Las obras pueden ser definitivas o pueden ser temporales de acuerdo al método utilizado.

Generalmente en la estabilización de deslizamientos se emplean sistemas combinados que incluyen dos o más tipos de control de los indicados anteriormente; en todos los casos debe hacerse un análisis de estabilidad del talud ya estabilizado y se debe llevar un seguimiento del proceso durante la construcción y algunos años después.

Escogencia del factor de seguridad

Otra decisión que afronta el Ingeniero es la decisión sobre el factor de seguridad. Una idea general de los factores a emplear permiten recomendar los siguientes factores de seguridad mínimos:

Tabla 12.9 Criterios para seleccionar un factor de seguridad para diseño de taludes.

Caso	Factor de Seguridad
Si puede ocurrir la pérdida de vidas humanas al fallar el talud	1.7
Si la falla puede producir la pérdida de más del 30% de la inversión de la obra específica o pérdidas consideradas importantes.	1.5
Si se pueden producir pérdidas económicas no muy importantes.	1.3
Si la falla del talud no causa daños.	1.2

12.3 PREVENCION

Los riesgos debidos a deslizamientos de tierra se pueden reducir utilizando cuatro estrategias así (Kockelman 1986):
a. Restricciones al desarrollo en áreas susceptibles a deslizamientos
b. Códigos para excavaciones, explanaciones, paisajismo y construcción.
c. Medidas físicas tales como drenaje, modificación de la geometría y estructuras para prevenir o controlar los deslizamientos o los fenómenos que los pueden producir.
d. Desarrollo de sistemas de aviso o alarma.

Los métodos de mitigación o prevención de amenaza pueden reducir en forma importante la ocurrencia de deslizamientos.
La prevención permite el manejo de áreas relativamente grandes, teniendo en cuenta que los procesos naturales pueden ocurrir en diversos sectores dentro de un área de susceptibilidad similar, en forma repetitiva o múltiple. La mejor estrategia para la reducción de amenaza de deslizamiento, generalmente, envuelve una mezcla de varias técnicas o sistemas en donde se requiere la cooperación de geólogos, ingenieros, planeadores, propietarios de la tierra, constructores, organizaciones financieras y de seguros y entidades del Estado.
Para el diseño de un programa adecuado de prevención se requiere, de acuerdo al U.S. Geological Survey (1982), tener en cuenta los siguientes elementos:

a. Una base técnica completa de las amenazas y riesgos.
b. Un grupo técnico capaz de interpretar y manejar la información existente.
c. Entidades del Estado conocedoras y conscientes de los problemas.
d. Una comunidad que comprenda el valor y los beneficios de estos programas.

Se necesitan entonces dos elementos principales: Una base técnica completa y confiable sobre las amenazas y riesgos y un Estado y comunidad conscientes de los problemas y del beneficio de los programas de prevención.

12.4 RESTRICCIONES AL DESARROLLO DE AREAS DE RIESGO

Uno de los métodos más efectivos y económicos de reducir pérdidas por deslizamientos, es la planificación de nuevos desarrollos, dedicando las áreas susceptibles a deslizamientos como áreas abiertas o verdes o de baja intensidad de uso. La mayoría de los países y ciudades tienen legislación que permite la planificación mediante códigos de urbanismo o ambientales.
En ocasiones se requiere recurrir a evacuar áreas ya utilizadas o urbanizadas, mediante adquisición de la tierra y propiedades por parte del Estado y relocalización de los habitantes y sus viviendas. Sin embargo, el método más efectivo es el de evitar desarrollos de áreas susceptibles, el cual se puede obtener mediante varios sistemas:

1. Políticas de disuasión

a. Programas de información pública
Es importante que la ciudadanía tenga información sobre las amenazas de deslizamiento, en tal forma que ellos mismos actúen como sistema de control, evitando las inversiones en estas áreas.
b. Manejo de escrituras o certificados de propiedad
En algunas regiones existen normas que obligan a las personas que vendan propiedades en áreas con susceptibilidad a los deslizamientos o a las inundaciones, que especifiquen claramente en forma escrita a los potenciales propietarios de las amenazas geológicas a que están expuestos.
c. Negación de los servicios públicos
Los Gobiernos locales pueden prohibir la construcción de servicios públicos, tales como acueducto, alcantarillado, energía eléctrica, vías, etc., en áreas susceptibles a deslizamientos.
d. Avisos públicos
El Estado puede colocar vallas o avisos que alerten a la población sobre las amenazas en una determinada área.
e. Adquisición de Propiedades por parte del Estado
Las agencias del estado pueden comprar las propiedades o áreas amenazadas para su utilización como espacios abiertos o para la construcción de obras de estabilización.
f. Negación de créditos
Las entidades financieras pueden establecer políticas para negar los créditos para el desarrollo de áreas amenazadas.
g. Costos de seguro
Las entidades financieras podrían colocar precios muy altos a los seguros para desanimar la inversión en áreas de riesgo.
h. Impuestos
El Estado puede establecer impuestos altos que desanimen el desarrollo de áreas amenazadas.

2. Regulaciones al uso de la tierra

La regulación al uso de la tierra es generalmente, manejada por el Estado el cual puede prohibir usos específicos u operaciones que puedan causar falla de los taludes, tales como la construcción de carreteras, urbanizaciones o edificios, sistemas de irrigación, tanques de acumulación de agua, disposición de desechos, etc.

En Colombia el Código de Recursos Naturales permite a las autoridades ambientales establecer distritos de manejo integrado para la prevención de amenazas naturales y las ciudades tienen Códigos de urbanismo para regular los nuevos desarrollos. Sin embargo, se requiere una mayor conciencia ciudadana sobre las amenazas y que estas sean tenidas en cuenta en la elaboración de las regulaciones de uso de la tierra.

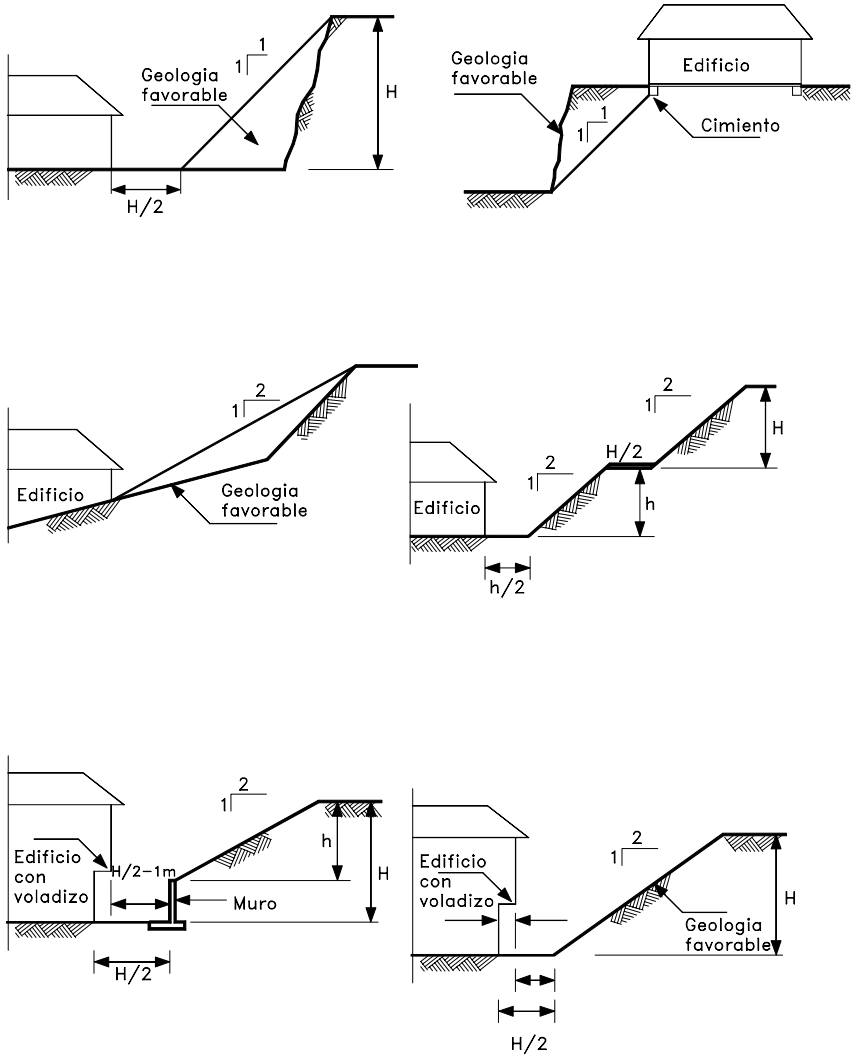

Figura 12.1 Requisitos y aislamientos para taludes urbanos en la ciudad de Los Angeles

3. Códigos técnicos para el manejo de taludes

Algunas ciudades como Hong Kong han elaborado códigos específicos para el manejo de taludes, en los cuales se especifican los parámetros técnicos para el diseño y construcción de obras de estabilización. El uso de códigos técnicos se está extendiendo en los últimos años y algunas ciudades en Colombia han adoptado este sistema con gran éxito.

