régimen del agua infiltrada después de una lluvia.

En la mayoría de los deslizamientos que ocurren en suelos residuales la superficie de falla coincide en áreas importantes con grupos de discontinuidades heredadas, las que algunas veces están rellenas de materiales débiles comúnmente arcillas que absorben agua, se expanden y se ablandan muy fácilmente; y es común que su existencia y significancia sólo se identifica después de que ha ocurrido una falla.

Observaciones del flujo de agua subterránea indican que el agua fluye a lo largo de rutas tales como las discontinuidades heredadas y conductos internos de erosión.

Las discontinuidades debidas a procesos de metamorfismo de las rocas , conocidos como pizarrosidad, esquistocidad, foliación etc. forman superficies generalmente paralelas de baja cohesión a través de las cuales los materiales se pueden partir fácilmente o producirse fenómenos de desmoronamiento y flujos secos de material desintegrado.

Muchos tipos de relleno diferente se pueden encontrar a lo largo de las discontinuidades pero generalmente se trata de materiales arcillosos y su espesor

puede variar desde capas microscópicas hasta centímetros. Este relleno puede provenir de materiales lavados de capas superiores o de meteorización en el sitio.

La detección y evaluación de los efectos de las estructuras heredadas es de primordial importancia en los estudios geotécnicos para casos de estabilidad de taludes, pero esta es muy difícil con el sistema de perforaciones con taladro. Irfan y Woods(1988) recomiendan hacer excavaciones de gran tamaño y reportan zanjas de hasta 20 metros de profundidad para establecer el "pattern" de discontinuidades heredadas; y estas excavaciones pueden programarse como parte de los cortes definitivos. Adicionalmente se recomienda el mapeo de las discontinuidades a medida que se avanza con los cortes para detectar la necesidad de modificar el diseño.

1.7.1.2. Espejos de Falla

Los espejos de falla son discontinuidades lisas, que pueden ser el producto de movimientos tectónicos en la roca original, los cuales se preservan en el suelo residual; o pueden ser causados también por movimientos diferenciales ocurridos dentro de suelos areno-limosos por acción del proceso de meteorización. Es difícil diferenciar entre superficies antiguas o recientes y en ocasiones se puede observar más de una dirección de estriado en la misma discontinuidad (Irfan y Woods- 1988).

La resistencia al corte a lo largo de los espejos de falla es particularmente baja y muchos deslizamientos son controlados por estas superficies de falla.

1.7.1.3. Zonas de Cambio de Permeabilidad

Para empezar diremos que la permeabilidad es el actor que mide la resistencia de los materiales al libre flujo del agua, y puede definir el régimen de aguas subterráneas, concentración de corrientes, etc.

Como su nombre lo indica son zonas en las que la permeabilidad cambia, la presión de poros elevada provoca deslizamientos y el flujo de agua, a través del suelo, puede originar tubificación y arrastre de partículas sólidas, es por este motivo que el cambio de permeabilidad en un talud es tan importante.

1.7.2. IMPORTANCIA DE LA COHESIÓN Y EL ÁNGULO DE ROZAMIENTO EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

A. Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

Coeficiente de rozamiento = $\tan \Theta$

El ángulo de fricción depende de varios factores (Bilz, 1995) entre ellos algunos de los más importantes son:

- a) Tamaño de los granos.
- b) Forma de los granos.
- c) Distribución de los tamaños de granos.
- d) Densidad.

B. Cohesión

La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo.

La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión.

En suelos eminentemente granulares en los que no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y se los denomina Suelos no Cohesivos.

C. Cohesión aparente

En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares, a este fenómeno se lo conoce como cohesión aparente. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.

1.7.2.1. Suelos Cohesivos y No Cohesivos

Los suelos cohesivos poseen la propiedad de la atracción intermolecular, como ejemplo las arcillas.

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ninguna cementación, como la arena y la grava.

1.7.2.2. Suelos Arcillosos

Los suelos arcillosos son aquellos que es su conformación presentan gran cantidad de arcilla, éstos presentan características de cimentación, que depende de la cantidad de arcilla que presente el suelo en cuestión, los suelos arcillosos son muy buenos para la agricultura por la propiedad de almacenar agua, pero son muy malos para las obras civiles.

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm. y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico.

El tipo sílice se encuentra formado por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno. La unión entre partículas se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno.

El tipo alumínico está formado por un átomo de aluminio rodeado de seis átomos de oxígeno y de oxígeno e hidrógeno.

1.8. MODELOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc. Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al Ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente. Sin embargo, el mecanismo de falla en materiales residuales, donde aparece el suelo, la roca meteorizada y la roca sana, así como formaciones aluviales y coluviales no isotrópicas requieren de nuevos enfoques y del estudio de superficies de falla no simétricas. En los últimos años se han desarrollado algunos modelos de superficies de falla con forma no geométrica, pero se requiere todavía de un gran esfuerzo de investigación en este tema.

1.8.1. CONDICIONES DRENADAS Y NO DRENADAS

Las fallas de los taludes pueden ocurrir en condiciones drenadas o no drenadas. Si la inestabilidad es causada por cambios en la carga, tal como la remoción de materiales de la parte baja del talud o aumento de las cargas en la parte superior, en suelos de baja permeabilidad, éstos pueden no tener tiempo suficiente para drenar durante el tiempo en el cual ocurre el cambio de carga. En ese caso se dice que las condiciones son no drenadas.

Generalmente, los suelos tienen permeabilidades suficientes para disipar las presiones de poro en exceso y se comportan en condiciones drenadas.

Para tasas normales de carga, que equivalen a meses o semanas, suelos con permeabilidades mayores de 10^{-4} cm/seg., se pueden considerar drenadas y suelos con permeabilidades menores de 10^{-7} cm/seg., se consideran no drenadas.

Mientras las permeabilidades intermedias se consideran parcialmente drenadas.

Duncan (1996) recomienda que para los taludes en los cuales la causa de la falla es el aumento de la presión de poros debida a las lluvias, el problema debe analizarse como condición drenada.

Para determinar las condiciones de drenaje Duncan (1996) sugiere utilizar la siguiente expresión:

Donde:

$$T = \text{Factor adimensional.} \quad T = \frac{C_v t}{D^2}$$

C_v = Coeficiente de consolidación

t = Tiempo de drenaje

D = Longitud del camino de drenaje o distancia de salida del agua al cambio de presiones.

Si T es mayor de 3 la condición es drenada.

Si T es menor de 0.01 la condición es no drenada.

Si T está entre 0.01 y 3.0 ocurre drenaje parcial durante el tiempo de cambio de cargas.

En este caso deben analizarse ambas condiciones.

El caso drenado y el caso no drenado.

1.8.2. ANÁLISIS CON ESFUERZOS TOTALES O EFECTIVOS

Los problemas de estabilidad de taludes pueden analizarse suponiendo sistemas de esfuerzos totales o efectivos. En principio, siempre es posible analizar la estabilidad de un talud utilizando el método de presión efectiva, porque la resistencia del suelo es gobernada por las presiones efectivas tanto en la condición drenada, como en la condición no drenada. Pero en la práctica sin embargo es virtualmente imposible determinar con precisión cuales son los excesos de presión de poro que se van a generar por los cambios en las cargas (excavaciones, colocación de rellenos o cambios en el nivel de agua). Debido a esta razón no es posible desarrollar análisis precisos de estabilidad en estas condiciones, utilizando procedimientos de esfuerzos efectivos. Sin embargo, se puede trabajar todo el análisis utilizando presiones efectivas, sin que se requiera especificar los valores de los excesos de poro en las condiciones no drenadas.

1.8.3. RESISTENCIA AL CORTANTE

La resistencia al cortante para utilizar en los análisis puede ser medida de dos formas:

- a) En el laboratorio o en ensayos de campo, en tal forma que las cargas aplicadas, sean lo suficientemente lentas para que se produzca drenaje.
- b) En el laboratorio utilizando ensayos consolidados no drenados.

Las envolventes de falla determinadas usando estos dos métodos se han encontrado que son las mismas para todos los fines prácticos (Bishop y Bjerrum, 1960).

Estudios realizados por Skempton revelan que las resistencias drenadas pico de arcillas sobre consolidadas duras, son mayores en el laboratorio que las resistencias drenadas que pueden ser movilizadas en el campo en un período de tiempo.

Skempton recomienda realizar los ensayos remoldeando la arcilla en el laboratorio a un contenido de agua cercano al límite líquido, reconsolidándolo en el laboratorio y midiendo la resistencia en una condición normalmente consolidada. En los casos en los cuales ya ha ocurrido la falla del talud, se recomienda utilizar las resistencias residuales (Skempton, 1970, 1977, 1985).

