

CAPÍTULO 3

GUÍA PARA IDENTIFICAR PROBLEMAS DE DESLIZAMIENTOS

En este capítulo se establece una metodología para detectar y prevenir posibles problemas en áreas propensas a deslizamientos mediante:

1. la identificación de los mecanismos de falla más comunes en los distintos tipos de materiales geológicos;
2. el establecimiento de criterios para la recolección de información;
3. la búsqueda e interpretación de efectos claves para identificar la posible inestabilidad de los taludes.

Adicionalmente se presentan algunas de las medidas correctivas comúnmente utilizadas para lograr la estabilización de taludes fallados.

CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE FALLAS DE TALUDES

Este capítulo presenta una clasificación de tipos de falla de taludes basada en el reconocimiento de los factores geológicos que condicionan la falla. Los deslizamientos de taludes ocurren de muchas maneras y aún persiste cierto grado de incertidumbre en su predictibilidad, rapidez de ocurrencia y área afectada. Sin embargo, existen ciertos patrones que ayudan a identificar y reconocer áreas potenciales de fallas, lo cual permite el tratamiento del talud para eliminar o reducir a un mínimo el riesgo de falla.

En el cuadro 3.1 se presenta una clasificación de fallas de taludes adaptada de Hunt (1984).

Desprendimientos

Son fallas repentinas de taludes verticales o casi verticales que producen el desprendimiento de un bloque o múltiples bloques que descienden en caída libre (figura 3.1). La volcadura de los bloques generalmente desencadena un desprendimiento (figura 3.2).

En suelos, los desprendimientos son causados por socavación de taludes debido a la acción del hombre o erosión de quebradas. En macizos rocosos son causados por socavación debido a la erosión. En algunos casos los desprendimientos son el resultado de meteorización diferencial.

Cuadro 3.1
Clasificación de fallas

Tipo de falla	Forma	Definición
Desprendimientos	Caída libre	Desprendimiento repentino de uno o más bloques de suelo o roca que descienden en caída libre.
	Volcadura	Caída de un bloque de roca con respecto a un pivote ubicado debajo de su centro de gravedad.
Derrumbes	Planar	Movimiento lento o rápido de un bloque de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana.
	Rotacional	Movimiento relativamente lento de una masa de suelo, roca o una combinación de los dos a lo largo de una superficie curva de falla bien definida.
	Desparramamiento lateral	Movimiento de diferentes bloques de suelo con desplazamientos distintos.
	Deslizamiento de escombros	Mezcla de suelo y pedazos de roca moviéndose a lo largo de una superficie de roca planar.
Avalanchas	De roca o escombros	Movimiento rápido de una masa incoherente de escombros de roca o suelo-roca donde no se distingue la estructura original del material.
Flujo	De escombros	Suelo o suelo-roca moviéndose como un fluido viscoso, desplazándose usualmente hasta distancias mucho mayores de la falla. Usualmente originado por exceso de presiones de poros.
Repteo		Movimiento lento e imperceptible talud abajo de una masa de suelo o suelo-roca

Los desprendimientos o caídas son relevantes desde el punto de vista de la ingeniería porque la caída de uno o varios bloques puede ocasionar daños a estructuras o a otros taludes que se encuentren en la parte inferior y podría originar una destrucción masiva.

Los desprendimientos se producen comúnmente en taludes verticales o casi verticales en suelos débiles a moderadamente fuertes y en macizos rocosos fracturados. Generalmente, antes de la falla ocurre un desplazamiento, el cual puede ser identificado por la presencia de grietas de tensión.

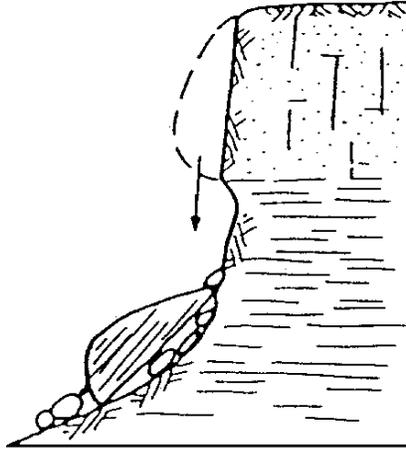


Figura 3.1
Desprendimiento de bloques

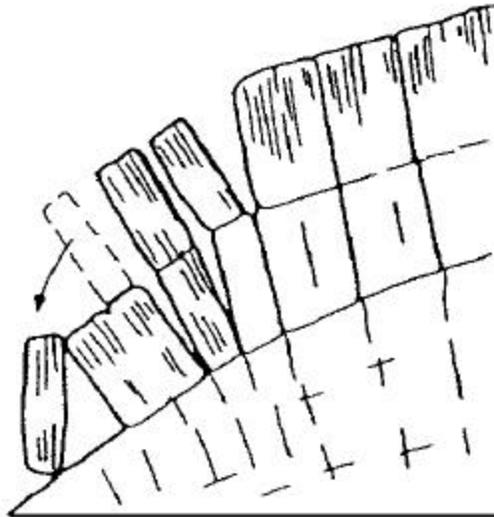


Figura 3.2
Volcadura de bloques

Derrumbes

Los derrumbes se encuentran asociados a fallas en suelos y rocas, y de acuerdo con la forma de la superficie de falla se subdividen en rotacionales y planares.

– *Derrumbes planares*

Los derrumbes planares consisten en el movimiento de un bloque (o bloques) de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana bien definida. Estos derrumbes pueden ocurrir lenta o rápidamente.

Los deslizamientos planares en macizos rocosos consisten en el deslizamiento como una unidad o unidades (bloques) talud abajo, a lo largo de una o más superficies planas (figura 3.3). También se puede generar una falla de cuña a lo largo de la intersección de dos planos, consistente de uno o varios bloques de pequeño a gran tamaño (figura 3.4).

Los deslizamientos en bloque pueden ser destructivos especialmente en regiones montañosas donde los deslizamientos masivos de roca resultan desastrosos y en muchos casos no pueden ser prevenidos.

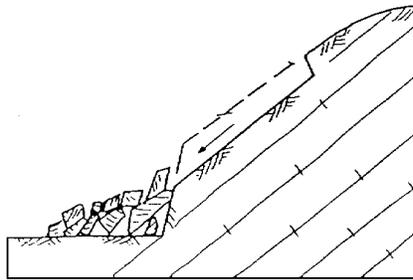


Figura 3.3
Deslizamiento planar en macizo rocoso

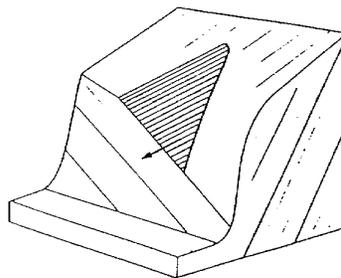


Figura 3.4
Deslizamiento en forma de cuña

Los deslizamientos planares suelen ocurrir en:

- Rocas sedimentarias que tengan un buzamiento similar o menor a la inclinación de la cara del talud.