En el caso de Bucaramanga-Colombia el Código es manejado por las autoridades ambientales en forma independiente pero concertada con las entidades de planificación y desarrollo (C.D.M.B. 1995). En este código se establecen regulaciones y normas para los siguientes aspectos:

- Requisitos para la presentación de proyectos que envuelvan modificaciones del terreno.
- Parámetros mínimos para la elaboración de estudios geotécnicos y de estabilidad.
- Aislamientos mínimos de pie y corona de taludes, cauces de quebradas, colectores de alcantarillado, etc.
- Procedimientos para el manejo y estabilización de taludes, tales como muros de contención, control de aguas superficiales y subterráneas.
- Normas para el control de fondo y lateral de cauces.
- Requisitos para la construcción de vías en áreas susceptibles, rellenos en tierra y disposición de escombros.

En algunas ciudades la experiencia local ha permitido la expedición de códigos por las oficinas de planeación . Generalmente, los códigos lógicamente tienden a sobrediseñar y los factores de seguridad de estos taludes son altos.
La ciudad de Los Angeles representa un ejemplo impresionante del uso de estos códigos, en cuanto a la disminución de la ocurrencia de deslizamientos de tierra, los cuales disminuyeron después de 1963, fecha en que se implementó el código, a un 10% de las fallas que ocurrían antes del código, para un periodo invernal de condiciones similares (Figura 12.1).

4. Medidas de aviso y alarma

Las áreas propensas a deslizamientos pueden instrumentarse para prevenir o avisar sobre la ocurrencia de un fenómeno y pueden establecerse programas de información a la comunidad sobre la eventualidad de un determinado deslizamiento. Los sistemas de observación de campo usan extensómetros, inclinómetros, piezómetros, cercas eléctricas y disyuntores. Las recientes innovaciones (Schuster y Kockelman, 1996), incluyen instrumentos acústicos, televisión, radar, rayos láser y medidores de vibración, los cuales pueden ser telemanejados desde una estación central recibidora.

En ciudades como Hong Kong existe sistemas de instrumentación de lluvias y niveles freáticos manejados por un computador central que permite dar aviso de la posibilidad de ocurrencia de grandes deslizamientos. Durante las tormentas la Oficina de Control Geotécnico de Hong Kong opera en un sistema de emergencia para proporcionar aviso y tomar medidas de control (Geotechnical Control Office, 1985).

Los sistemas de monitoreo y alarma son instalados con el objetivo principal de proteger vidas y propiedades y no de prevenir deslizamientos. Sin embargo, estos sistemas en ocasiones permiten un tiempo suficiente después del aviso para construir medidas físicas de control que reducen la amenaza a largo plazo.

12.5 METODOS DE ELUSION DE LA AMENAZA

Previamente a la aplicación de un método de elusión debe estudiarse la posibilidad de aplicación de sistemas de estabilización en los aspectos técnicos y económicos.
No es una buena práctica de ingeniería el tratar de eludir los problemas antes de intentar resolverlos.
La presencia de deslizamientos de gran magnitud difíciles de estabilizar es un argumento de gran peso para sustentar un proceso de elusión. Debe tenerse en cuenta que en ocasiones estos deslizamientos son movimientos antiguos, los cuales han sido disfrazados por procesos nuevos de meteorización, erosión o por vegetación o actividades humanas. La no-detección de estos grandes deslizamientos en la fase de planeación puede acarrear costos muy altos en el momento de la construcción.
En el caso de talus o coluviones producto de antiguos movimientos, cualquier corte o cambio de las condiciones de precaria estabilidad pueden generar nuevos movimientos.

Construcción de variantes

Al reconocer y cuantificar un deslizamiento puede resultar más ventajoso para el proyecto, el modificarlo para evitar la zona problema. Para aplicar este método correctamente se requiere un conocimiento geológico y geotécnico muy completo de la zona, que permita concluir que no es técnica o económicamente viable la utilización de un sistema de estabilización y que es recomendable la elusión del problema, modificando el proyecto, construyendo una variante vial, etc.

Remoción total de la masa de los deslizamientos o los materiales inestables

Cuando no es posible la construcción de una variante se puede considerar el remover total a parcialmente los materiales de los deslizamientos antiguos o con riesgo de activación. La remoción de materiales inestables va desde el descapote o remoción de los primeros metros de suelo hasta la eliminación de todo el material inestable. Generalmente, hay limitaciones prácticas al empleo de este método por los volúmenes de tierra que se requiere manejar y la falta de espacio para colocar esta tierra, teniendo en cuenta sus efectos ambientales.

En terraplenes a media ladera se acostumbra remover la totalidad de la capa subsuperficial de materiales inestables previamente a la colocación del terraplén.
En taludes en roca es muy común la remoción de los bloques inestables de material. Esto puede incluir la remoción de la roca acumulada sobre las gradas, la conformación de la superficie y la remoción de salientes, utilizando explosivos.
La remoción de roca puede ser muy peligrosa para los operarios que hacen el trabajo, así como para personas en áreas cercanas, vehículos, etc.
Generalmente, se requiere suspender el tráfico en las vías para remover los bloques de roca y construir estructuras de protección para las obras existentes en áreas cercanas.

Construcción de puentes

Una alternativa utilizada con alguna frecuencia es la de construir puentes o estructuras para pasar por encima de los materiales inestables (Holtz y Schuster 1996). Estos puentes generalmente, deben apoyarse en pilas profundas sobre roca o suelo competente por debajo de los materiales inestables.
Se deben realizar estudios muy completos para estar seguros que la profundidad y el sistema de cimentación son suficientes para garantizar la estabilidad del puente. Las pilas deben diseñarse para resistir las cargas laterales, las cuales son muy difíciles de predecir.

Los puentes pueden ser una solución muy atractiva en terrenos montañosos de alta pendiente donde las excavaciones generarían taludes demasiado altos. Esta alternativa es muy utilizada en algunos países europeos como Austria, Italia y Noruega.

Modificación del nivel de la subrasante, cota del proyecto o alineamiento

En la etapa de diseño la modificación del nivel de la subrasante de un proyecto vial puede resultar en profundidades mucho menores de cortes que darían una mayor estabilidad a los taludes. En estos casos el Ingeniero geotecnista debe trabajar conjuntamente con el ingeniero de trazado vial para lograr un equilibrio entre la estabilidad y las características del proyecto. Generalmente es más efectivo y económico modificar las características del diseño ,que construir obras de estabilización de deslizamientos.
La modificación puede incluir el cambio del proyecto en planta como cambiar el radio o localización de una curva o separar el proyecto del talud.

12.6 METODOS DE ESTRUCTURAS DE CONTROL DE MOVIMIENTOS

Los métodos de protección están dirigidos a la construcción de estructuras para evitar que la amenaza genere riesgos.

Protección contra caídos de roca

Un método efectivo de minimizar la amenaza de caídos de roca es permitir que ellas ocurran pero controlarlas adecuadamente, utilizando sistemas de control en el pie del talud, tales como trincheras, barreras y mallas. Un detalle común a todas estas estructuras es el de sus características de absorción de energía, bien sea parando el caído de roca en una determinada distancia o desviándola de la estructura que está siendo protegida.
Es posible utilizando técnicas apropiadas, controlar el riesgo de los caídos de roca de tamaño de hasta 2 o 3 metros de diámetro. La selección y el diseño de un sistema apropiado de control de caídos de roca requiere de un conocimiento muy completo del comportamiento del caído.

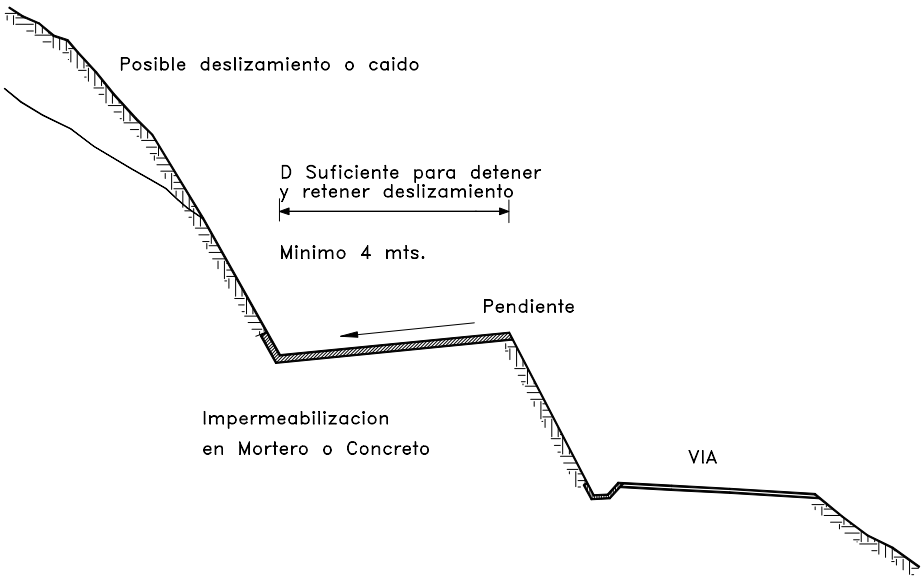

Figura 12.2 Bermas para detener caídos o derrumbes de roca o suelo.