Para suelos parcialmente saturados tales como arcillas compactadas o suelos arcillosos por encima del nivel freático, las resistencias no drenadas deben obtenerse utilizando ensayos no consolidados no drenados en muestras con el mismo grado de saturación que el suelo en el campo. La envolvente de falla para esos suelos generalmente, es curva y por lo tanto es importante utilizar el mismo rango de presiones de confinamiento en los ensayos de laboratorio que en el campo.

Para suelos que son completamente saturados, el ángulo de fricción para condiciones no drenadas es igual a cero. La resistencia no drenada para suelos saturados puede ser determinada de ensayos no consolidados no drenados.

1.8.4. PESOS UNITARIOS Y PRESIONES DE PORO

Los problemas de estabilidad de taludes pueden formularse correctamente en términos de esfuerzos totales, utilizando pesos unitarios totales y límites externos de presión de poros.

Los pesos unitarios totales son pesos húmedos por encima del nivel freático, y saturados por debajo del nivel freático. En el caso de que se utilicen pesos sumergidos, se debe ignorar la presencia de nivel freático.

Las condiciones de presión de poros son generalmente, obtenidas de las características de las aguas subterráneas y pueden especificarse para los análisis utilizando los siguientes métodos:

1. Superficie freática

Esta superficie o línea en dos direcciones se define como el nivel libre del agua subterránea.

En una superficie freática la presión de poros es calculada de acuerdo a las condiciones de estado de régimen permanente (Steady-state), de acuerdo al diagrama que se muestra en la figura. Este concepto se basa en la suposición de que todas las líneas equipotenciales sean ortogonales. Entonces, si la inclinación del segmento de superficie freática es θ y la distancia vertical entre el punto y la superficie freática es hw , entonces la presión de poros está dada por la expresión $u = \gamma w (hw \cos^2 \theta)$.

En el caso de líneas freáticas de gran pendiente, el cálculo anterior puede resultar sobre estimado y se requiere tener en cuenta que las líneas equipotenciales tienden a ser curvas.

2. Datos piezométricos

Es la especificación de presiones de poros en puntos discretos dentro del talud y la utilización de un esquema de interpolación para estimar las presiones de poro requeridas a cualquier punto. Las presiones piezométricas pueden determinarse mediante piezómetros, redes de flujo o soluciones numéricas, utilizando diferencias finitas o elementos finitos.

Aunque este sistema está disponible solamente en muy pocos de los programas de computador existentes, se recomienda por su confiabilidad para representar las condiciones reales en el campo (Chugh, 1981).

3. Relación de presión de poros

Este es un método muy simple y popular para normalizar el valor de la presión de poros en un talud de acuerdo a la definición:

Donde:
$$r_u = \frac{u}{\delta_v}$$

u = Presión de poros

δ_v = Esfuerzo total vertical del suelo a una profundidad z .

Este factor se implementa fácilmente, pero la mayor dificultad está asociada con la asignación de este parámetro a diferentes partes del talud. En ocasiones, el talud requiere de una extensiva subdivisión en regiones con diferentes valores de r_u .

4. Superficie piezométrica

Esta superficie se define para el análisis de una determinada superficie de falla. Debe tenerse claridad en que la superficie piezométrica no es la superficie freática y que el método de calcular la presión de poros es diferente para los dos casos.

En la superficie piezométrica, la presión de poros es la distancia vertical entre la superficie piezométrica indicada y el punto (figura 1.3).

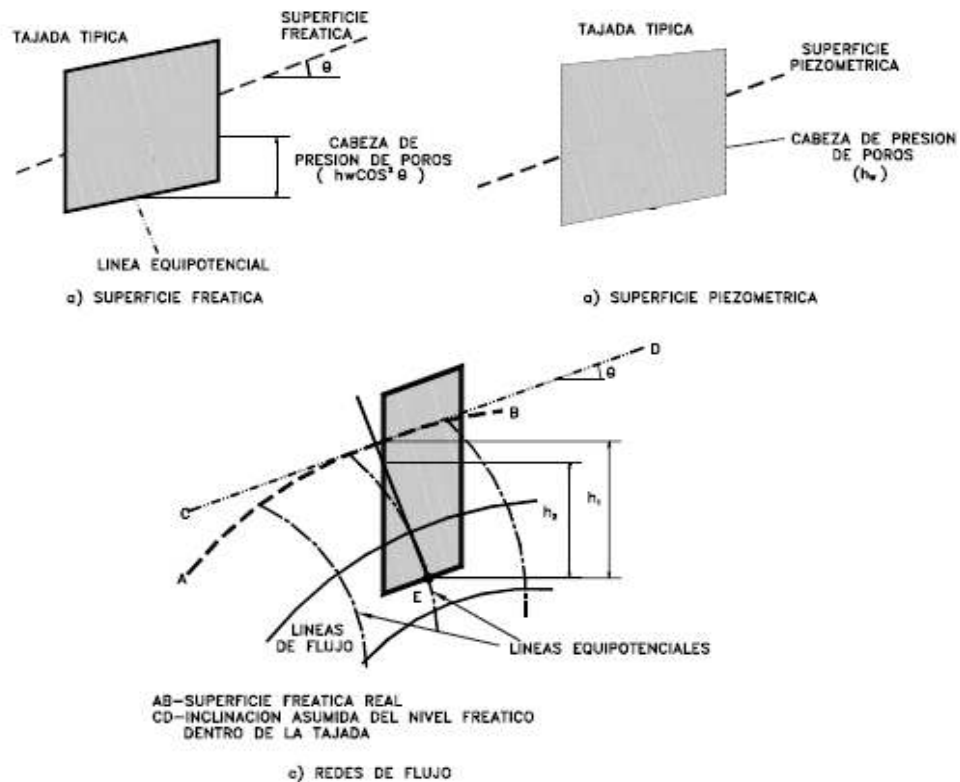


Figura 8. Presión de poros en las tajadas de análisis de estabilidad.

5. Presión de poros constante

Este procedimiento puede utilizarse si se desea especificar una presión de poros constante en una determinada capa de suelo. Este sistema puede utilizarse para analizar la estabilidad de rellenos colocados sobre suelos blandos, durante la construcción donde se generan presiones de poro, de acuerdo a la teoría de la Consolidación.

1.8.5. GRIETAS DE TENSIÓN EN LOS ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La existencia de grietas de tensión aumenta la tendencia de un suelo a fallar, la longitud de la superficie de falla a lo largo de la cual se genera resistencia es reducida y adicionalmente la grieta puede llenarse con agua, en el caso de lluvias.

La profundidad de las grietas de tensión puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión:

Donde:
$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Z_c = Profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

γ = Peso unitario del suelo

ϕ = Ángulo de fricción

Generalmente se recomienda la utilización de parámetros efectivos.

La presencia de grietas de tensión dificulta en forma considerable la confiabilidad de los análisis cuando no se tiene en cuenta este factor. Las grietas de tensión son muy importantes y profundas en cortes de taludes, donde existe un alivio de presiones de confinamiento al ejecutarse la excavación.

1.9. EQUILIBRIO LÍMITE Y FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe Software muy fácil de utilizar. Generalmente, los métodos son de iteración y cada uno de los métodos posee un cierto grado de precisión.

Método	Superficies de Falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De Fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado . U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla	De Fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Morgenster n y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficiente sísmico. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos Finitos	Cualquier forma de la superficie de falla	Analiza Esfuerzos y Deformacio nes	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral Logarítmi- ca	Espiral Logarítmi- ca	Momentos y Fuerzas	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.

Tabla. 1.

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

$$F.S. = \frac{\text{Resistencia.al.Corte}}{\text{Esfuerzo.al.Corte}}$$

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

$$F.S. = \frac{\text{Momento.Resistente}}{\text{Momento.Actuante}}$$

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

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie (Tabla 2.1.).

Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del Factor de Seguridad.

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

$$F.S. = \frac{\sum \text{Resistencias.al.Corte}}{\sum \text{Esfuerzos.al.Corte}}$$

1.9.1. MÉTODOS DE ANÁLISIS

El análisis de la estabilidad de un talud es un proceso de tanteos, con suposiciones de las condiciones más críticas que en un momento dado in pueden presentar.

En términos generales los pasos a seguir son:

1. Se supone una superficie de falla, la cual puede ser
 - El pie del talud
 - La baso del talud
 - El talud

Después de haber hecho esto se habrá determinado:

- Una masa deslizante
- Una superficie de deslizamiento

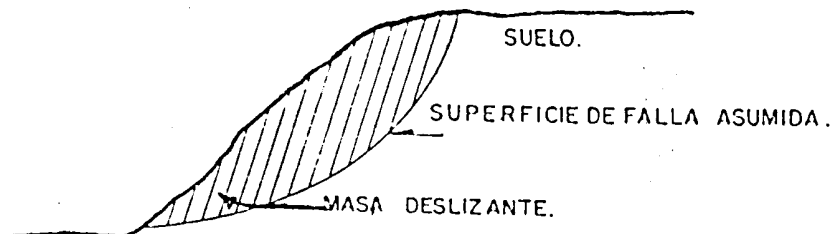


Figura 9. Determinación de la masa deslizante

Al haber definido la masa deslizante, se podrá calcular las fuerzas que producen el deslizamiento, llamadas también fuerzas motoras.