- Discontinuidades, tales como fallas, foliaciones o diaclasas que forman largos y continuos planos de debilidad que interceptan la superficie del talud.
- Intersección de diaclasas o discontinuidades que dan como resultado la falla de un bloque en forma de cuña.

En general, durante los períodos iniciales de la falla se generan grietas de tracción con un pequeño desplazamiento, luego se pueden observar escarpes frescos que dejan los bloques con posterioridad al movimiento. En algunos casos, este movimiento deja sin vegetación la zona deslizada y los escombros quedan expuestos al pie del talud.

– *Derrumbes rotacionales*

Los derrumbes rotacionales tienden a ocurrir lentamente en forma de cuchara y el material comienza a fallar por rotación a lo largo de una superficie cilíndrica; aparecen grietas en la cresta del área inestable y abombamientos al pie de la masa deslizante (figura 3.5). Al finalizar, la masa se desplaza sustancialmente y deja un escarpe en la cresta.

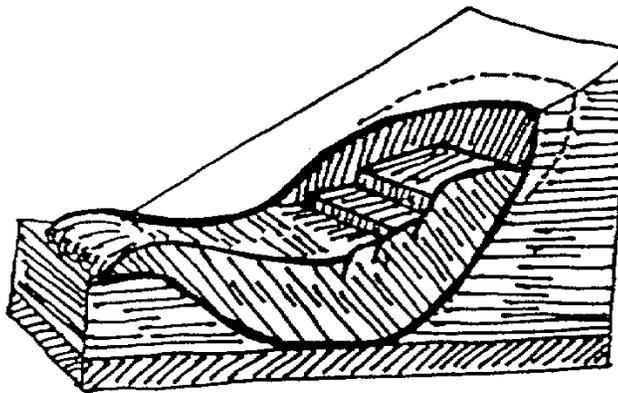


Figura 3.5
Derrumbe rotacional

La principal causa de este tipo de falla es el incremento de la inclinación del talud, meteorización y fuerzas de filtración; sus consecuencias no son catastróficas, a pesar de que el movimiento puede causar severos daños a estructuras que se encuentren en la masa deslizante o sus alrededores. Cuando se presentan algunos signos tempranos de falla los taludes pueden ser estabilizados.

En las etapas tempranas del deslizamiento se forman grietas de tensión, luego de la falla parcial se genera una serie de pequeños hundimientos y escarpes, y al momento de la falla total se pueden apreciar varios escarpes en la superficie además de grietas de tensión concéntricas y profundas, así como una gran masa de material incoherente al pie del talud.

– *Desparramamiento lateral y falla progresiva*

Los desparramamientos laterales son una forma de falla planar que ocurre en suelos y rocas. La masa se deforma a lo largo de una superficie plana que representa una zona débil, tal como lo ilustra la figura 3.6. Los bloques se separan progresivamente por tensión y retroceden.

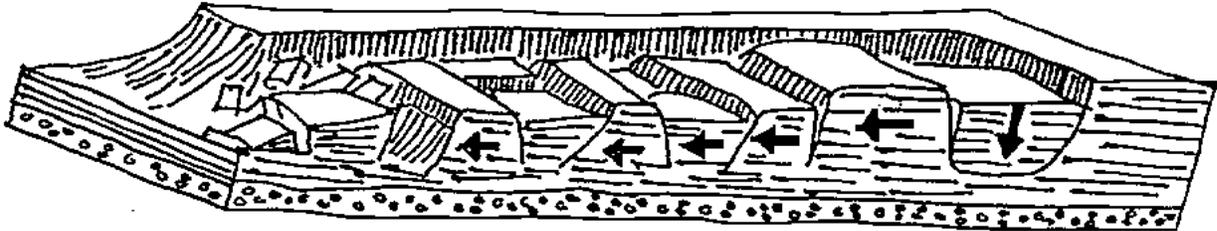


Figura 3.6
Desparramamiento lateral

Este tipo de falla es común en valles de ríos y se asocia también con arcillas firmes y duras fisuradas, lutitas y estratos con buzamiento horizontal y una zona continua de debilidad. También se presenta en coluvios con pendientes suaves que se encuentran sobre suelos residuales o rocas.

Los desparramamientos laterales pueden activarse repentinamente por eventos sísmicos. Sin embargo, bajo acciones gravitacionales se generan grietas de tensión. Durante la falla progresiva, las grietas de tensión se abren y los escarpes forman grandes bloques.

– *Deslizamiento de escombros*

En los deslizamientos de escombros, una masa de suelo o mezcla de suelo y fragmentos de roca se mueven como una unidad a lo largo de superficies planas con alta inclinación. Estos deslizamientos ocurren de manera progresiva y pueden convertirse en avalanchas o flujos. Las principales causas de deslizamientos de escombros son el incremento de las fuerzas de filtración y la inclinación del talud. La ocurrencia de este tipo de deslizamiento es común en suelos residuales y depósitos coluviales que reposan sobre una superficie de roca.

Avalanchas

Las avalanchas son el movimiento rápido de escombros, de suelo o de roca y puede o no comenzar con la ruptura a lo largo de una superficie de falla. Toda la vegetación, el suelo y la roca suelta pueden ser arrastrados.

Las principales causas de avalanchas son las altas fuerzas de filtración, alta pluviosidad, derretimiento de nieve, sismos o deslizamiento gradual de los estratos de roca. Las avalanchas

ocurren de manera brusca sin previo aviso y generalmente son impredecibles. Los efectos pueden ser desastrosos y pueden sepultar extensas áreas al pie del talud.

Las avalanchas son características de zonas montañosas con pendientes muy inclinadas en suelos residuales donde la topografía causa concentración de la escorrentía. También se puede presentar en zonas de roca muy fracturada.

Flujo de escombros

Este tipo de falla es similar a las avalanchas, excepto que la cantidad de agua es mayor y por ello la masa fluye como lodo. La principal causa es el aporte de grandes lluvias y material suelto en la superficie.

Repteo

El repteo consiste en un lento e imperceptible movimiento o deformación del material de un talud frente a bajos niveles de esfuerzos que generalmente afectan a las porciones más superficiales del talud, aunque también puede afectar a porciones profundas cuando existe un estrato poco resistente. El repteo es el resultado de la acción de fuerzas de filtración o gravitacionales y es un indicador de condiciones favorables para el deslizamiento.

El repteo es característico en materiales cohesivos y rocas blandas como lutitas y sales, en taludes moderadamente empinados a empinados.

Los rasgos característicos del repteo son la presencia de crestas paralelas y transversales a la máxima pendiente del talud y postes de cerca inclinados.