Los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de estas estructuras son los siguientes:

a. Trayectoria de las piedras.
b. Velocidad.
c. Energía de impacto.
d. Volumen total de acumulación.

Existen programas de computador que simulan el comportamiento de los caídos (Piteau, 1980;Wu, 1984 y Pfeiffer , 1990). Estos programas requieren de datos de entrada referentes a la topografía, irregularidades de la superficie, características de atenuación de los materiales del talud, tamaño y forma de los bloques, etc.

De acuerdo a las características de los caídos, se pueden diseñar varios tipos de obra, así:

a. Bermas en el talud

La excavación de bermas intermedias puede aumentar la amenaza de caídos. Los caídos tienden a saltar en las bermas; sin embargo el diseño de bermas anchas puede ser muy útil para ciertos casos de caída, especialmente de residuos de roca.

b. Trincheras

Una trinchera o excavación en el pie del talud puede impedir que la roca afecte la calzada de una vía y representa una solución muy efectiva cuando existe espacio adecuado para su construcción.

El ancho y profundidad de las trincheras está relacionado con la altura y la pendiente del talud (Ritchie, 1963). En los taludes de pendiente superior a 75 grados, los bloques de roca tienden a permanecer muy cerca de la superficie del talud y para pendientes de 55 a 75 grados tienden a saltar y rotar, requiriéndose una mayor dimensión de la trinchera.

Para pendientes de 40 a 55 grados los bloques tienden a rodar y se requiere de una pared vertical junto a la trinchera para que los bloques no traten de salirse. Cuando hay discontinuidades en la superficie del talud se debe analizar a detalle la dinámica de los caídos para un correcto diseño de las trincheras.

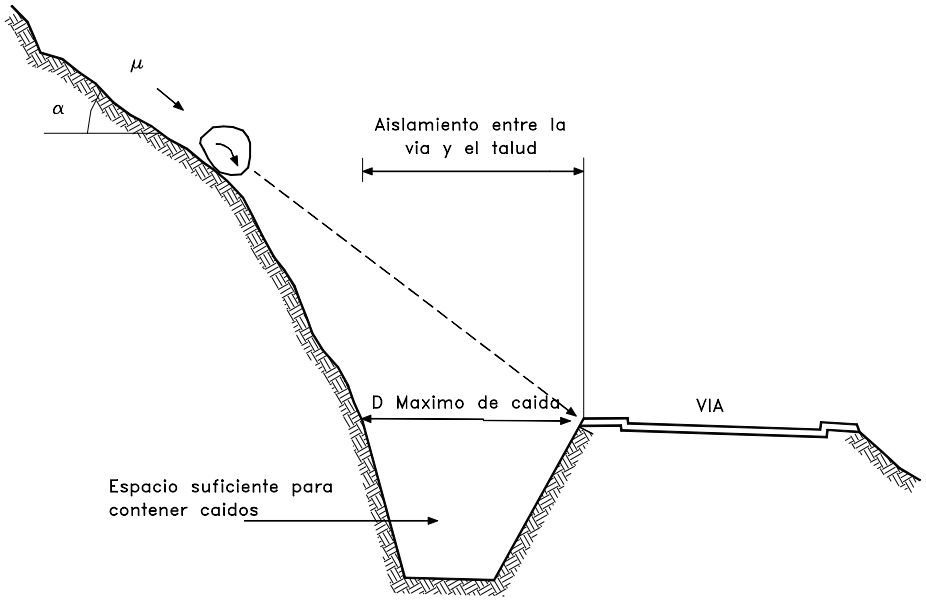

Figura 12.3 Trincheras para control de flujos caídos o avalanchas

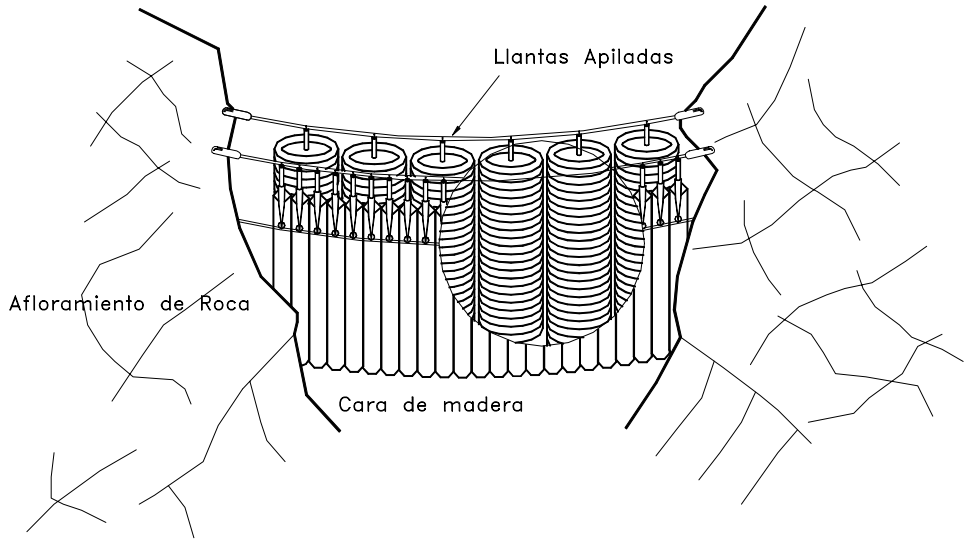

Figura 12.4 Esquema de un atenuador de caídos de roca utilizando llantas usadas (Colorado Department of Transportation).

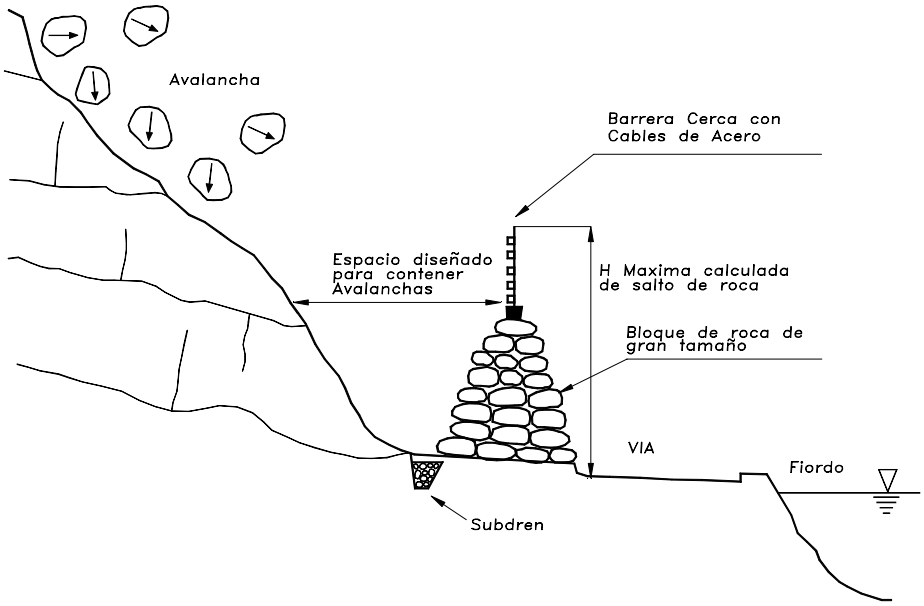

Figura 12.5 Barreras en roca para control de avalanchas utilizadas en Noruega.