Al haber definido la superficie de falla se podrá calcular las fuerzas que se oponen al deslizamiento, llamadas también fuerzas resistentes.

2. Calcular los momentos:
 - Momentos resistentes
 - Momentos Motores o Deslizantes.
3. Calcular el factor de seguridad (F.S) para la superficie de falla dada
 - Si la falla es del tipo translacional, el F.S. resulta de comparar las fuerzas:

$$F. S. = \frac{\sum Fzas Resistentes}{\sum Fzas Deslizantes}.$$
 - Si la falla es del tipo rotacional, el F.S. resulta de comparar los momentos.

$$F.S. = \frac{\sum Mtos. Resistentes}{\sum Mtos. Deslizantes}$$

El F.S. hallado es para la superficie de falla, asumida y no necesariamente es el F.S. del talud.

Al repetir los pasos anteriores para otras superficies de falla, se obtendrá un F.S. mínimo el cual corresponde al del talud.

Significado de los factores de seguridad (sowers y sowers).

F.S.	Significado
Menor que 1	Inseguro
1.0 - 1.2	Seguridad dudosa
1.2 - 1.4	Satisfactorio para cortes y terraplenes, dudosa para presas
1.5	Seguro para presas

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

1.9.1.1. Método Sueco

Aplicable para suelos netamente cohesivos ($C \neq 0$, $\phi = 0$)

El F.S. calculado por éste método da valores entre 10 a 15% más bajos que otros métodos más exactos. Es empleado para casos de práctica común; debido a que es muy sencillo y en el caso de taludes en los cuales el riesgo no es grande.

Este método se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea independiente de los esfuerzos normales al plano de la falla ($T = C$), tales como las arcillas poco sobreconsolidadas y taludes después de construídos o en los casos de aplicación de nuevas cargas sobre él.

- Se elige una circunferencia que puede considerarse como posible círculo crítico.
- Se determinan las fuerzas actuantes y las resistentes.
- Se calculan los momentos.
- Por último se determina el factor de seguridad.

En la siguiente figura se indica los pasos a seguir:

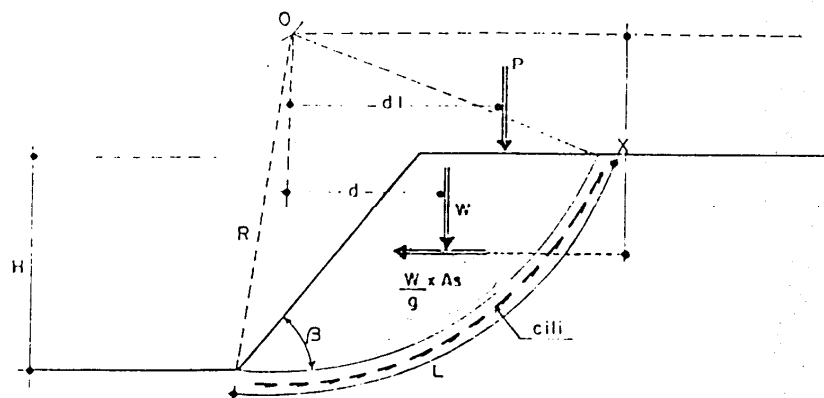


Figura 10. Fuerzas que actúan en el deslizamiento.

Cálculo de momentos actuantes o deslizantes:

$$M_m = W * d + p * d_1 + \frac{W}{g} * A_s + X$$

Cálculo de momentos resistentes:

$$M_r = R \quad C_i * L_i = R * C * L$$

Determinación del factor de seguridad (PS)

$$F.S. = M_r / M_m$$

1.9.1.2. Método Ordinario o de Fellenius

Es conveniente utilizar éste método cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es función de los esfuerzos normales o sea. : $T = C + \text{Ontan}\emptyset$

Consiste en:

1. Darse una superficie de falla circular
2. Dividir la zona de falla en una serie de franjas verticales o dovelas de cualquier espesor.
3. Determinar las fuerzas que actúan en cada dovela.
4. Calcular los momentos resistentes y los momentos motores que actúan a lo largo de la superficie de falla.
5. Calcular el F.S.

Ejemplo: Para un suelo cuya resistencia está dada por la siguiente expresión: $T = C + \text{Ontan}\emptyset$ (o sea con esfuerzos totales) sin N.F.

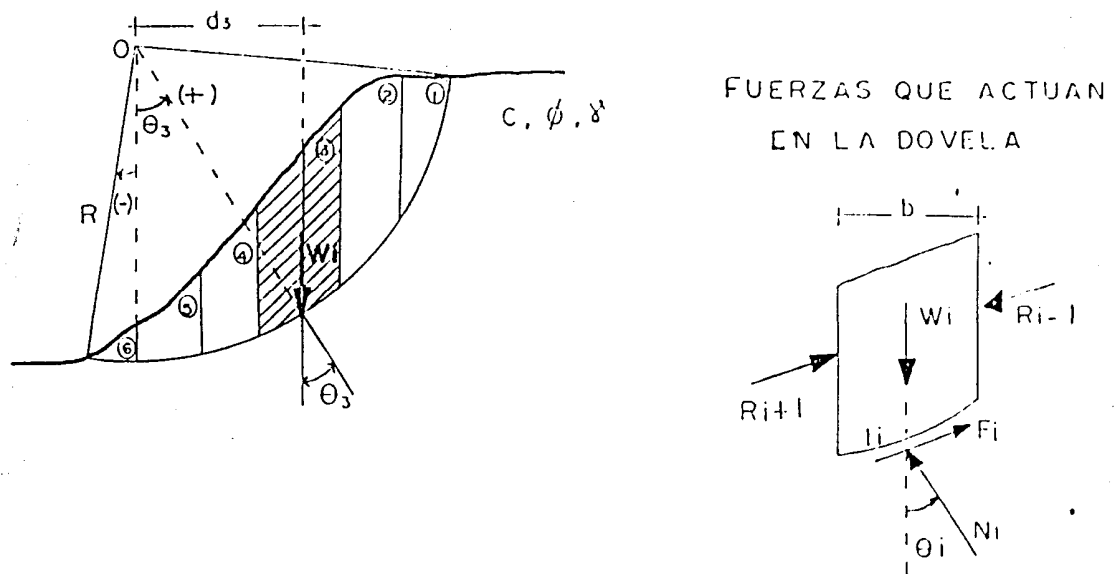


Figura 11. Diagrama utilizado por Fellenius.

- Donde:
- b = ancho de dovela
 - l_i = arco de la dovela
 - θ_i = ángulo que forma la vertical que pasa por el centro de gravedad de cada dovela y la normal a la base de la dovela, puede ser (+) o (-).
 - W_i = peso de cada dovela
 - R_{i-1} y R_{i+1} = Fuerzas laterales de las dovelas
 - F_i = Fuerzas tangenciales en la base de la dovela.
 - N_i = Fuerzas normales en la base de la dovela.

Este método asume que:

Las fuerzas R_{i-1} y R_{i+1} se convierten en reacciones interiores cuando se pasa de una dovela a otra y por lo tanto la suma de momentos de estas fuerzas es nulo.

Pues al sumar los momentos producidos por estas fuerzas, lo único que queda son las reacciones para los puntos extremos (primar y última dovela) donde la altura de cada dovela es nula, con lo que resulta valores nulos.

Fuerzas que se deben considerar según Fellenius.

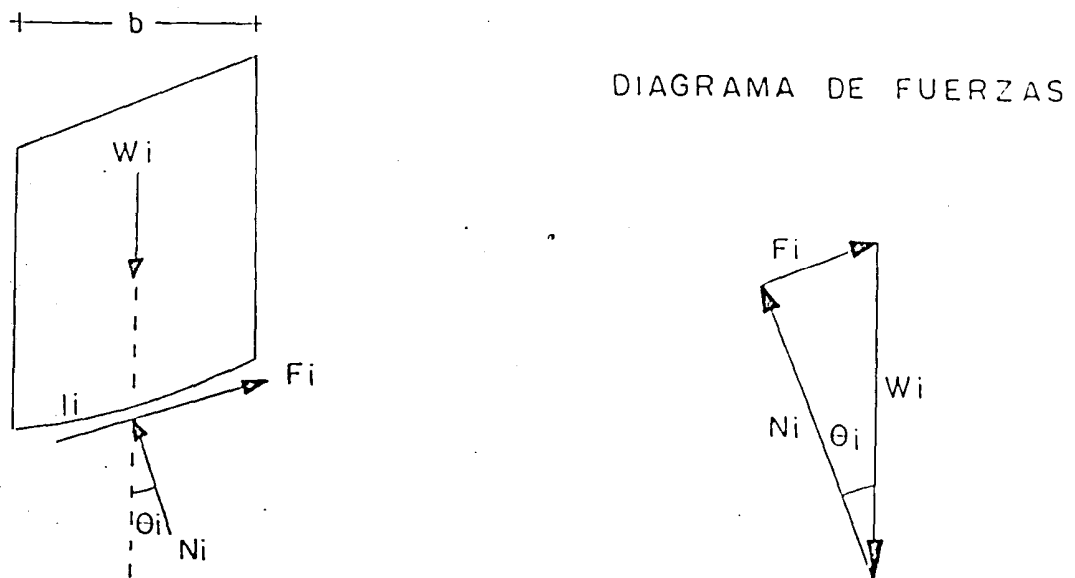


Figura 12. Fuerzas consideradas por Fellenius.