FACTORES QUE INFLUENCIAN LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

Antecedentes históricos

Los deslizamientos en taludes ocurren de muchas maneras y existe cierto grado de incertidumbre en su predicción. Sin embargo, conocer los deslizamientos que han ocurrido en el área de interés constituye un buen punto de partida para la detección y evaluación de potenciales deslizamientos en el futuro.

Para conocer los deslizamientos pasados se puede revisar diversas fuentes, tales como periódicos locales, revistas nacionales o internacionales especializadas en el tema, mapas de zonificación de casos de inestabilidad geológica, inventarios de riesgos geológicos, etc.

No siempre es posible conseguir documentación escrita de ocurrencias previas de deslizamientos, por lo que la información de los vecinos del sector -si los hay- constituye generalmente una valiosa fuente de información.

El tipo de información solicitada a los vecinos sería la descripción de deslizamientos previos en el área, el comportamiento de los taludes durante el período de lluvias, comportamiento durante eventos sísmicos, presencia de antiguas lagunas que se hayan secado, existencia de grietas en construcciones de la zona, grietas en el terreno, inclinación de postes, cercas o árboles con deformaciones, etc.

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 unos 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.

- *Taludes escarpados:* En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico (foto 3.1). 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.
- *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.



Foto 3.1
**Deformación de una tubería de 60” de diámetro por deslizamiento
debido a un corte al pie del talud**

- *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 estas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques que lo hace más inestable.

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:

1. 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.
2. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.
3. 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.

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.

Los suelos estudiados generaron seis figuras simplificadas que brindan información preliminar acerca de la estabilidad de los taludes con comportamiento granular (figura 3.7) y con comportamiento cohesivo (figura 3.8).

