



**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:

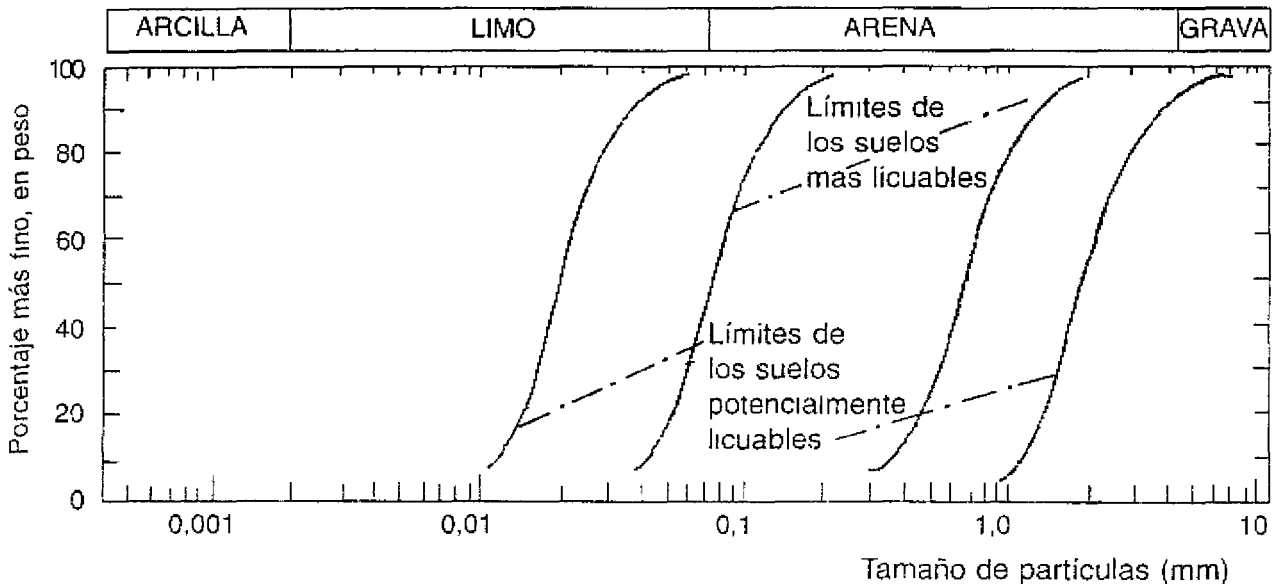
1. la granulometría (tamaño, gradación y forma de granos);
2. la densidad relativa del depósito.

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.

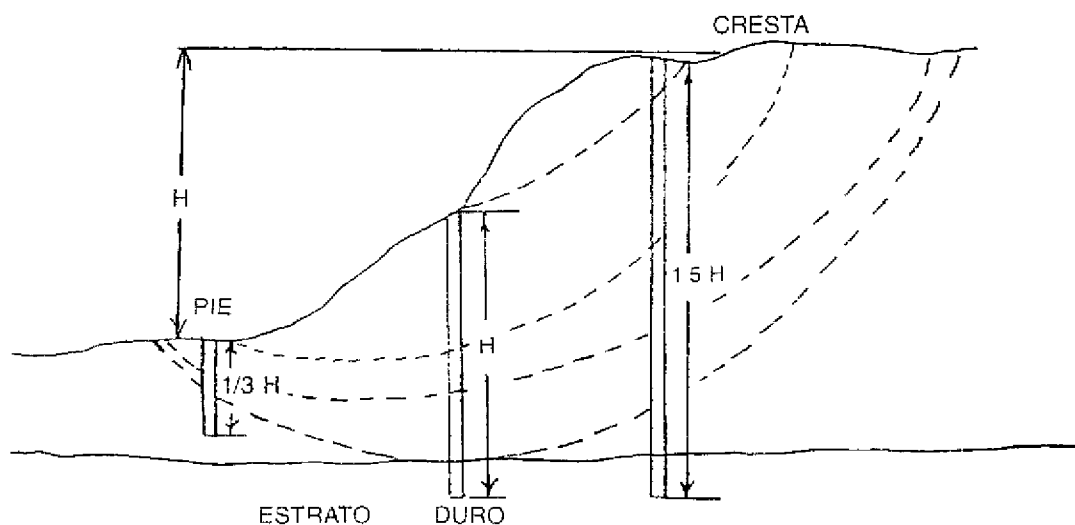
La segunda fase es el trabajo de campo en el cual se ejecutan ensayos en el sitio y se obtienen muestras de suelo.