W_i - Conocida en magnitud y dirección

N_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

F_i = Conocida en dirección y desconocida en magnitud

Cálculo de Momentos:

$$M_R = \sum R.FI = R \sum (C_i \cdot l_i + N_i \cdot \tan \phi)$$

$$N_i = W_i \cdot \cos \theta_i$$

$$M_R = R \sum (C_i l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)$$

$$M_m = \sum d_i \cdot W_i = R \sum W_i \cdot \sin \theta_i$$

$$F.S. = \frac{M_R}{M_m} = \frac{\sum (C_i \cdot l_i + W_i \cos \theta_i \tan \phi)}{\sum W_i \cdot \sin \theta_i}$$

Observaciones a esta ecuación:

1) Para facilitar los cálculos y poderlos tabular se sustituye:

$$l_i = b / \cos \theta$$

2) El momento resistente depende de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y se desarrolla en la base de las dovelas y tiene siempre dirección contraria al movimiento, la suma que se hace es aritmética.

3) En cuanto al momento motor, existen dovelas que dan momentos estabilizantes y desestabilizantes, por lo tanto la suma es algebraica.

4) Se aconseja tomar de 8 a 12 dovelas como máximo, para obtener un resultado satisfactorio.

5) El F.S. calculado es para el círculo asumido y no es el del talud.

Casos que se pueden contemplar con este método:

a) Cuando hay varios estratos con diferentes resistencias al esfuerzo cortante.

- Se puede aplicar la misma expresión, pero teniendo en cuenta que:

C_i = Es la cohesión en la base de cada dovela.

ϕ_i = Es el ángulo de fricción interna en la base de cada dovela

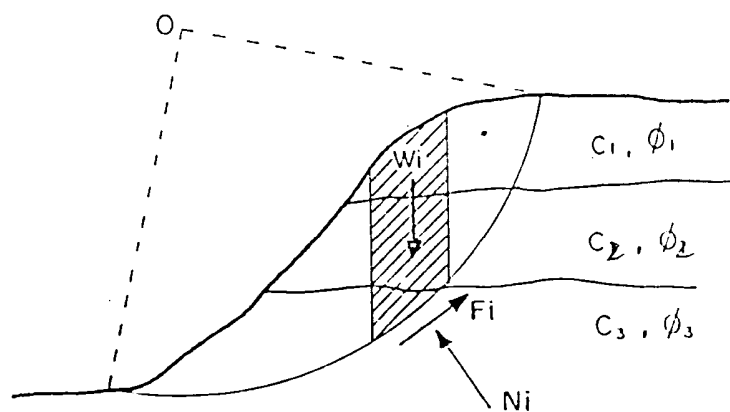


Figura 13. Talud con diferentes estratos

b) Si hay sobrecarga su efecto se debe incluir sobre las dovelas en las cuales actúa y puede haber sobrecargas estabilizantes y desestabilizantes.

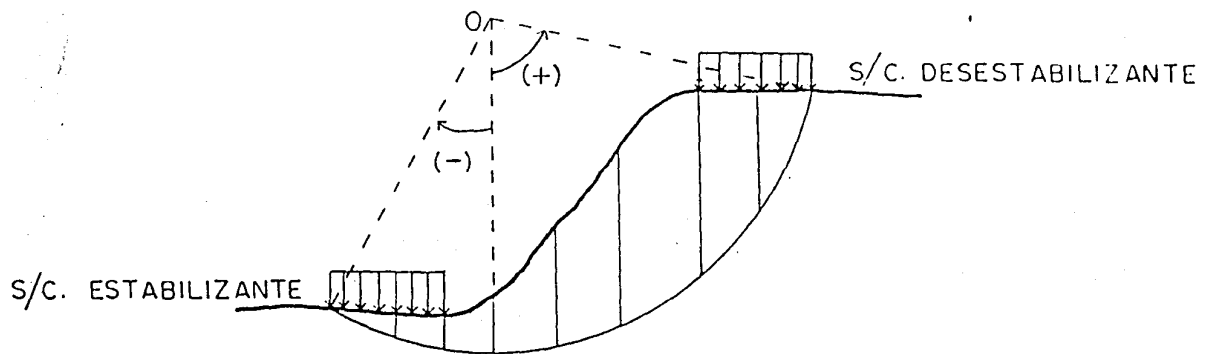


Figura 14. Talud con cargas externas.

c) Si el talud está parcialmente sumergido y experimenta flujo interno de agua, se puede aplicar este método.

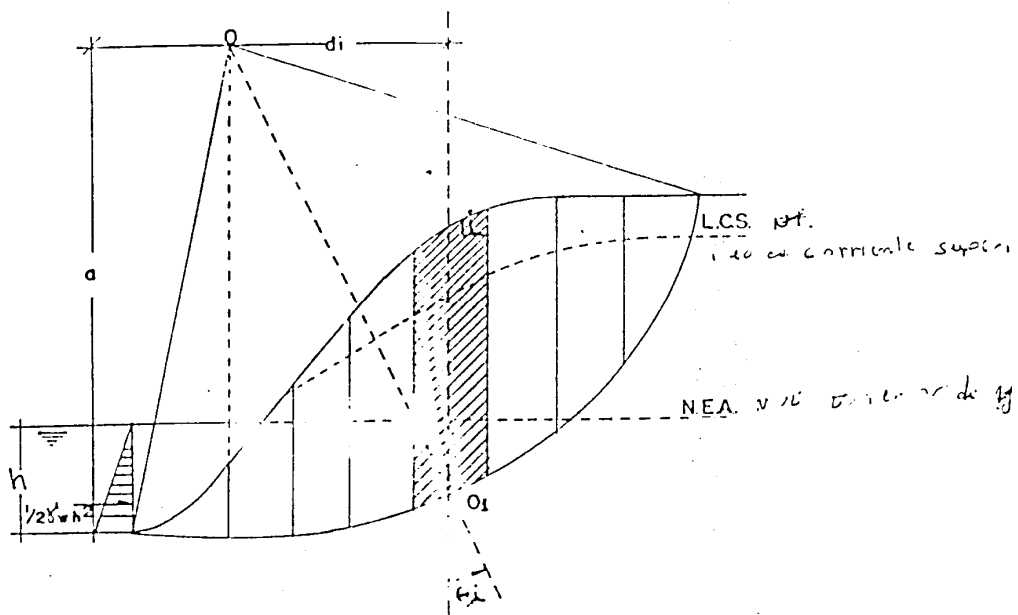


Figura 15. Talud parcialmente sumergido.

Nuevamente haciendo un análisis de las fuerzas que actúan en una dovela típica y con base en la suposición de Fellenius el cual asume que las fuerzas en las caras laterales son nulas, se tienen las siguientes fuerzas que deben considerarse según Fellenius

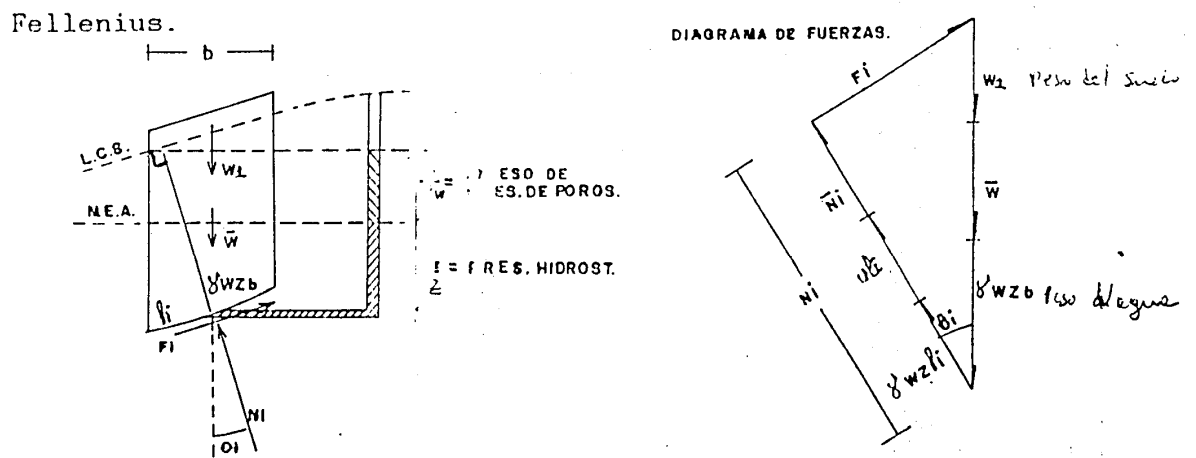


Figura 16. Fuerzas actuantes en talud parcialmente sumergido.