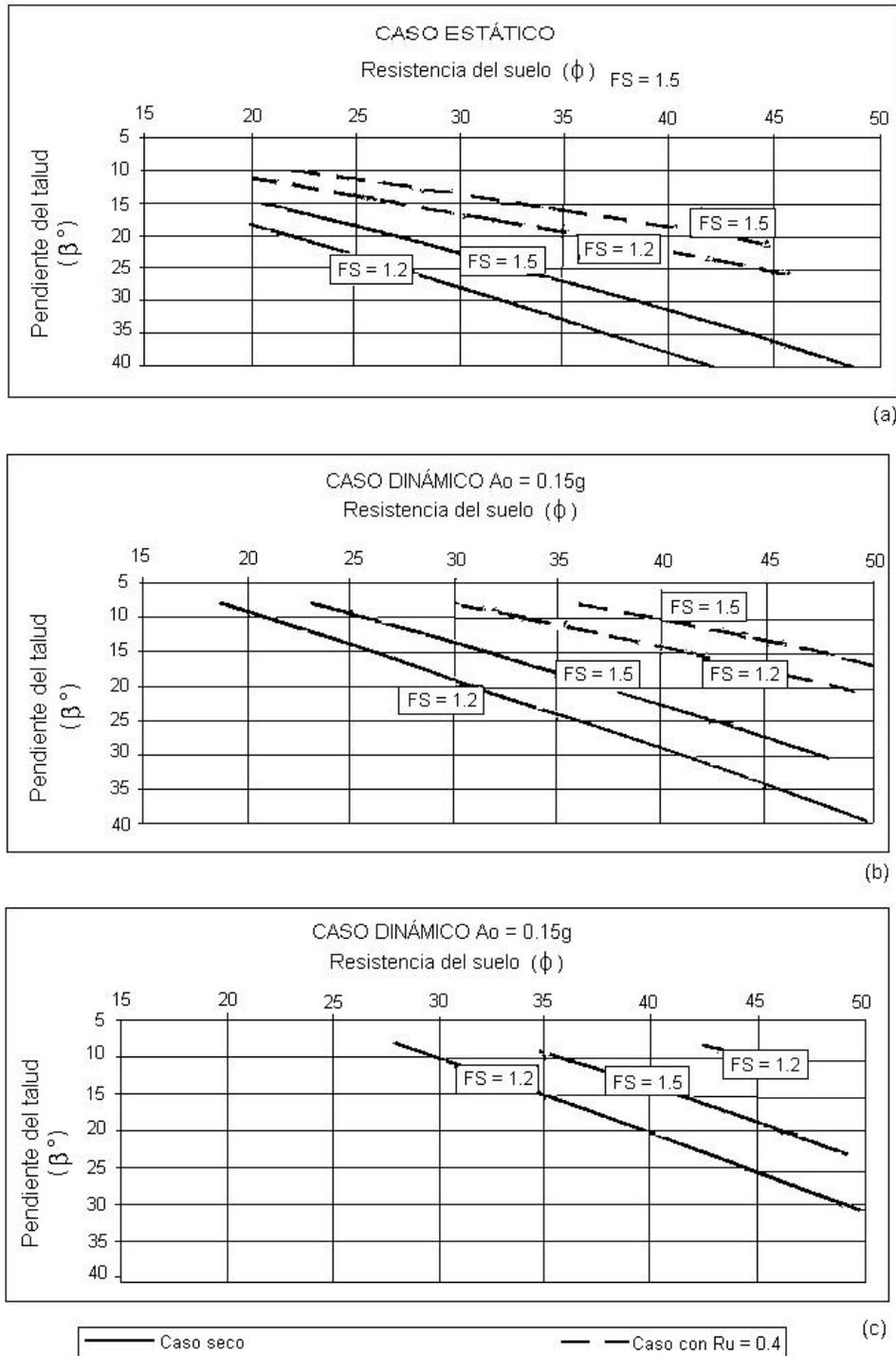


Figura 3.7
Criterio de falla en taludes con comportamiento granular

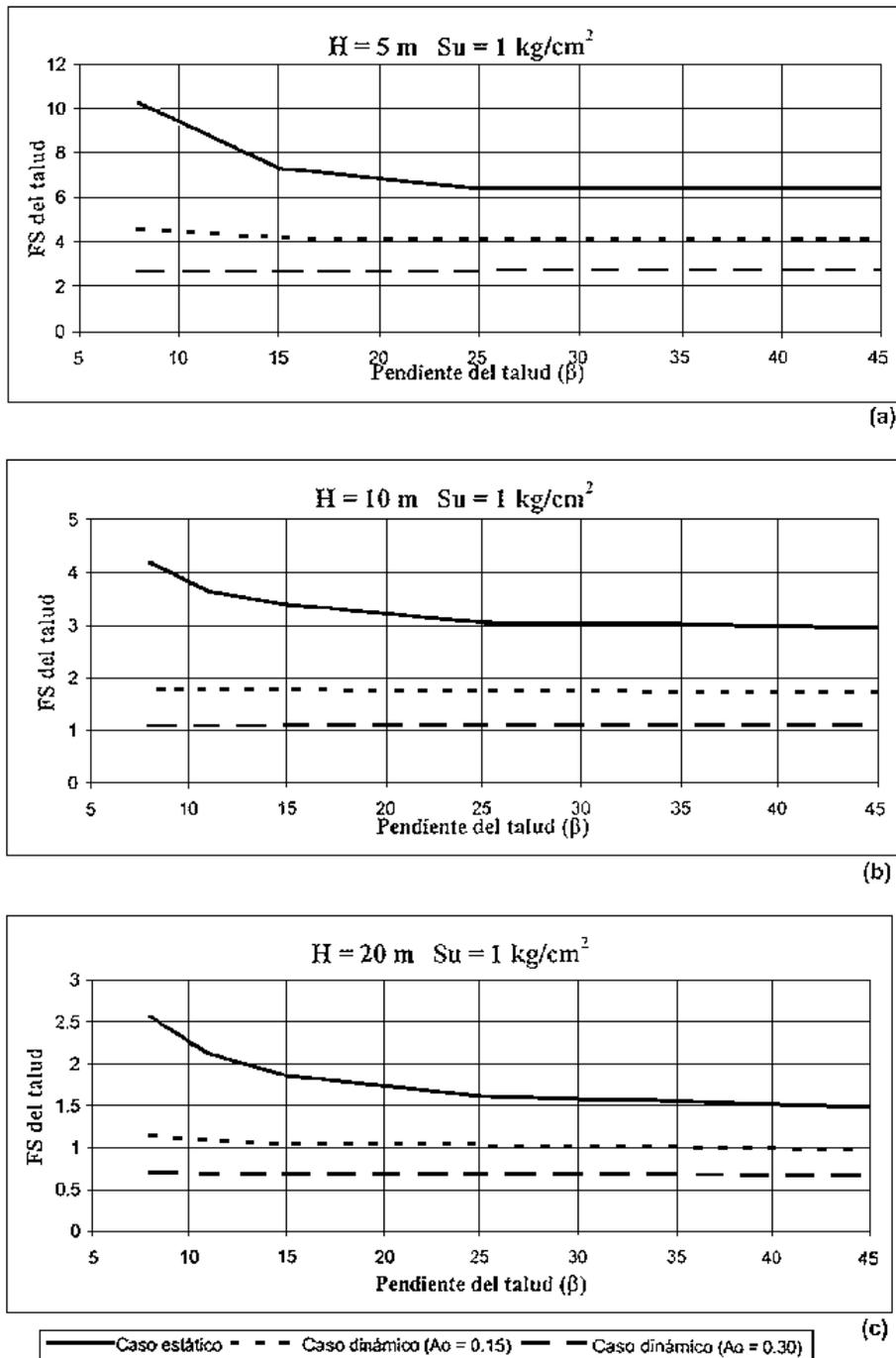


Figura 3.8
Curvas de FS vs inclinación del talud para suelos con comportamiento cohesivo $FS = FS$ de la fig. 3.7 x S_u (kg/cm^2)

- *Suelos con comportamiento granular:* Cada uno de los gráficos de la figura 3.7 consiste en cuatro curvas que definen sectores de estabilidad para los casos seco (trazo continuo) y de alto grado de saturación (trazo punteado); estos sectores de estabilidad se basan en el factor de seguridad (FS).

El primer sector, ubicado debajo de las curvas del $FS = 1,2$, corresponde a combinaciones de la resistencia del suelo con la pendiente del talud que pueden originar situaciones de inestabilidad bajo la resistencia del suelo; en este caso viene dada por el ángulo de fricción del suelo, ϕ .

El segundo sector, ubicado entre las curvas del $FS = 1,2$ y $1,5$, corresponde a situaciones en las que se debe realizar un estudio más detallado e incorporar toda la información disponible sobre el suelo.

El tercer y último sector de estas figuras corresponden a los casos con bajo peligro de inestabilidad. La figura 3.7a toma en cuenta el caso estático y las figuras 3.7b y 3.7c los casos dinámicos con aceleraciones máximas $A_0 = 0,15g$ y $0,30g$, respectivamente. Para todos los casos anteriores se utilizó un talud con una altura de 20 metros.

- *Suelos con comportamiento cohesivo.* La figura 3.8 muestra análisis simplificados para suelos con comportamiento cohesivo. Dado que en este tipo de suelos la altura del talud (H) es un parámetro de relevancia, éste fue incorporado en el análisis. En el suelo puramente cohesivo la variación del parámetro de resistencia no drenada, (S_u), es directamente proporcional al factor de seguridad y por lo tanto se decidió realizar el análisis para una resistencia de 1 kg/cm^2 . El factor de seguridad obtenido podrá ser modificado multiplicándolo por un factor igual al que haya entre la resistencia del suelo en estudio y el utilizado en las figuras de este trabajo.

Ejemplo: Para evaluar la estabilidad de un corte reciente con inclinación de 30° de un talud arcilloso de 5 metros de altura y resistencia no drenada estimada de $0,2 \text{ kg/cm}^2$, se debe usar la figura de 5 metros de altura, es decir, la figura 3.8(a).

De esta solución se obtiene el valor del $FS = 6,35$, pero como la resistencia es 5 veces menor a la utilizada en la generación de las curvas, el FS realmente estimado para este caso será de $6,35/5 = 1,27$. Siguiendo el criterio utilizado en el suelo con comportamiento granular, sería recomendable hacer un estudio más detallado para este caso, ya que el FS hallado se encuentra entre los valores frontera.

Es importante destacar que el valor de la resistencia no drenada del suelo, (S_u), se puede determinar mediante diferentes procedimientos, tales como el penetrómetro de bolsillo, la veleta de campo, ensayos de compresión sin confinamiento y ensayos triaxiales. Cada uno de estos ensayos impone una condición distinta de esfuerzo en el suelo y, por lo tanto, la resistencia obtenida también debería serlo. Este parámetro es afectado por el tamaño de la muestra, por lo que es recomendable realizar los ensayos con la mayor cantidad de material posible, sobre todo

cuando se trata de arcillas preconsolidadas con tendencia a desarrollar discontinuidades dentro de su estructura.

Los resultados de las figuras 3.7 y 3.8 permiten al ingeniero tomar decisiones con mejor información acerca del riesgo de inestabilidad de taludes pero no representan un análisis riguroso del riesgo, ya que no se incorporan factores como las grietas de tensión y las superficies de falla preexistentes, las cuales deben ser investigadas si se quiere un análisis más detallado.

Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de los taludes ya que influencia 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 el final de la estación húmeda.

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.

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.



Foto 3.2
Erosión producida por el rebose de un tanque de succión

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.

En general, los materiales con un coeficiente de uniformidad C_u (definido como el tamaño de 60% de los granos más finos del depósito) entre 2 y 5 y un tamaño promedio dado por el D_{50} que varía entre 0,02 mm y 2,0 mm son los más propensos a la licuefacción. Basado en los resultados de análisis granulométricos en suelos que sufrieron o no licuefacción durante sismos, Tsuchida (1970) propuso las granulometrías de frontera que se muestran en la figura 3.9.