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.

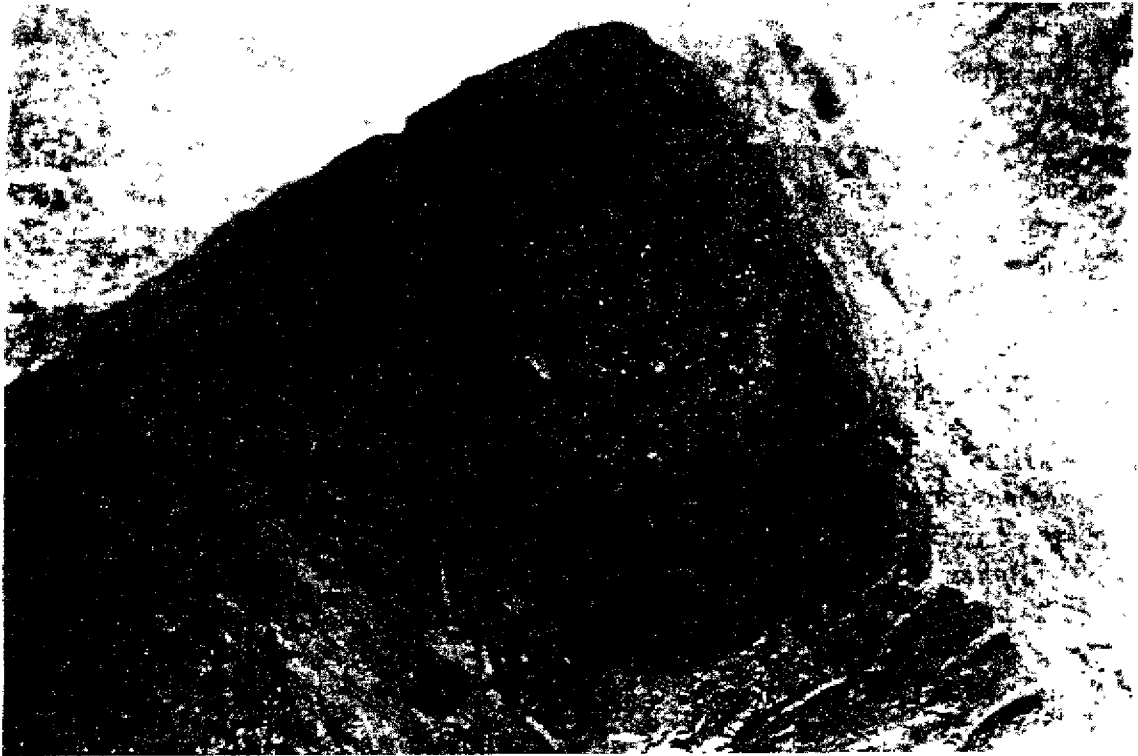


Foto 3.3  
Calicatas

## 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:

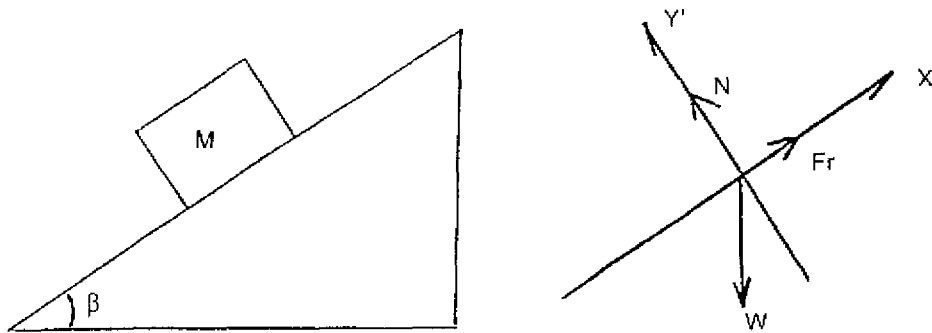
- Inclínómetros: establecen la posición de la superficie de falla de un deslizamiento.
- Piezómetros: miden la presión de agua intersticial que hay en un determinado nivel del subsuelo. El piezómetro de boca abierta es el más sencillo de todos y es el que se usa de preferencia en suelos granulares de 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  $\beta$  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 ( $W \cdot \text{sen}\beta$ ). Las fuerzas que actúan en la dirección perpendicular al plano inclinado ( $Y'$ ) son el componente de peso en esa dirección ( $W \cdot \text{cos}\beta$ ) 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.

$$\text{F.S.} = \frac{F_r}{W \cdot \text{sen}\beta}$$

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  $\phi$  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  $\phi$  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.

$$S_u/s'_p = 0,11 + 0,0037 I_p$$



donde:

$I_p$  = es el índice de plasticidad

$\sigma'_p$  = 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	$\phi$	Densidad relativa	Nspt	Su (kg/cm <sup>2</sup> )	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 ( $\sigma_3$ ) 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.