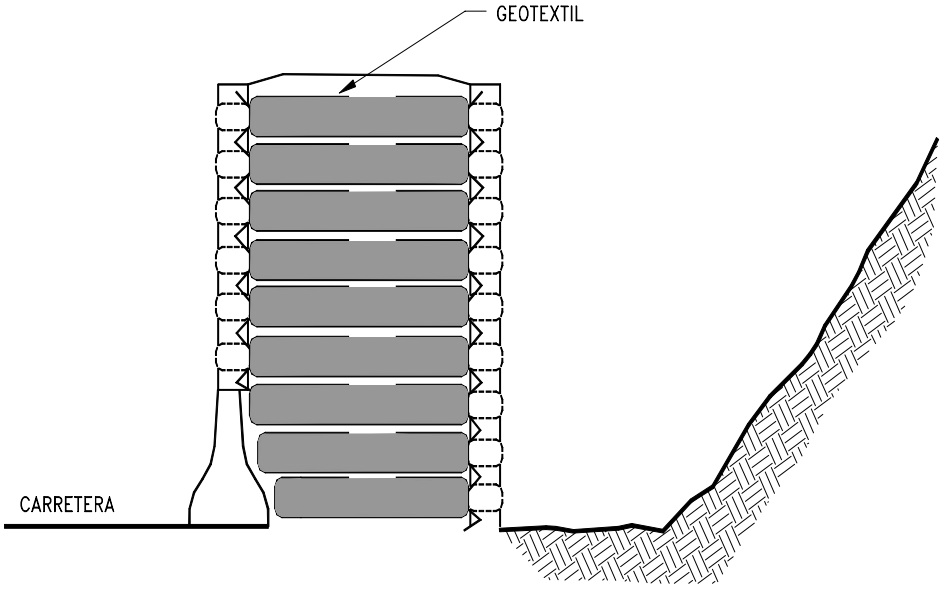

Figura 12.6 Barreras de tierra armada con geotextil para protección contra caídos y avalanchas.

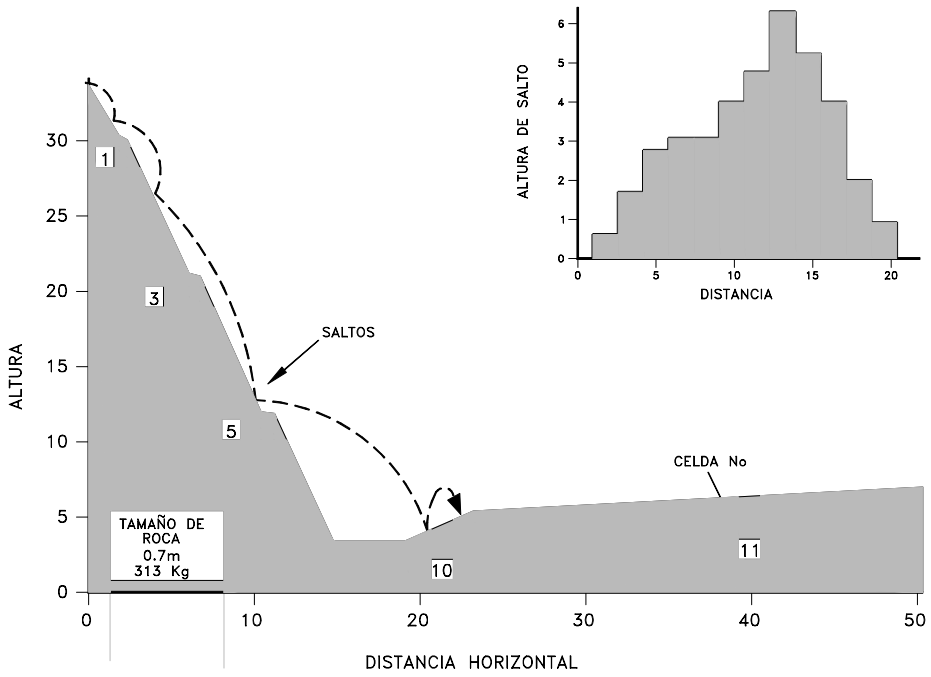

Figura 12.7 Ejemplo del uso del Software CRP5 para analizar el punto de caida de bloques de roca (Pfeiffer y Bowen, 1989).

c. Barreras

Existe una gran variedad de barreras de protección y sus características y dimensiones dependen de la energía de los caídos. Las barreras pueden ser de roca, suelo, tierra armada, muros de concreto, pilotes, gaviones, bloques de concreto o cercas. La barrera generalmente, produce un espacio o trinchera en el pie del talud que impide el paso del caído. Existen programas de Software para determinar el punto de caída de los bloques (Figura 12.7). Actualmente en el mercado se consiguen geofabricas y mallas especiales para la atenuación del impacto de los bloques de roca. La idea general es absorber la energía de los bloques.

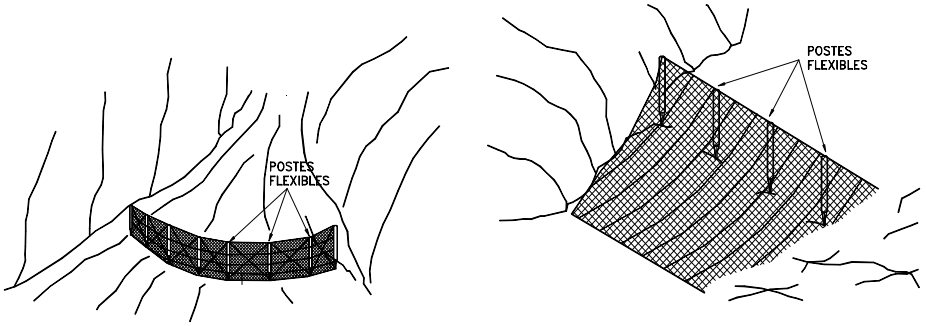

Figura 12.8 Mallas para detener rocas (Barrett y White, 1991).

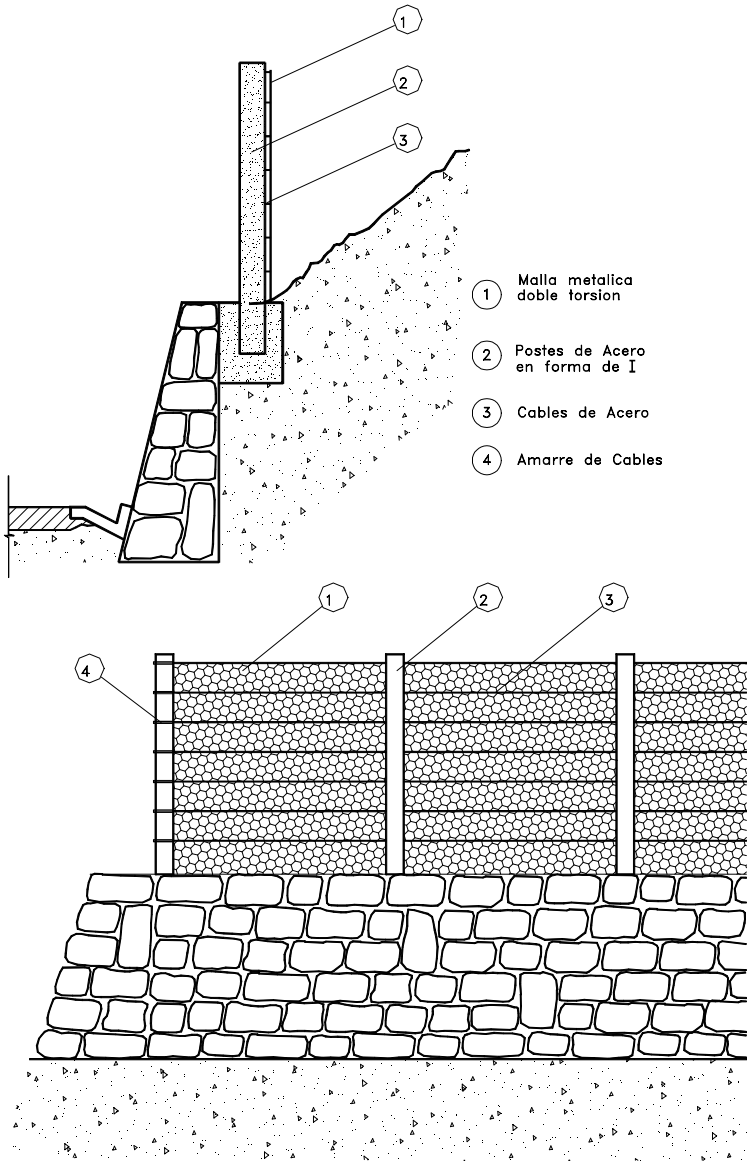

Figura 12.9 Sistema de barrera metálica con cables de acero, para control de caídos de bloques de roca (Gaviones Maccaferri).

d. Cubiertas de protección

Cuando existe la amenaza de caídos de roca en taludes de alta pendiente se puede plantear la construcción de cubiertas de protección, las cuales consisten en estructuras de concreto armado, inclinadas a una determinada pendiente para permitir el paso de los caídos, flujos a avalanchas sobre ellas (Figura 12.10).

Para el diseño de estas estructuras se requiere calcular las cargas de impacto y el peso de los materiales que eventualmente van a pasar o a retenerse sobre la estructura.