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A., se calcula con γ

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A., se calcula con

$$\gamma = \gamma - \gamma_w$$

$\gamma_w Z_b$ = Peso del agua de la parte de la dovela que está por debajo del N.E.A.

μ = Exceso de presión de poros. Se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Cálculo del momento resistente

Este momento depende de la resistencia que se desarrolla en la base de la dovela.

Puede ser en esfuerzos efectivos.

$$F_t = C_t l + \bar{N}_i \tan \phi$$

Según el polígono de fuerzas

$$\bar{N}_i = (W_i + \bar{W} \cos \theta_i - \mu l_i)$$

El momento resistente

$$M_R = R \sum (c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi)$$

Cálculo del momento motor

$$M_m = R \sum (W_1 + W) \text{Sen} \theta_i$$

$$F.S. = \frac{\sum c' l_i + \bar{N}_i \tan \phi}{\sum (W_1 + \bar{W}) \text{Sen} \theta_i}$$

1.9.1.3. Método de Bishop

Para superficie de falla circular, se siguen los mismos pasos del método de Fellenius.

Este método supone que las fuerzas que actúan en las caras laterales de una dovela, tienen una resultante nula en la dirección vertical o sea que

$\sum (V_n - V_{n-1}) = 0$, con lo cual elimina correctamente las fuerzas E_i , en general mucho más importante que las fuerzas V_i .

Fuerzas que actúan en
en una dovela.

Fuerzas que actúan en una dovela
según Bishop modificado.

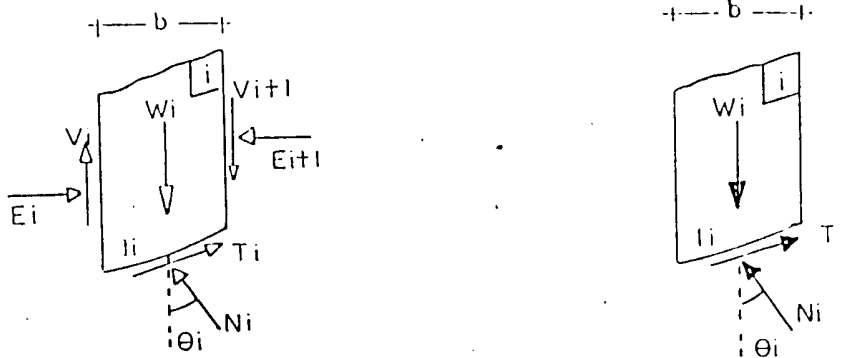


Figura 17. Fuerzas actuantes según Bishop.

Donde:

W_i = Peso de la dovela

N_i = Fuerza normal a la base de la dovela

T_i = Fuerza resistente que está actuando en el momento del análisis.

$$T_i = \frac{T}{F.S.} T$$

Para el equilibrio de la masa se debe cumplir que:

$$\Sigma F_V = 0$$

$$\Sigma M_o = 0$$

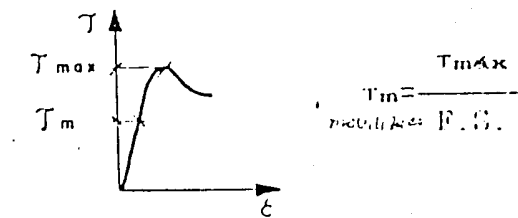


Figura 18. Gráfica de esfuerzos.

Después de hacer el equilibrio de fuerzas y de momentos se llega a la siguiente expresión:

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / (\cos\theta_i + \text{sen}\theta_i * \frac{\tan\theta}{F.S.})}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Pero: $M\theta_i = \cos\theta_i + \text{sen}\theta_i \frac{\tan\theta}{F.S.}$

$$F.S. = \frac{\sum(Cib + Witan\theta) / M\theta_i}{\sum(Wi \text{sen}\theta_i)}$$

Donde:

C_i = Cohesión en la base de la dovela

b = Ancho de la dovela

W_i = Peso de la dovela

θ_i = Ángulo que forma la vertical y la normal en el centro de gravedad de la base de la dovela y puede ser (+) o (-)

$M\theta_i$ = Se calcula con una fórmula que se basa en θ_i y $\tan\phi/F.S.$

Nota: Esta ecuación da un F.S. para un cálculo tentativo, debe resolverse por un proceso interactivo, debido a que el F.S. está en ambos lados de la ecuación, pero su convergencia es rápida.

Cuando el talud está parcialmente sumergido y hay flujo de agua.

$$F.S. = \frac{\sum [c + (W_1 + \bar{W} - ulb) \tan\phi] / M\theta_i}{\sum (W_1 + \bar{W}) \sin\theta_i}$$

Donde:

W_1 = Peso de la dovela situada por encima del N.E.A. se calcula con γ .

W = Peso de la dovela que está situada por debajo del N.E.A. se calcula con $\gamma = \gamma - \gamma_w$

M = Exceso de presión de poros, se presenta cuando hay flujo de agua y se mide por medio de la Red de Flujo o con un piezómetro.

Nota: Para medir el exceso de presión de poros, si no se ha trazado la Red de Flujo es buena aproximación medir μ en la vertical de cada dovela.

1.9.1.4. Comparación de los Diferentes Métodos

Es demasiada la cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price.

Aunque una comparación directa entre los diversos métodos no es siempre posible, se considera el método de Morgenstern-Price el más exacto y complejo, considerándolo como referencia algunos autores concluyen que el método de Bishop presenta errores máximos del 7 %, siendo lo más normal del 2 %, mientras el método simplificado de Janbú generalmente, subestima el factor de seguridad hasta valores del 30%, aunque en algunos casos los sobrestima hasta valores del 5%, Esta aseveración fue documentada por Freddlund y Krahn (1977), otros autores concluyen que el método de Fellenius puede originar graves errores, hasta de un 40 %. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis. En los métodos más complejos y precisos se presentan con frecuencia problemas numéricos que conducen a valores no realísticos de F.S.

Por las razones anteriores se prefieren métodos más sencillos y más fáciles de manejar como son los métodos simplificados de Bishop o de Janbú.

En la práctica, el método de Morgenstern-Price resulta mucho más laborioso en su aplicación, por lo que su utilización se ve relegada a casos muy especiales o a temas relativos a la comparación de otros más simplificados.

1.10. OBRAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Las obras para estabilizar taludes se pueden dividir en dos grandes grupos, por un lado los métodos de protección, y por otro los de estabilización o refuerzo.

La principal diferencia entre ambos se centra en que los primeros tratan de evitar que se desarrollen posibles fenómenos de alteración en la zona del talud, lo que puede dar lugar a inestabilidades; mientras que los métodos de refuerzo o estabilización se caracterizan por actuar de forma activa en el caso que se produzcan dichos fenómenos.

En la actualidad existen variados métodos para estabilizar los taludes, estos métodos dependen generalmente del tipo de terreno.

1.10.1. Descripción de Diversas Obras de Estabilidad de Taludes en Carreteras

Existen diversas formas de estabilizar los taludes, siendo las más comunes:

- ▶ **Remodelado geométrico de los taludes.-** Este método de estabilización se refiere al cambio de la forma del talud dando una mayor inclinación, es decir realizando una descarga de los taludes, esto se puede llevar a cabo mediante:

⇒ Descabezamiento de un talud.- Al quitar peso de la parte superior del talud.

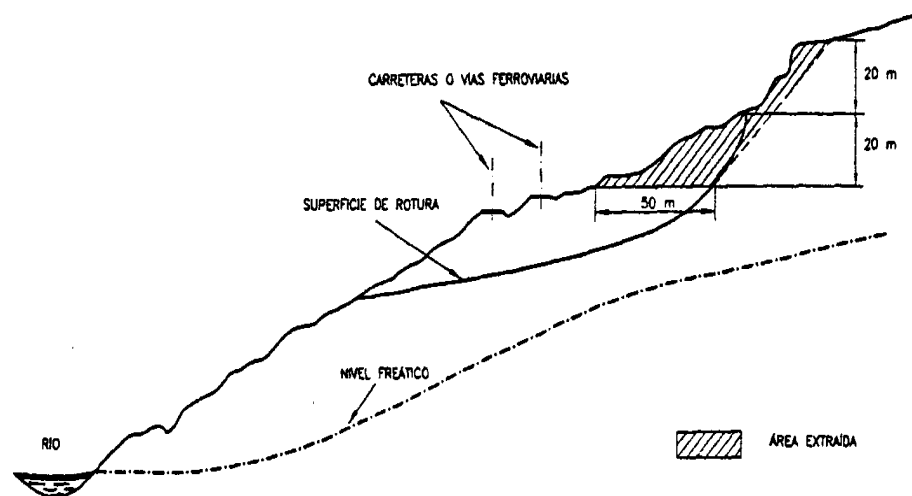


Figura 19. Descabezamiento de un talud

- ⇒ Retiro de materiales inestables.- Retiro de todos los materiales inestables o potencialmente inestables.
- ⇒ Tendido o reperfilado de los taludes.- Tender los taludes (darles mayor inclinación).