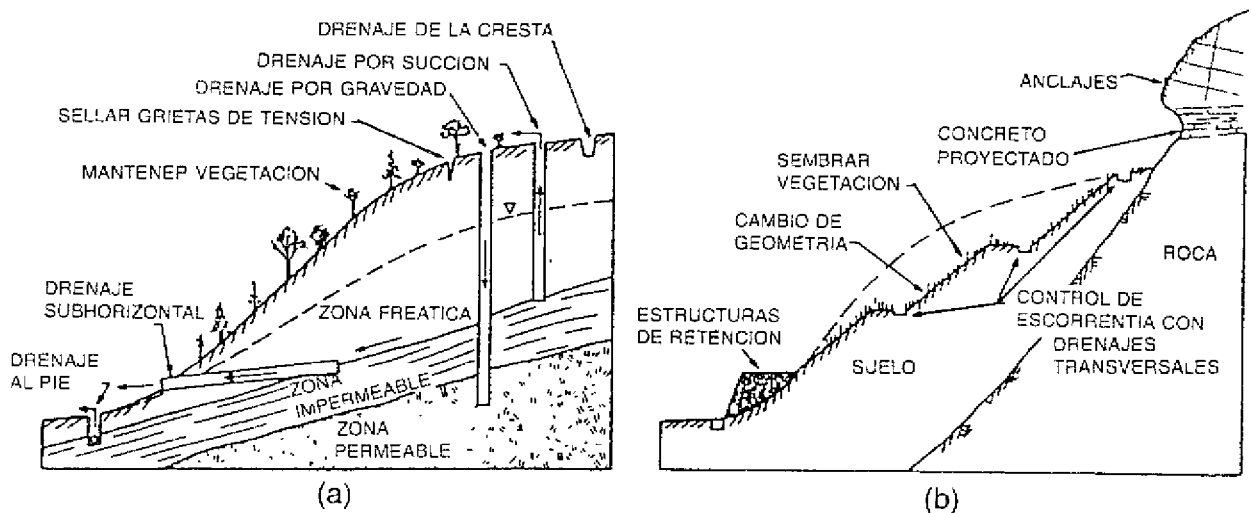


Figura 3.12

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 previsiones 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.

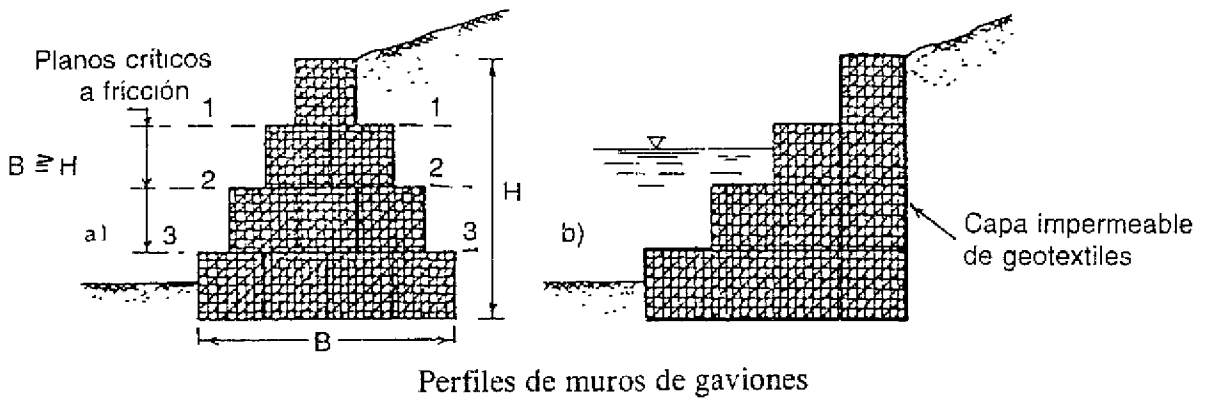
Entre las soluciones estructurales más usadas se encuentran las siguientes:

- *Muros de gravedad y en cantilever:* 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 cantilever (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.



**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.



**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**