El anexo A presenta una metodología para evaluar el potencial de licuefacción en depósitos granulares. Dicho procedimiento se basa en el comportamiento de depósitos granulares durante eventos sísmicos, además de los ensayos de penetración estándar (SPT), prueba de penetración de cono (CPT) y ensayos granulométricos.

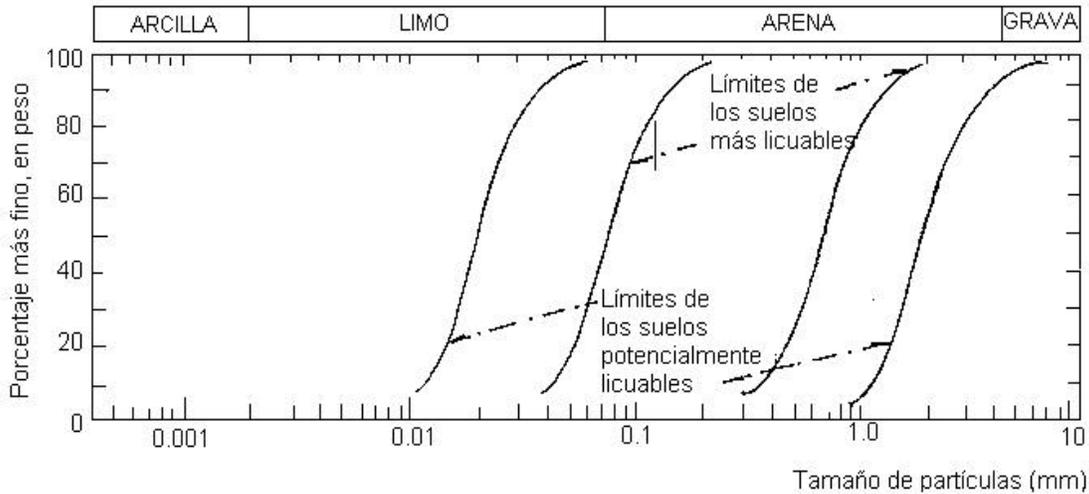


Figura 3.9
Granulometrías límites de los suelos potencialmente licuables

CARACTERIZACIÓN DEL TALUD MEDIANTE ENSAYOS

En aquellos lugares identificados como más propensos a la inestabilidad, según lo descrito anteriormente, deberá obtenerse información adicional para caracterizar mejor el subsuelo y conocer los parámetros que sirvan de base para el análisis y solución del problema.

La obtención de información consta de tres fases.

En la primera fase se debe recopilar la información disponible (oral y escrita) acerca del sitio de estudio, desde relatos de eventos pasados por parte de los lugareños, hasta estudios geológicos y geotécnicos previos, incluidos los planos topográficos, pluviosidad y sismicidad de la zona.

La segunda fase es el trabajo de campo en el cual se ejecutan ensayos en el sitio y se obtienen muestras de suelo.

La tercera fase consiste en el trabajo de laboratorio para determinar las propiedades y características del material mediante ensayos de caracterización y resistencia.

Perforaciones

Los objetivos principales de las perforaciones son definir la litología del área de estudio y tomar muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

El número y ubicación de las perforaciones a realizar en un estudio dependen del tamaño y forma del área considerada. Los criterios para determinar estas dos características básicas varían considerablemente, sobre todo en áreas planas. En el caso de taludes es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones; este número se puede incrementar dependiendo del tamaño del talud. Se puede hacer una perforación en la cresta con una profundidad aproximada de 1,5 veces la altura del talud, otra hacia la mitad del talud con una profundidad comparable con la altura de ese talud y una última al pie del mismo con una profundidad aproximada de $1/3$ de la altura mencionada (figura 3.10)

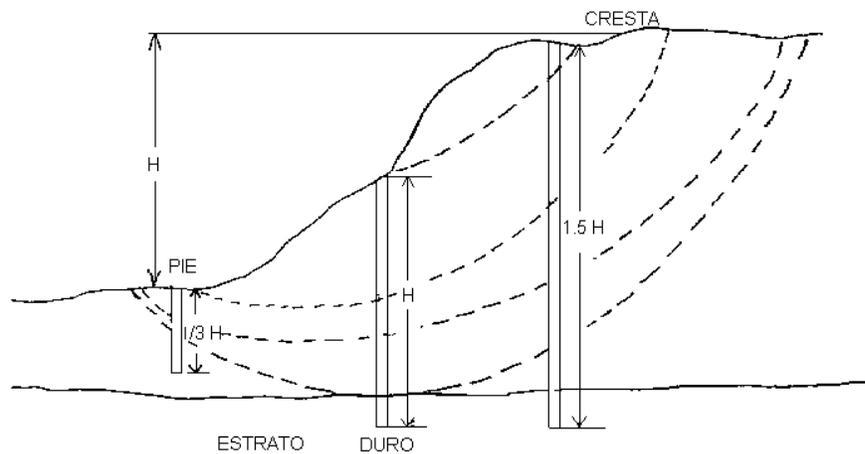


Figura 3.10
Ubicación de las perforaciones

Calicatas

Mediante las calicatas, método de exploración más superficial que el anterior, es posible tomar muestras más voluminosas de material para tener una vista “interna” del suelo y detectar posibles planos de falla (sobre todo en materiales arcillosos). Estas calicatas generalmente se excavan a mano y miden 1,5 x 1,5 x 2,0 metros de profundidad, aunque también puede utilizarse procedimientos mecánicos.



Foto 3.3 Calicatas

Ensayos de campo

En el campo se busca obtener la mayor cantidad de información posible. Para lograr este objetivo es necesario realizar los ensayos que mejor se relacionen con el suelo en cuestión, ya que a partir de ellos y mediante correlaciones desarrolladas a lo largo del tiempo se pueden inferir ciertas propiedades de los materiales en estudio. Algunos de los ensayos para la caracterización de suelos son:

- *Prueba de penetración estándar – SPT (ASTM-1586)*: La información que provee este ensayo permite determinar la densidad relativa de los suelos granulares y la consistencia de los suelos cohesivos.
- *Prueba de penetración de cono - CPT (ASTM D-3441)*: Este ensayo permite medir la resistencia a la penetración en el subsuelo, tanto de la parte inferior del cono como en las paredes de una extensión cilíndrica al mismo.