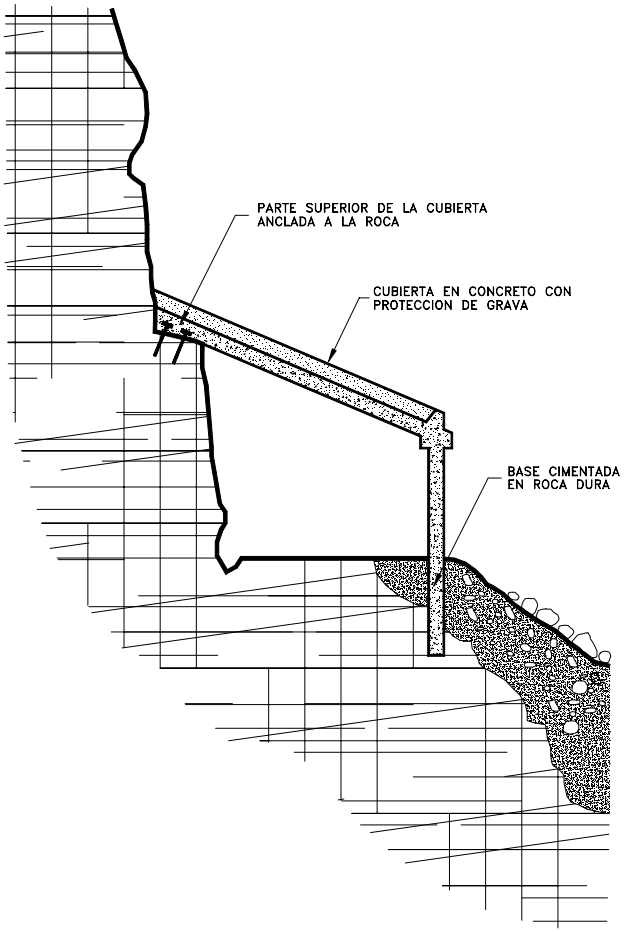

Figura 12.10 Cubierta de protección contra caídos de roca, flujos o avalanchas.

12.7 MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DELSUELO

Inyecciones

Se han intentado varios esquemas para el control de deslizamientos con diversos productos químicos.

Las inyecciones de diversos productos químicos es utilizado para mejorar la resistencia o reducir la permeabilidad de macizos rocosos y en ocasiones de suelos permeables. Las inyecciones pueden consistir de materiales cementantes, tales como el cemento y la cal o de productos químicos tales como silicatos, ligninos, resinas, acrylamidas y

uretanos. Generalmente, las inyecciones de cemento o de cal se utilizan en suelos gruesos o en fisuras abiertas y los productos químicos en materiales menos permeables.

Antes de decidir sobre la utilización de una inyección, debe investigarse que el material realmente pueda penetrar dentro de los vacíos o fisuras. Esto puede determinarse en términos de la relación de inyectabilidad definido como:

$N = D_{15}(\text{suelo}) / D_{85}(\text{inyección})$

Esta relación debe ser mayor de 25 para garantizar que la inyección penetre la formación en forma exitosa. Si la relación de inyectabilidad es menor de 11 no es posible realizar el trabajo de inyección.

La penetrabilidad de las inyecciones químicas depende de su viscosidad, presión de inyección y periodo de inyección, así como la permeabilidad del suelo inyectado (Bodocsi y Bourers, 1991).

Los suelos con materiales de más de 20% de finos generalmente, no son inyectables incluso por productos químicos.

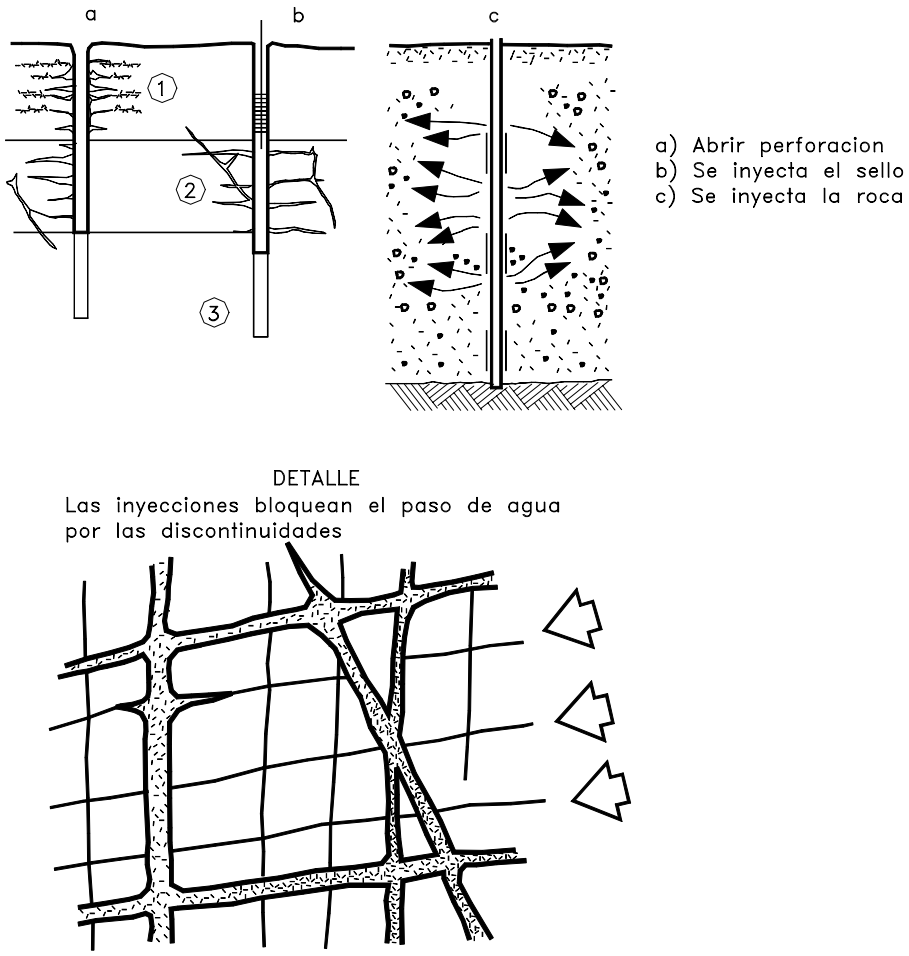

Figura 12.11 Inyecciones para estabilización de taludes.

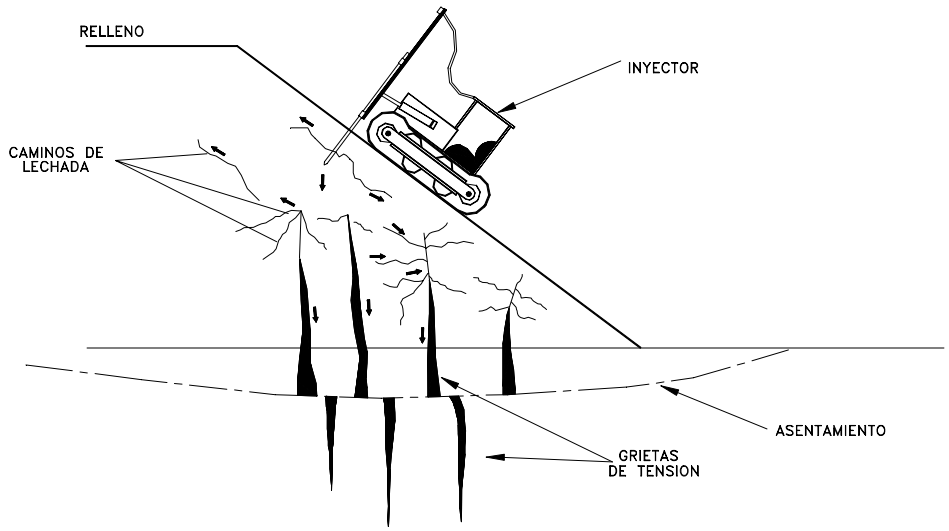

Figura 12.12 Inyección de terraplenes para rellenar y cementar grietas internas.

Los más usados son el cemento y la cal, ya sea en forma de inyección o colocándolo en perforaciones sobre la superficie de falla. El efecto de la inyección es el de desplazar el agua de los poros y fisuras y en esta forma producir una disminución de la humedad, así como cementar los poros de fisuras. El mortero de inyección se endurece y crea un esqueleto alrededor de las áreas de suelo o roca.
La presión de inyección debe ser mayor que el producido por el sobrepeso de suelo y agua para permitir la penetración dentro de las fisuras y a lo largo de una superficie de falla activa.