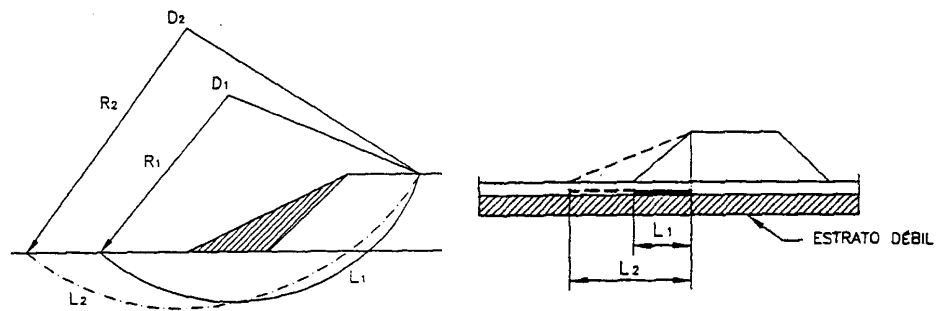


Figura 20. Tendido de Taludes

⇒ Banqueo de los taludes.- Modificar la morfología de un talud de gran altura en varios de alturas más pequeñas, por este motivo las bermas deben ser suficientemente anchas para evitar la caída de bloques de unos niveles a otros.

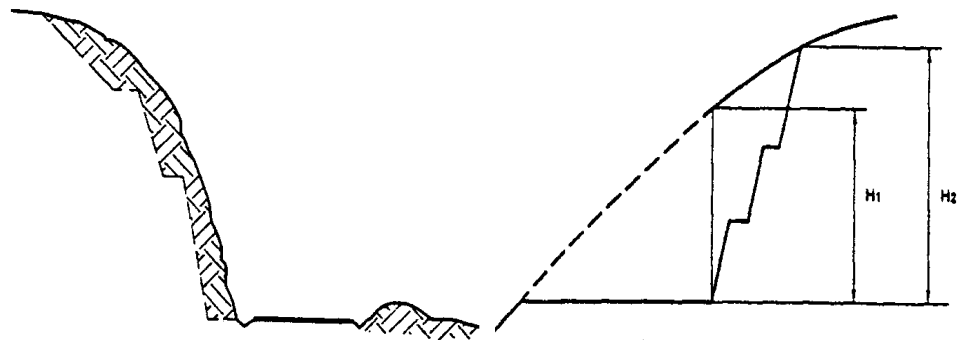


Figura 21. Banqueo de Taludes

► **Muros.**- Este método hace referencia a la utilización de muros de contención.

⇒ Muros de hormigón en masa o de gravedad.- Son los más antiguos y en ellos el propio peso actúa como estabilizador. Su relación altura/ancho (H/B) de estos muros suele estar comprendida entre 1,5 a 2, y se destaca su facilidad constructiva y reducido costo cuando son de poca altura.

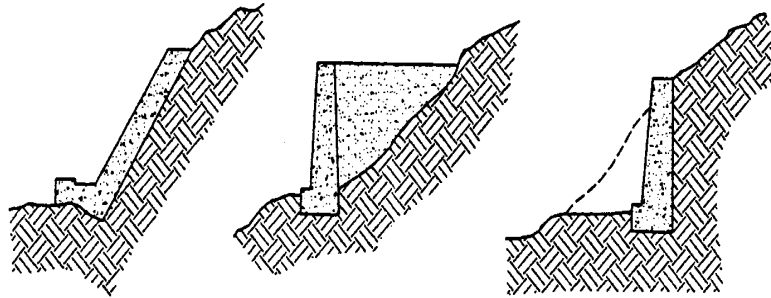


Figura 22. Muros de hormigón en masa

⇒ Muros de hormigón armado.- Son muros armados interiormente con redondos de acero y diseñados para soportar esfuerzos de tracción. Estos exigen menor cantidad de hormigón que los anteriores.

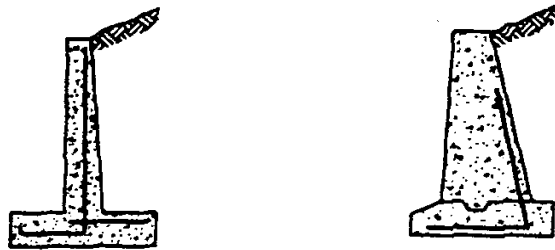


Figura 23. Muros de hormigón armado.

⇒ Muros de fábrica.- Son muros de piedras naturales ejecutados de forma natural, también se pueden utilizar ladrillos o bloques de hormigón.

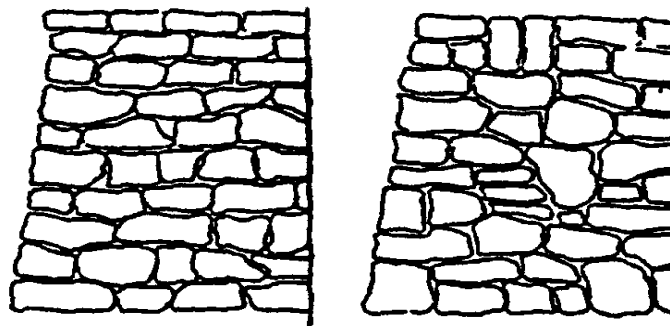


Figura 24. Muros de fábrica.

⇒ Muros Jaula.- Este tipo de muros es muy utilizado en países como Australia, Estados Unidos, Gran Bretaña, Nueva Zelanda.

Básicamente, son estructuras compuestas por cajas de madera que forman un entramado o jaula y que posteriormente se rellenan con materiales granulares incrementando así la resistencia del talud. Este tipo de muros actúan como los muros de gravedad aprovechando el propio peso de las jaulas rellenas.

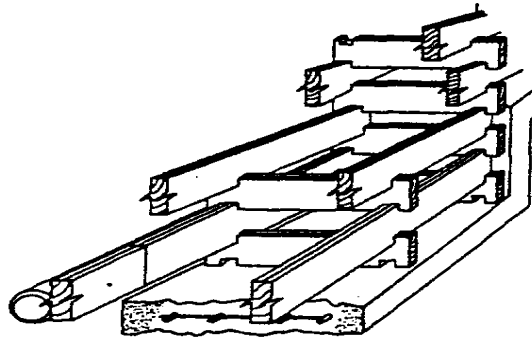


Figura 25. Muros jaula.

⇒ Muros de escollera.- El enchado consiste en la colocación de bloques de piedra natural sana compacta y resistente tales como caliza, granito, gabros, cuarcitas, etc. Con un peso específico normalmente superior a 2 Tn/m^3 y una resistencia a la compresión simple superior a los 70 Mpa. El peso de los bloques puede superar los 250 Kg.

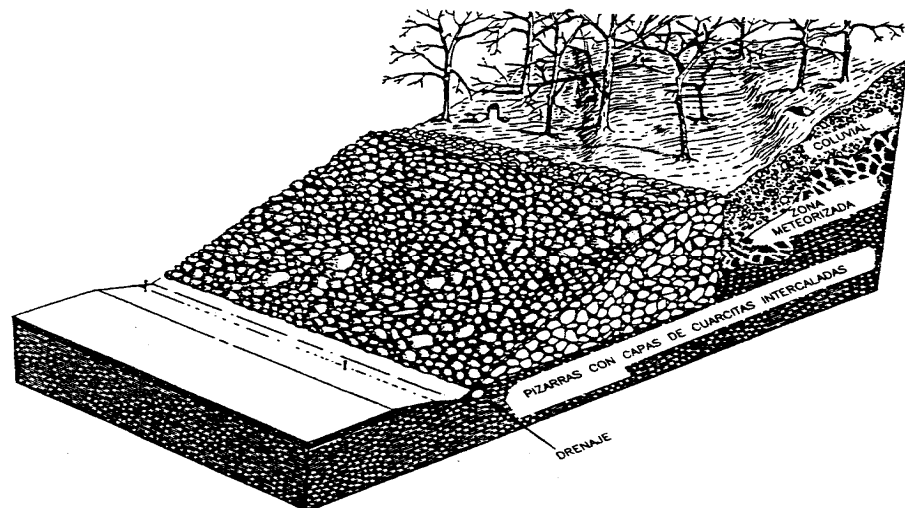


Figura 26. Muros de escollera.