Ensayos de laboratorio

En el laboratorio se busca identificar el tipo de material con el que se está tratando y establecer los parámetros del suelo (resistencia) requeridos para los análisis posteriores.

a) Ensayos de clasificación

Lo primero que se debe realizar en el laboratorio es identificar visualmente las muestras de suelo de las perforaciones y calicatas para prever el tipo y número de ensayos posteriores. A continuación se identifican los ensayos más frecuentes para clasificar suelos:

- *Granulometría por tamizado*: para determinar la proporción del tamaño de las partículas que componen dicha muestra.
- *Hidrómetro*: tiene el objetivo determinar la distribución del agua dentro de la muestra.
- *Límites de Atterberg*: se definen arbitrariamente y determinan el contenido de humedad del suelo en diferentes estados.
- *Peso unitario*: para medir el peso del suelo en un determinado volumen.
- *Gravedad específica*: para medir la densidad de las partículas que componen el suelo.

b) Ensayo de resistencia

Los ensayos de resistencia tienen por finalidad estimar la resistencia del suelo. Para estimar la resistencia no drenada del suelo se utilizan ensayos como el penetrómetro y la veleta de bolsillo (también pueden ser realizados en campo) y los ensayos no drenados con y sin confinamiento en la cámara triaxial (más costosos). En el caso de la resistencia drenada del suelo también se puede utilizar la cámara triaxial con velocidades más bajas de aplicación de las cargas y el ensayo de corte directo. Este último generalmente se reserva para los materiales granulares.

Muestreo

El muestreo en las perforaciones depende del material que se consiga y del grado de precisión de los datos geotécnicos. Los tres métodos de muestreo más usados en la investigación geotécnica son los siguientes:

- Muestreadores de penetración *percusiva*: tales como la cuchara partida utilizada en el ensayo de SPT. Con estos muestreadores se pueden tomar muestras de la gran mayoría de los suelos.
- Muestreadores de penetración por *presión* aplicada: tales como el muestreador de pistón y el tubo Shelby (perturbación reducida), usados para recuperar materiales cohesivos de baja consistencia a medianamente alta.
- Muestreadores de penetración *rotacional*: tales como el tubo doble Dennison (diseñado especialmente para arcillas duras) y los que usan brocas de alta resistencia para perforar roca y suelos con cierto grado de litificación.

Instrumentación

En el estudio de taludes, la inestabilidad puede detectarse mediante instrumentos que se colocan en el subsuelo. Estos instrumentos, con el tiempo, revelarán ciertas características del talud que complementarán la información de los ensayos de campo y de laboratorio. Estos instrumentos son:

- Inclinómetros: establecen la posición de la superficie de falla de un deslizamiento.
- Piezómetros: miden la presión de agua intersticial que hay en un determinado nivel del subsuelo. El piezómetro de boca abierta es el más sencillo de todos y es el que se usa de preferencia en suelos granulares de alta permeabilidad. Existen piezómetros más complicados como los de hilo vibratorio y los neumáticos, recomendables para suelos cohesivos de baja permeabilidad.

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

La estabilidad de un talud natural de corte o relleno comúnmente se evalúa mediante métodos de estabilidad basados en el equilibrio límite del suelo. Estos métodos toman en cuenta los factores principales que influyen en la resistencia del suelo o masa rocosa. La cuantificación de la estabilidad de un talud se basa en el concepto de factor de seguridad; más adelante se hace una breve descripción del concepto del factor de seguridad, la determinación o estimación de los parámetros de resistencia y los métodos de análisis.

Concepto del factor de seguridad

Para ilustrar el concepto del factor de seguridad se usará la analogía de un bloque deslizante en un plano inclinado, tal como lo muestra la figura 3.11. Se tiene un plano inclinado que forma un ángulo β con la horizontal; sobre ese plano inclinado se encuentra un bloque rígido de masa M .

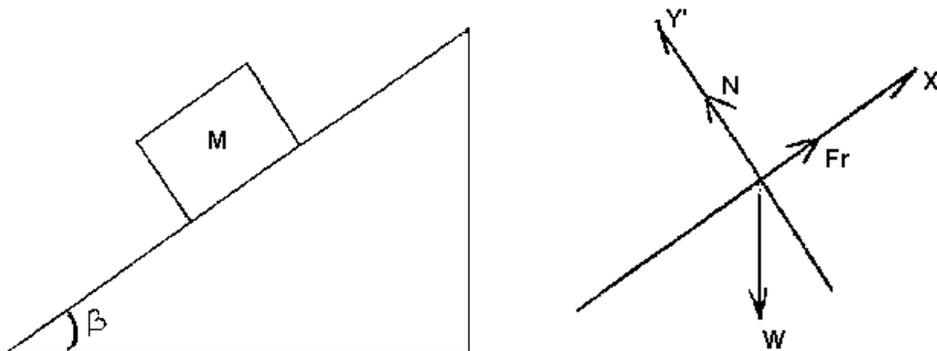


Figura 3.11
Bloque en plano inclinado y diagrama de fuerzas

Las fuerzas que actúan sobre el bloque rígido, como se muestra en la figura 3.11, son: el peso del bloque (W), la normal (N) y la fuerza de roce (F_r) entre la base del bloque y el plano inclinado. Las fuerzas que actúan en la dirección del plano inclinado (X') son la fuerza de roce (F_r) y el componente del peso en esa dirección ($W \sin\beta$). Las fuerzas que actúan en la dirección perpendicular al plano inclinado (Y') son el componente de peso en esa dirección ($W \cos\beta$) y la normal (N).

No habrá deslizamiento del bloque a lo largo del plano inclinado mientras la fuerza de roce entre el bloque y el plano sea mayor o igual que la componente del peso en esa dirección.

El factor de seguridad (FS) contra el deslizamiento del bloque viene a ser el cociente entre la fuerza de roce (F_r) y la componente del peso en la dirección del plano inclinado o se puede calcular por la ecuación:

$$F.S. = \frac{F_r}{W \cdot \sin b}$$

La fuerza resistente viene a ser la resistencia al corte del suelo y las fuerzas desestabilizadoras vienen a ser las fuerzas gravitacionales o sísmicas. Por lo tanto, para un talud, el factor de seguridad se define como el cociente entre la resistencia al corte del suelo o roca a lo largo de una superficie de falla y los esfuerzos de corte que tienden a producir deslizamiento a lo largo de esa superficie de falla (Craig 1986).

Determinación de la resistencia del suelo

Los principales parámetros que definen la resistencia del suelo son el ángulo de fricción interna en el caso de suelos granulares y la resistencia al corte no drenada en el caso de suelos cohesivos.

El ángulo de fricción interna ϕ puede estimarse en el laboratorio con el ensayo de corte directo y ensayo triaxial consolidado drenado. También existen correlaciones entre el ángulo de fricción interna ϕ y ensayos in-situ como la prueba de penetración estándar (SPT) o la prueba de penetración de cono (CPT).

La resistencia al corte no drenada (S_u) puede estimarse con ensayos de laboratorio tales como el ensayo triaxial consolidado no drenado (CIU), el ensayo sin consolidar sin drenar (UU), el ensayo de compresión sin confinar (q_u) y el ensayo de corte directo simple (DSS). Para los ensayos in-situ se puede usar la prueba de veleta de campo (FV), la prueba de penetración de cono (CPT) y el penetrómetro de bolsillo.