Una hilera de perforaciones se coloca hasta más abajo de la superficie de falla, y éstas se utilizan como ductos de inyección. El espaciamiento entre huecos de inyección varía de 3 a 5 metros. La operación de inyección debe iniciarse con la hilera más inferior, con el objeto de mejorar el apoyo en el pie de la falla y en esta forma evitar falla durante el proceso de inyección. Debe tenerse en cuenta que la presión de poros puede aumentar por efecto del proceso de inyección, lo cual puede agravar los problemas de movimiento en los taludes. La presión de poros aumenta cuando se bloquean caminos de corriente de agua y debe tenerse especial cuidado en diseñar el sistema de inyección.

Estabilización con cemento

El caso del cemento es un proceso de cementación y relleno de los vacíos del suelo o roca y las discontinuidades de mayor abertura, aumentando la resistencia del conjunto y controlando los flujos internos de agua.
Los procesos de inyecciones se conducen en varias etapas iniciando por una inyección de la zona y terminando con el relleno de sitios específicos.

En suelos residuales la inyección de cemento de zonas permeables en el límite inferior del perfil de meteorización ha tenido buen éxito.

Chummar, reporta la estabilización de un deslizamiento en suelo residual de areniscas en la India, utilizando inyecciones en perforaciones de 3 a 4 centímetros de diámetro con espaciamiento de 10 metros, inyectando lechada de cemento.

Se han utilizado relaciones agua-cemento desde 0.5:1 hasta 10:1, dependiendo del tamaño de los vacíos. Sin embargo, el rango usual varía de 0.8:1 a 5:1. El tiempo de fraguado de la inyección de cemento aumenta con la relación agua-cemento, generalmente, los tiempos varían entre 4 y 15 horas y para relaciones de cemento mayores de 10, en ocasiones nunca se produce el fraguado.
Con frecuencia se le agregan otros productos al cemento para mejorar el resultado de la inyección tales como aceleradores, retardadores, coloides para minimizar la segregación, materiales expansores, tomas reducidoras de agua, etc.. En ocasiones el cemento se mezcla con arena, arcilla o pozolana, ceniza como llenantes con el objetivo primario de disminuir el costo de la inyección.

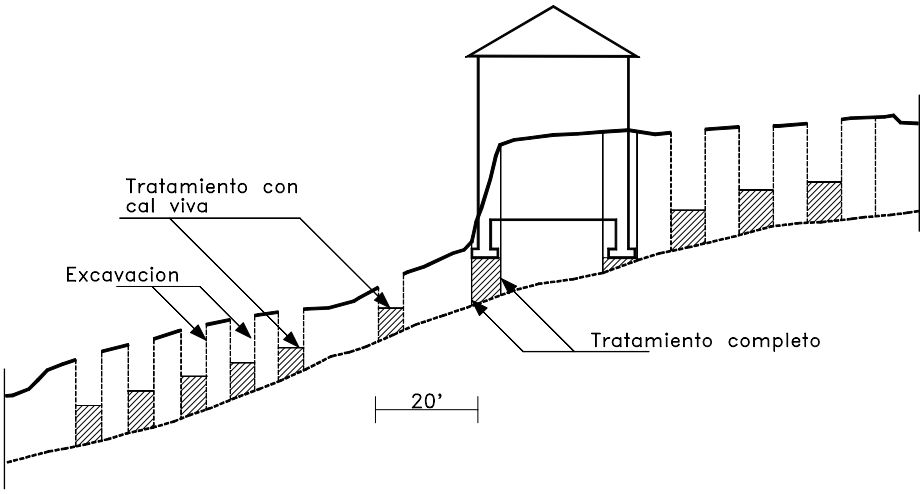

Figura 12.13 Sistema de columnas de cal.

Estabilización con cal

Existe el método de estabilizar terraplenes de arcilla con capas de cal viva (Ca0). El proceso de la mezcla con cal consiste en hacer reaccionar la cal con la arcilla, produciendo Silicato de Calcio, el cual es un compuesto muy duro y resistente.

En años recientes se han utilizado técnicas de inyección de lechada de cal dentro del suelo (Boynton y Blacklock). La lechada que sigue las zonas fracturadas o juntas y otras superficies de debilidad fue inyectada, utilizando tubos de 4 centímetros de diámetro con puntas perforadas (Rogers, 1991). La inyección es colocada al rechazo, a intervalos entre 30 y 45 centímetros, con presiones típicas entre 350 y 1300 Kpa. En esta forma se pueden tratar profundidades de más de 40 metros. En ocasiones se ha utilizado inyección de cal mezclada con cenizas.

La estabilización con cal no es efectiva en suelos granulares. Una desventaja de este método es que al menos 80 días deben dejarse antes de que se consideren estabilizadas las columnas de cal.

Otro sistema es el de colocar columnas de cal previa construcción de una perforación vertical. El efecto de las columnas de cal es un aumento en la cohesión promedio, a lo largo de una superficie de falla activa o potencial.

$C_{prom.} = C_{suelo}(1-a_r)+C_{col}/a_r$

Donde C= Cohesión

$a_r=\pi D^2/4S^2$

D= Diámetro de la columna

S= Separación entre columnas

Broms, 1991, recomienda utilizar factores de seguridad mayores a 1.3 siempre que se diseñen columnas de cal.

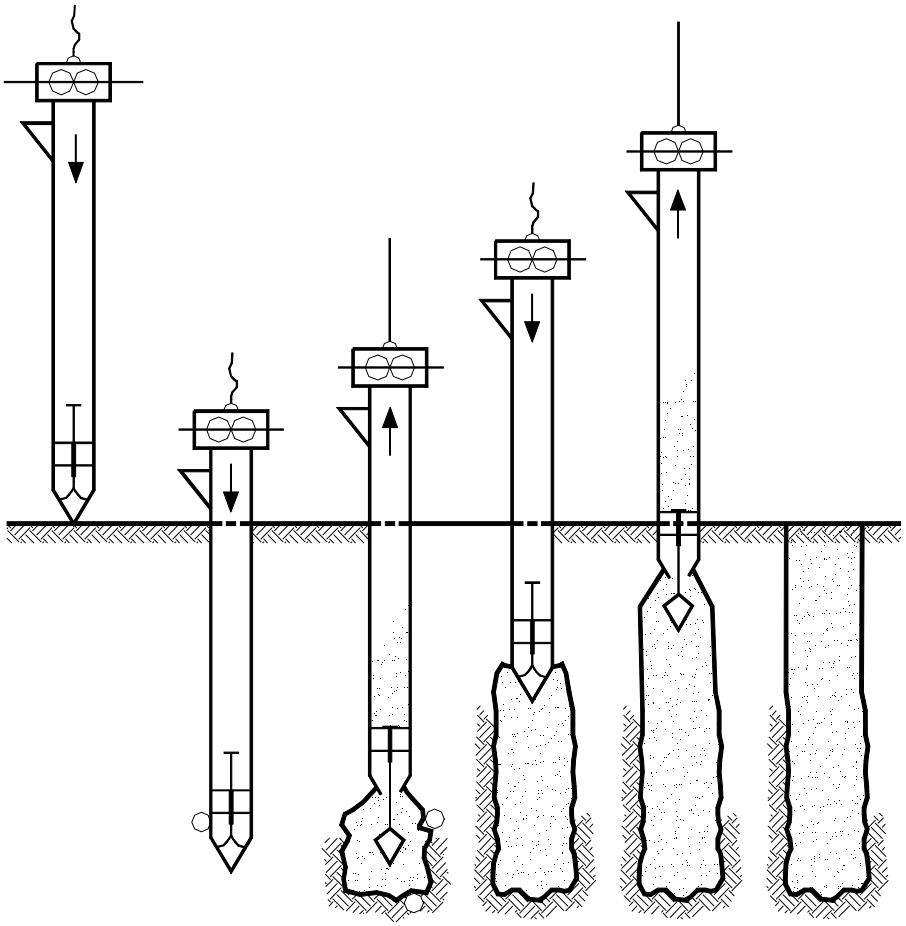

Figura 12.14 Instalación de pilas de cal.