⇒ Muros de neumáticos usados.- En la actualidad se está generando un gran problema de almacenamiento de cierto tipo de residuos, entre los cuales se encuentran los derivados del parque automovilístico. En diversos países industrializados, como Estados Unidos, este problema ha generado diversas controversias sobre el almacenamiento de neumáticos usados. Si se suma este punto al alto costo de los materiales de construcción, se ha llegado a la conclusión de que los neumáticos usados podrían ser reutilizados para la construcción de muros de contención.

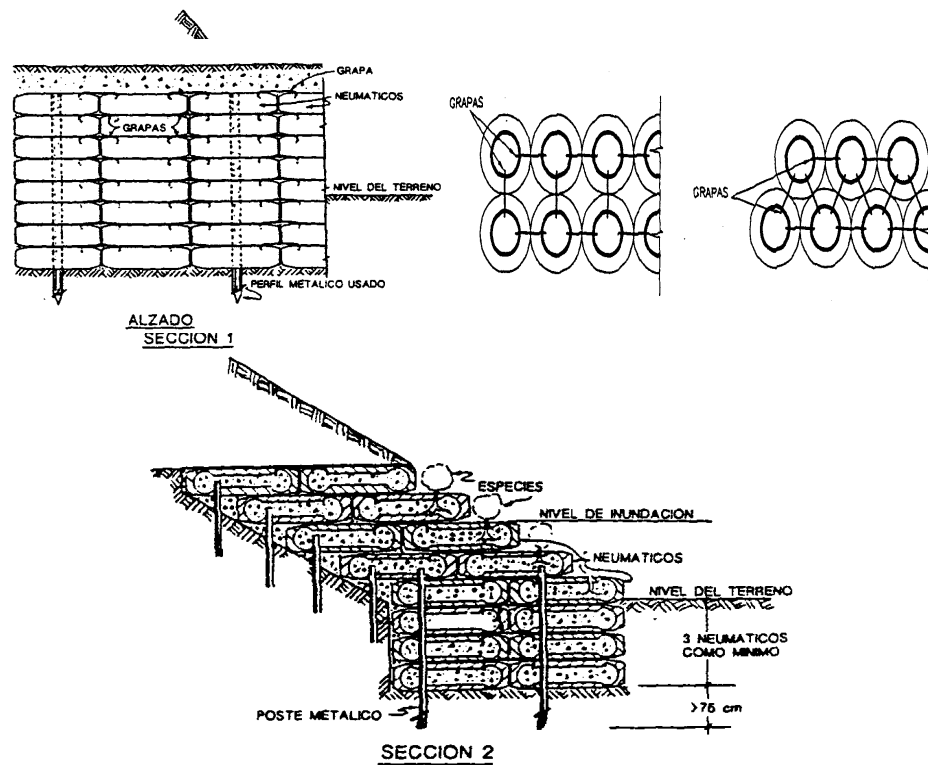


Figura 27 Muros de neumáticos usados

⇒ Muros de tierra armada.- Son muros construidos mediante tongadas de materiales de relleno, colocados entre éstos elementos tales como bandas metálicas, materiales plásticos, elementos prefabricados de hormigón o geotextiles, reforzando el muro y proporcionando, mediante el rozamiento entre el suelo y los diferentes elementos estructurales, estabilidad al conjunto.

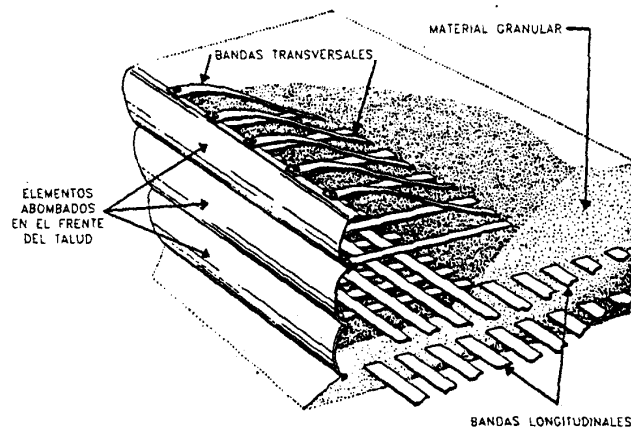
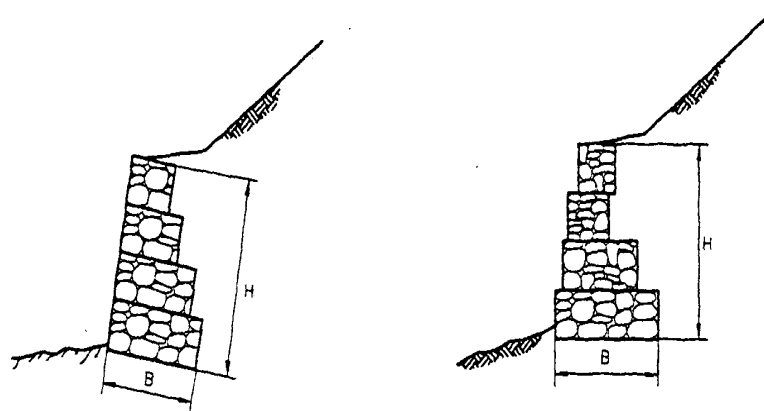


Figura 28. Muros de tierra armada.

⇒ Muros de gaviones.- Un gavión consiste en una estructura paralelepípedica elaborada con mallas de alambre galvanizado de triple torsión y rellenas con la piedras.



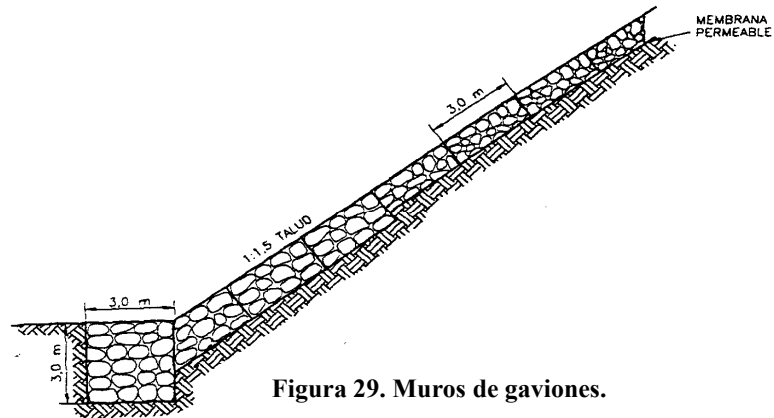


Figura 29. Muros de gaviones.

- ▶ **Refuerzos.-** Los sistemas de refuerzo son cada vez más utilizados en aquellas situaciones en las que no existe la posibilidad de utilizar contrafuertes bien por problemas de espacio para instalar un muro de contención o por que existen dificultades para realizar la expropiación de los terrenos afectados por las obras.

⇒ Reticulado de micropilotes.- Los micropilotes son estructuras o elementos de pequeño diámetro (75 – 250 mm.), compuestos de acero y mortero. Para el acero de armadura se puede utilizar tubos, perfiles laminados o redondos.

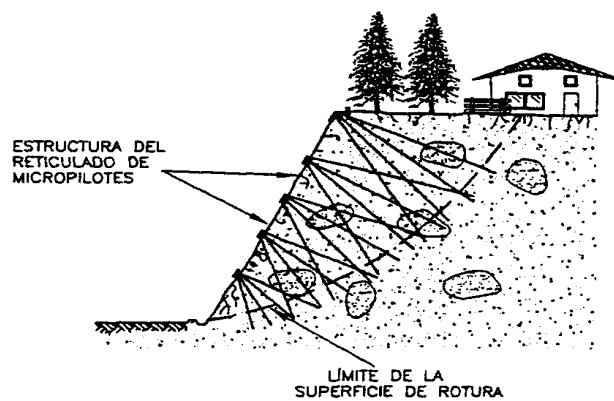


Figura 30. Reticulado de micropilotes.

⇒ Anclajes y bulones.- Los anclajes en suelos consisten en unos cables colocados dentro de taladros y pensionados después de que ha sido inyectado el hormigón. En el caso de excavaciones poco profundas, los anclajes en suelos trabajan más como elementos estructurales de sujeción. Por ejemplo, se pueden utilizar para sujetar determinados tipos de pantallas. También se puede usar para estabilizar taludes y para aumentar la resistencia de un suelo ya consolidado.