Las arcillas duras y altamente sobreconsolidadas fallan bajo una condición drenada porque el exceso de presión de los poros es negativo y por lo tanto a medida que este se disipa, las arcillas sobreconsolidadas se debilitan.

Las arcillas blandas y limos fallan en condiciones no drenadas porque el exceso de presión de los poros es positivo y por lo tanto la condición crítica es a corto plazo pues a medida que las arcillas disipan el exceso de presión de los poros, las mismas se consolidan y ganan resistencia.

La mayoría de los suelos granulares disipan el exceso de presión de los poros rápidamente debido a su alta permeabilidad y por lo tanto fallan en condiciones drenadas excepto cuando son sometidos a carga dinámica (sismo) cuando una falla no drenada es posible.

Resistencia al corte en limos y arcillas blandas

Como se dijo anteriormente, las arcillas blandas fallan en condiciones no drenadas. La resistencia al corte no-drenado en limos y arcillas blandas se puede medir directamente en el campo con el ensayo de veleta o en el laboratorio con un ensayo de compresión simple sin confinar. Skempton propuso la siguiente correlación para estimar la resistencia al corte no drenado.

$$Su/s'p = 0,11+0,0037 I_p$$

donde:

- I_p = es el índice de plasticidad
- σ'_p = es la presión de consolidación.

El cuadro 3.2 sirve de guía para estimar la resistencia al corte no drenado en arcillas y el ángulo de fricción en suelos granulares. (Terzaghi and Peck 1967).

Cuadro 3.2
Relación de la resistencia al corte no drenado y el ángulo de fricción

Arenas			Limos o arcillas		
Nspt	f	Densidad relativa	Nspt	Su (kg/cm ²)	Consistencia
			<2	0 – 0,12	muy blanda
0 - 4	<30	muy suelta	2 - 4	0,12 – 0,25	blanda
4 - 10	30 - 32	Suelta	4 - 8	0,25 – 0,5	media
10 - 30	32 - 35	Media	8 - 15	0,5 – 1	firme
30 - 50	35 - 38	Densa	15- 30	1 – 2	muy firme
>50	>38	muy densa	>30	>2	dura

MÉTODOS PARA ESTABILIZAR TALUDES

Tan pronto se comprueba que hay un riesgo de inestabilidad en un determinado talud, se debe buscar la mejor solución y considerar aspectos de costo, naturaleza de las obras afectadas (tanto en la cresta como al pie del talud), tiempo estimado en el que se puede presentar el problema, disponibilidad de los materiales de construcción, etc.

Existen tres grandes grupos de soluciones para lograr la estabilidad de un talud:

- *Aumentar la resistencia del suelo:* son las soluciones que aplican drenaje en el suelo para bajar el nivel freático o la inyección de sustancias que aumenten la resistencia del suelo, tales como el cemento u otro conglomerante
- *Disminuir los esfuerzos actuantes en el talud:* soluciones tales como el cambio de la geometría del talud mediante el corte parcial o total de éste a un ángulo menor o la remoción de la cresta para reducir su altura.
- *Aumentar los esfuerzos de confinamiento (S_3) del talud:* se puede lograr la estabilización de un talud mediante obras, como los muros de gravedad, las pantallas atirantadas o las bermas hechas del mismo suelo.

En la siguiente sección se discutirán diversas soluciones.

Cambio de la geometría

El cambio de la geometría de un determinado talud puede realizarse (figura 3.12) mediante soluciones tales como la disminución de la pendiente a un ángulo menor, la reducción de la altura (especialmente en suelos con comportamiento cohesivo) y la colocación de material en la base o pie del talud (construcción de una berma); en esta última solución es común usar material de las partes superiores del talud.

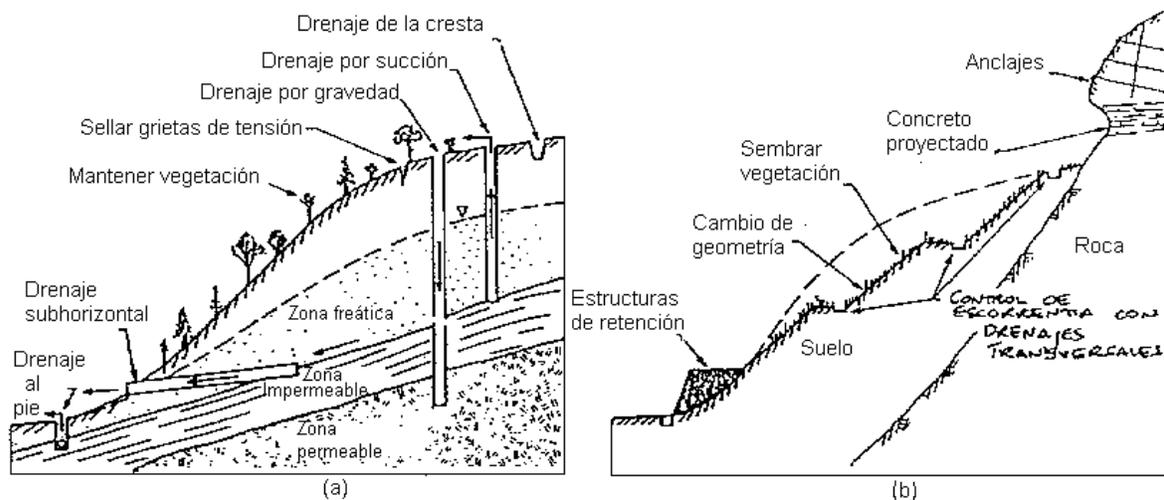


Figura 3.12

Métodos para estabilizar un talud: (a) drenaje; (b) cambio de la geometría (Hunt 1984)

La consecuencia directa de realizar un cambio favorable en la geometría de un talud es disminuir los esfuerzos que causan la inestabilidad y, en el caso de la implantación de una berma, el aumento de la fuerza resistente. Es importante destacar que la construcción de una berma al pie de un talud debe tomar en cuenta la posibilidad de causar inestabilidad en los taludes que se encuentren debajo, además, se deben tomar las provisiones para drenar el agua que pueda almacenarse dentro de la berma, ya que es probable que pueda haber un aumento de la presión de los poros en los sectores inferiores de la superficie de falla, lo que acrecienta la inestabilidad.

Drenaje

La presencia de agua es el principal factor de inestabilidad en la gran mayoría de las pendientes de suelo o de roca con mediano a alto grado de meteorización. Por lo tanto, se han establecido diversos tipos de drenaje con diferentes objetivos (figura 3.22). A continuación se exponen los tipos de drenaje más usados para estabilizar taludes.