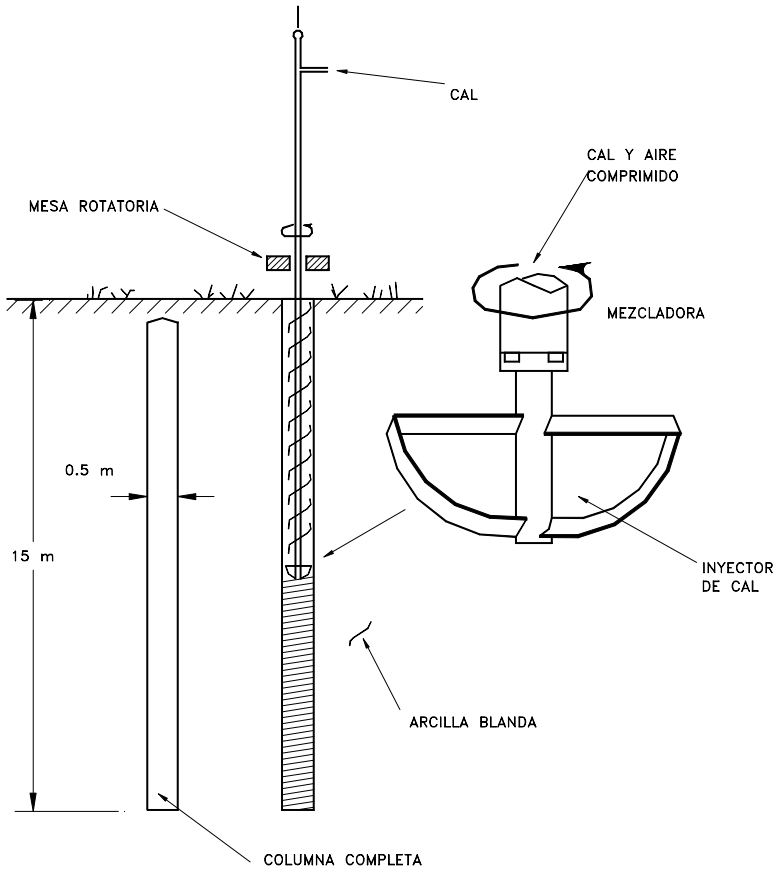

Figura 12.15 Detalle de inyección de columnas de cal.

Calcinación o tratamiento térmico

Tratamientos de tipo térmico, con altas temperaturas, que calcinan el suelo. El suelo se endurece a altas temperaturas debido a que a temperaturas superiores a los 400°C ocurren cambios en la estructura cristalina de los minerales de arcilla, especialmente la pérdida de elementos OH. Estos cambios son irreversibles y producen modificaciones sustanciales en las propiedades físicas de los suelos.

Una de las propiedades que más se afecta es el índice plástico, el cual disminuye drásticamente. De igual forma la capacidad de absorción de agua, la expansividad y la compresibilidad disminuyen.

Básicamente la estabilización térmica consiste en pasar gases a temperaturas cercanas a 1000°C por ductos o huecos dentro del suelo.

Se han realizado tratamientos de este tipo a profundidades hasta de 20 metros(Bell 1993). La distribución de temperatura depende de la porosidad del suelo, el contenido de agua, presión de poros y la temperatura de los gases inyectados.

Debe tenerse en cuenta que la temperatura no sube por encima de 100°C hasta que se ha evaporado totalmente al agua dentro del suelo. Por la razón anterior no es económico estabilizar suelos saturados utilizando el sistema de calcinación.

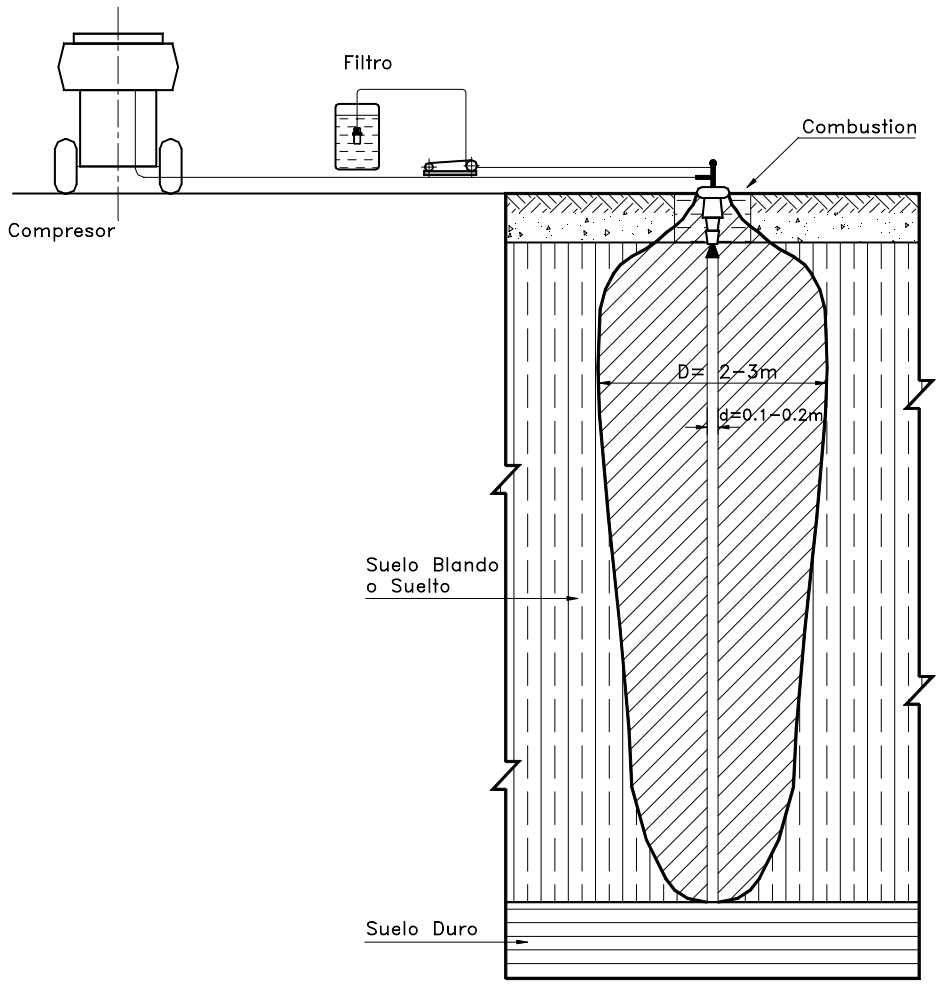

Figura 12.16 Esquema del método de tratamiento térmico.

Magmaficación

El proceso de Magmaficación consiste en fundir el suelo a temperaturas de cristalización de más de 5.000°C, en tal forma que se produce un magma artificial, el cual se enfría y cristaliza posteriormente para convertirse en roca. Este procedimiento ha sido desarrollado por la NASA y actualmente está en experimentación por universidades de los Estados Unidos. El proceso incluye dos etapas así :

1. Perforar huecos verticales de varias pulgadas de diámetro en el suelo.
2. Introducir y luego retirar de la perforación, un cilindro o pistola magmaficadora accionada por corriente eléctrica, la cual convierte en magma el suelo aproximadamente en un radio de un metro de distancia del hueco.

La Pistola magmaficadora utiliza tres rayos similares a los rayos laser, los cuales al entrelazarse producen las temperaturas suficientes para convertir el suelo en magma.

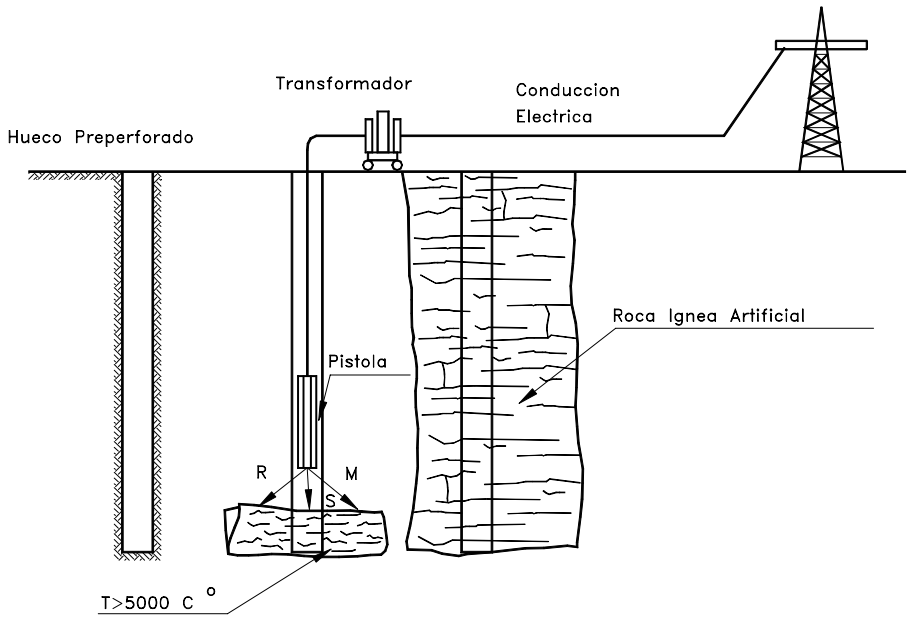

Figura 12.17 Proceso de magmaficación.