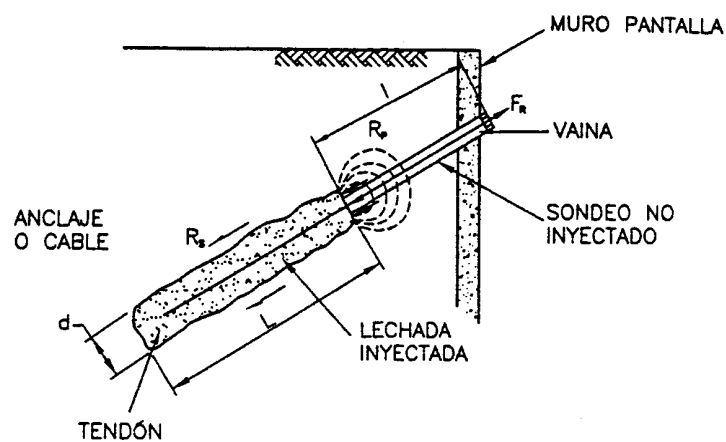


Figura 31. Anclajes y bulones

⇒ Columnas de grava.- Se utilizan para estabilizar o prevenir deslizamientos. Este método incrementa la resistencia al cizallamiento de un suelo a lo largo de una superficie de deslizamiento potencial. Reemplazando o desplazando el material in situ con varias series de columnas rellenas con gravas de gran diámetro. Adicionalmente, las columnas de grava actúan como un drenaje profundo muy efectivo.

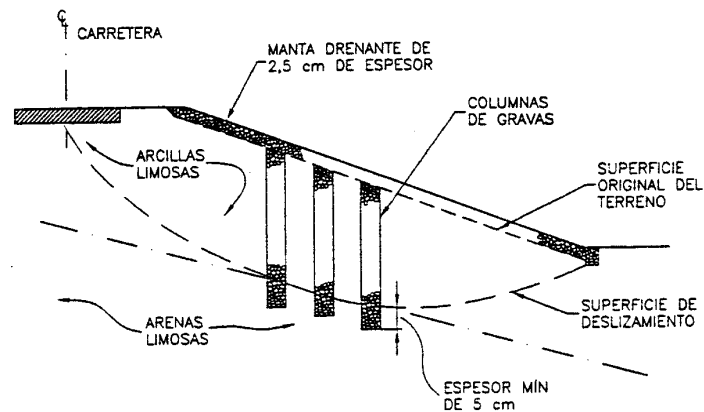


Figura 32. Columnas de grava.

- ⇒ Pilotes.- Los pilotes o pasadores son elementos de cimentación de gran longitud con respecto a su sección transversal que se empotran en una cavidad previamente excavada en el terreno. Antiguamente los pilotes que se usaban eran de madera, pero en la actualidad los únicos pilotes que se utilizan son principalmente de hormigón, aunque se puede utilizar también pasadores metálicos. Existen pilotes prefabricados y hormigonados in situ.
- ⇒ Mallas y redes metálicas.- La fijación de mallas y redes metálicas a la superficie de los taludes inmoviliza o amortigua el deslizamiento de materiales procedentes de la descomposición del sustrato y contribuye a la consolidación definitiva de dicho talud, favoreciendo a veces la colonización vegetal.

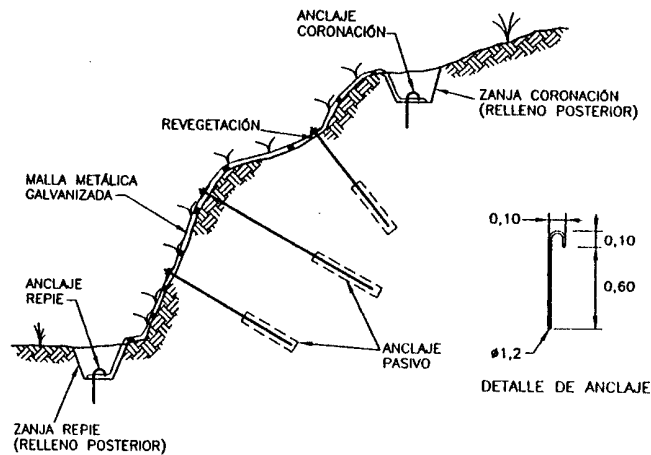


Figura 33. Mallas y redes metálicas.

► **Tratamientos del terreno.-** En muchas ocasiones, para estabilizar taludes, los métodos anteriormente expuestos no son lo suficientemente efectivos en suelos cohesivos, que tienen permeabilidad baja o muy baja, en estas situaciones, se deben considerar los siguientes métodos de tratamiento del terreno.

⇒ Tratamientos químicos.- La utilización de elementos químicos para el tratamiento de laderas o taludes inestables es una posibilidad que presenta diversos atractivos. Los tratamientos químicos más utilizados en la estabilización de laderas han sido las inyecciones de cementos pórtland, cloruros cálcicos, inyecciones de cal y las cenizas. Sin embargo, el gran problema a la hora de utilizar cualquiera de estos elementos químicos ha sido el conseguir un método adecuado para realizar las inyecciones en las zonas de inestabilidad.

⇒ Inyecciones de cal.- Las inyecciones de emulsiones de cal o de cal y cenizas volantes se emplean mucho en los Estados Unidos para el tratamiento de suelos arcillosos expansivos y limosos. Para lograr una emulsión acuosa espesa con cal y que sea fácilmente bombeable, se suele mezclar cal viva (CaO) o cal hidratada (Ca(OH)_2), con agua limpia, de forma que exista en dicha

emulsión una concentración máxima del 40 % en sólidos. Con el fin de inyectar la emulsión en el terreno se deben emplear equipos adecuados. La emulsión al ser inyectada en el suelo sigue las zonas de debilidad, planos de estratificación, fisuras naturales, etc.

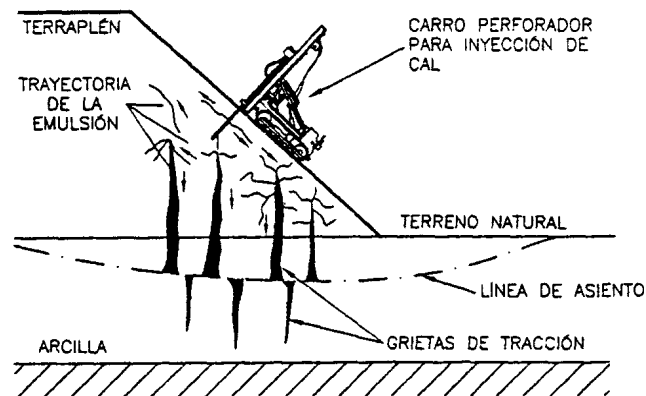


Figura 34. Inyecciones de cal

- ⇒ Columnas de cal.- Las columnas de cal fueron utilizadas por primera vez por los ingenieros Suecos. Las columnas de cal se construyen in situ mezclando cal viva con el terreno mediante el empleo de un tornillo sin fin (Auger). Este penetra en el subsuelo hasta una profundidad por debajo de la superficie deslizante y en el hueco generado es donde se inyecta la lechada de cal.
- ⇒ Tratamientos térmicos.- Los tratamientos de alta temperatura secan los materiales arcillosos, provocando el pegado de las partículas y como consecuencia se incrementa la estabilidad del terreno.

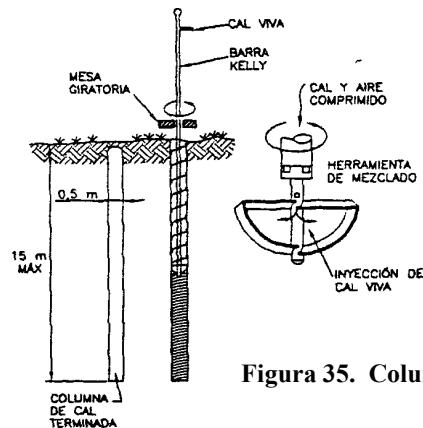


Figura 35. Columnas de cal

⇒ Pilotes de cal.- Este sistema ha sido empleado en diversos países desde los años 60 con el fin de mejorar la estabilidad de suelos saturados. Los pilotes se forman perforando unos barrenos en los que se inyectará y compactará la cal.

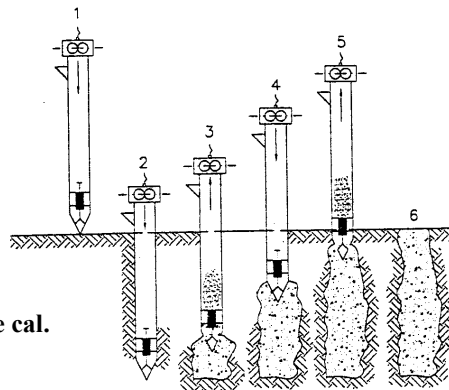


Figura 36. Pilotes de cal.

⇒ Tratamientos eléctricos.- Otra técnica que incrementa la resistencia de los suelos es la denominada como electroósmosis. Las publicaciones clásicas sobre esta técnica fueron desarrolladas por Casagrande (1948, 1952, 1953), pero existen numerosos casos históricos recogidos en la literatura por Holtz (1989) en los que se ha utilizado la técnica de la electroósmosis para estabilizar los cimientos de diques; sin embargo, la aplicación clásica de la electroósmosis ha sido la estabilización de laderas inestables.