- *Drenajes subhorizontales*: son métodos efectivos para mejorar la estabilidad de taludes inestables o fallados. Consiste en tubos de 5 cm o más de diámetro, perforados y cubiertos por un filtro que impide su taponamiento por arrastre de finos. Se instalan con una pequeña pendiente hacia el pie del talud, penetran la zona freática y permiten el flujo por gravedad del agua almacenada por encima de la superficie de falla. El espaciamiento de estos drenajes depende del material que se esté tratando de drenar y puede variar desde tres a ocho metros en el caso de arcillas y limos, hasta más de 15 metros en los casos de arenas más permeables.
- *Drenajes verticales*: se utilizan cuando existe un estrato impermeable que contiene agua emperchada por encima de un material más permeable con drenaje libre y con una presión hidrostática menor. Los drenajes se instalan de manera que atraviesen completamente el estrato impermeable y conduzcan el agua mediante gravedad, por dentro de ellos, hasta el estrato más permeable, lo que aliviará el exceso de presión de los poros a través de su estructura.
- *Drenajes transversales o interceptores*: se colocan en la superficie del talud para proporcionar una salida al agua que pueda infiltrarse en la estructura del talud o que pueda producir erosión en sus diferentes niveles. Las zonas en las que es común ubicar estos drenajes son la cresta del talud para evitar el paso hacia su estructura (grietas de tensión), el pie del talud para recolectar aguas provenientes de otros drenajes y a diferentes alturas del mismo

- *Drenajes de contrafuerte*: consiste en la apertura de zanjas verticales de 30 a 60 cm de ancho en la dirección de la pendiente del talud para rellenarlas con material granular altamente permeable y con un alto ángulo de fricción ($>35^\circ$). La profundidad alcanzada deberá ser mayor que la profundidad a la que se encuentra la superficie de falla para lograr el aumento de la resistencia del suelo no solo debido al aumento de los esfuerzos efectivos gracias al drenaje del agua que los reducía, sino también al aumento del material de alta resistencia incluido dentro de las zanjas.

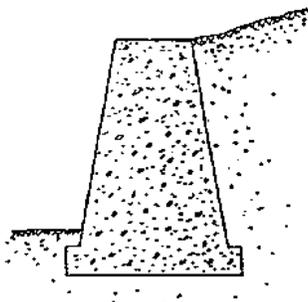
Esta solución puede ser útil y de bajo costo en el caso de taludes hechos con materiales de baja resistencia, tales como arcillas y limos blandos o con presencia de materia orgánica en descomposición que tengan entre tres y ocho metros de altura y superficies de falla que no pasen de los cuatro metros.

Soluciones estructurales

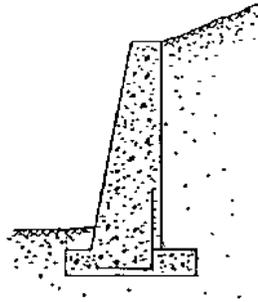
Este tipo de soluciones generalmente se usa cuando hay limitaciones de espacio o cuando resulta imposible contener un deslizamiento con los métodos discutidos anteriormente. El objetivo principal de las estructuras de retención es incrementar las fuerzas resistentes de forma activa (peso propio de la estructura, inclusión de tirantes, etc.) y de forma pasiva al oponer resistencia ante el movimiento de la masa de suelo.

Entre las soluciones estructurales más usadas se encuentran las siguientes:

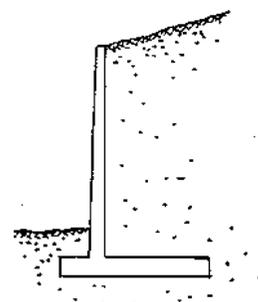
- *Muros de gravedad y en cantiliver*: la estabilidad de un muro de gravedad (figura 3.13 a y b) se debe a su peso propio y a la resistencia pasiva que se genera en la parte frontal del mismo. Las soluciones de este tipo son antieconómicas porque el material de construcción se usa solamente por su peso muerto, en cambio los muros en cantiliver (figura 3.13 c), hechos de concreto armado, son más económicos porque son del mismo material del relleno, el que aporta la mayor parte del peso muerto requerido.



a) Muro de gravedad



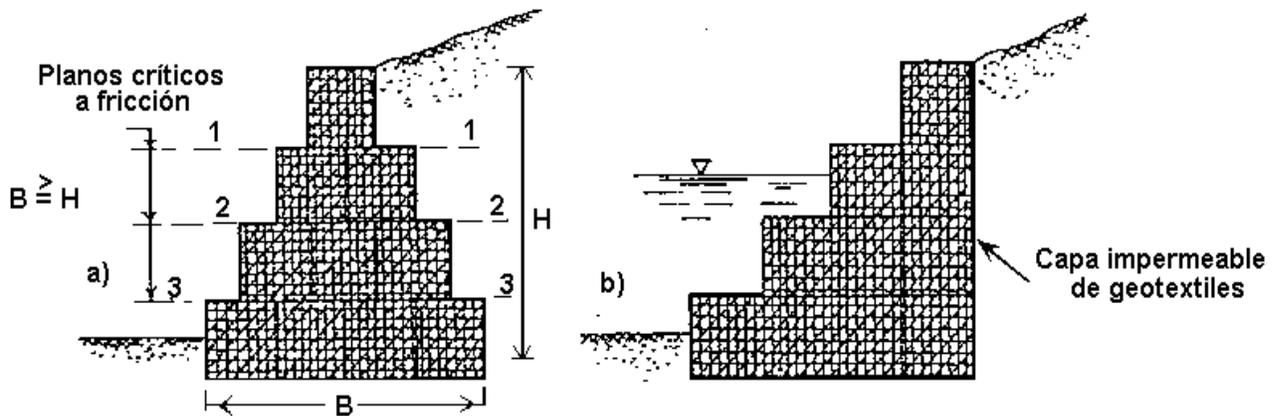
b) Muro de semigravedad



c) Muro en Cantiliver

Figura 3.13
Muros

Se debe tener en cuenta que al poner una estructura con un material de muy baja permeabilidad, como el concreto, al frente de un talud de suelo que almacene agua en su estructura, es muy probable que aumente la presión hidrostática en la parte posterior del muro. Para evitar este problema se debe colocar drenajes subhorizontales a diferentes alturas del muro con el objetivo de disipar el exceso de presión. Un tipo de muro de gravedad que ayuda en este aspecto, es el muro de gavión que al no tener ningún agente cohesionante más que la malla que une los gaviones, permite el paso de agua a través de los mismos. Estos muros además de ser comparativamente económicos, tienen la ventaja de tolerar grandes deformaciones sin perder resistencia.



Perfiles de muros de gaviones

Figura 3.14
Muros de gavión

- *Pantallas*: consisten de una malla metálica sobre la cual se proyecta concreto (shotcrete) recubriendo toda la cara del talud. Es común “atirantar” esta corteza de concreto armado mediante anclajes que atraviesan completamente la superficie de falla para posteriormente ser tensados y ejercer un empuje activo en dirección opuesta al movimiento de la masa de suelo. La figura 3.15 muestra el corte típico de una pantalla atirantada.



Figura 3.15
Sección transversal y frontal de una pantalla