Congelación del suelo

La congelación del suelo consiste en disminuir la temperatura del terreno en tal forma que el agua se convierte en hielo lo cual equivale a que se aumenta la resistencia del material. Generalmente, la congelación se emplea en excavaciones en suelos blandos saturados. El suelo congelado conforma una especie de pared provisional que permite la excavación. La congelación depende de las características geológicas e hidrológicas del sitio, y los tipos de suelo presentes, sus propiedades térmicas y contenido de aguas.

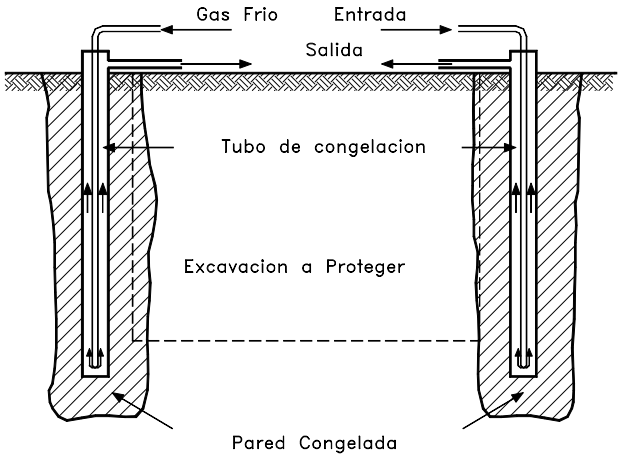

Figura 12.18 Diagrama de procedimientos de congelación del suelo.

La congelación comprende dos etapas: la fase activa en la cual el suelo se congela y la fase pasiva en la cual se requiere mantener el suelo en su estado congelado. Un sistema de congelación puede consistir en el bombeo de un enfriador similar al utilizado en los equipos domésticos de congeladores, dentro de un sistema de tuberías en contacto con el suelo.
Un segundo sistema consiste en inyectar Nitrógeno líquido.
Al congelar el suelo disminuye la permeabilidad y puede presentarse aumento de las presiones de poro arriba del área congelada.

Compactación Profunda

La compactación o incremento de la densidad del suelo se puede lograr a grandes profundidades utilizando alguno de los siguientes procedimientos:

1. Pilotes de compactación

La compactación se logra por desplazamiento del suelo al hincar un pilote, retirarlo y al mismo tiempo rellenar el espacio desplazado con material de suelo. La separación entre pilotes depende de las condiciones de granulometría y densidad del suelo. Para el hincado se pueden utilizar procedimientos de percusión o de vibración.

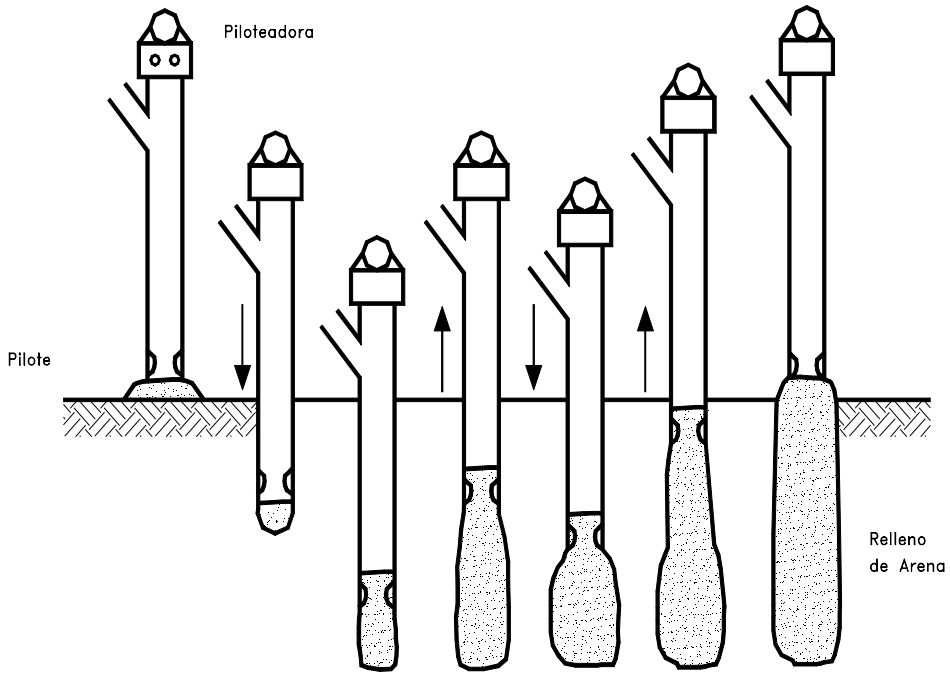

Figura 12.19 Pilotes de compactación.

2. Vibrocompactación profunda

La vibrocompactación utiliza un equipo conocido con el nombre de vibroflotador, el cual se suspende de una grúa, penetra el suelo por su propio peso, un sistema de vibración y la inyección de agua por su punta inferior. Al penetrar el equipo vibra con amplitudes grandes produciendo un desplazamiento horizontal de los materiales. El espacio vacío generado por la vibración se va rellenando con arena o grava.

La vibroflotación es muy efectiva en arenas y limos granulares. El espaciamiento entre puntos de densificación depende de las características que se deseen del producto final de la compactación.

La vibrocompactación profunda es muy efectiva y es uno de los mejores sistemas de compactación a grandes profundidades y su principal problema consiste en la poca disponibilidad que se tiene de estos equipos en America Latina.

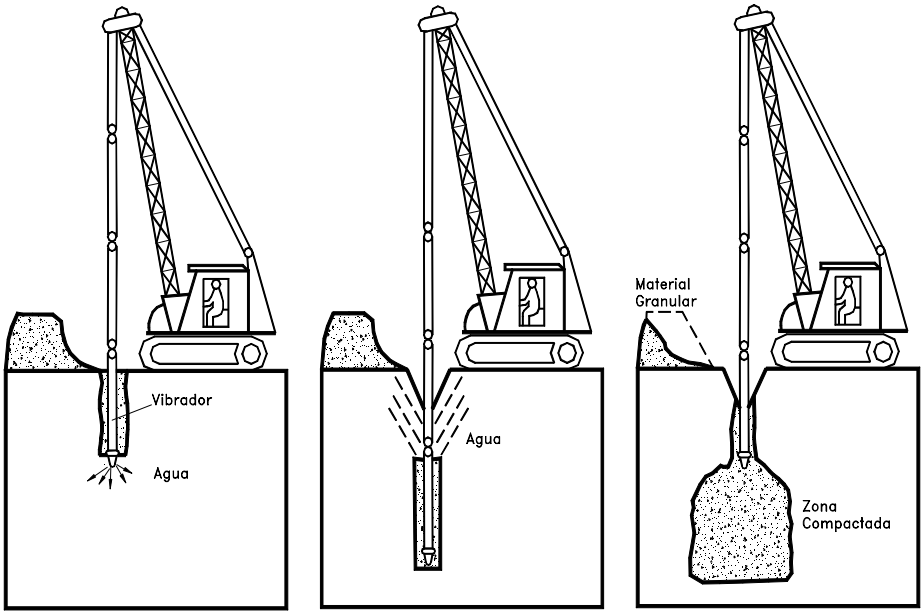

Figura 12.20 Proceso de vibrocompactación.

3. Columnas de piedra o grava

Las columnas de piedra o de grava utilizan un sistema similar al de pilotes o vibrocompactación profunda para hacer penetrar en el suelo cantos o partículas gruesas de grava como se indica en la figuras 12.21 y 12.22.

Las columnas de piedra pueden utilizarse para estabilizar o prevenir deslizamientos (Goughnour, 1990), debido a que las columnas actuan en dos frentes así:

a. Aumentar la resistencia del suelo.
b. Mejorar el drenaje de aguas subterráneas

Este sistema es una técnica que mejora la resistencia al cortante del suelo a lo largo de una superficie potencial de falla, reemplazando o desplazando el suelo del sitio con una serie de columnas de piedra compactada de gran diámetro espaciadas en forma cercana.

Adicionalmente las columnas de piedra también funcionan como drenes de grava para aliviar las presiones de poro.
La construcción de las columnas de piedra consiste en lo siguiente:
a. Construir una excavación utilizando un vibro-desplazador.
b. Colocando piedra dentro de la excavación.
c. Compactando la piedra por un sistema de repenetración de abajo hacia arriba con el equipo vibro-flotador.

Se debe tener especial cuidado en la utilización de columnas de piedra en suelos sensitivos u orgánicos (Bachus y Barksdale, 1989). En suelos turbosos el sistema puede producir una desestabilización de los mantos del suelo.

Existen dos métodos empíricos para el diseño de columnas de piedra desarrollados por Aboshi (1979) y por Goughnour (1990). Los cálculos de estabilidad se desarrollan utilizando métodos convencionales de equilibrio límite calculando una cohesión o una fricción adicional para las áreas correspondientes a las columnas de piedra.

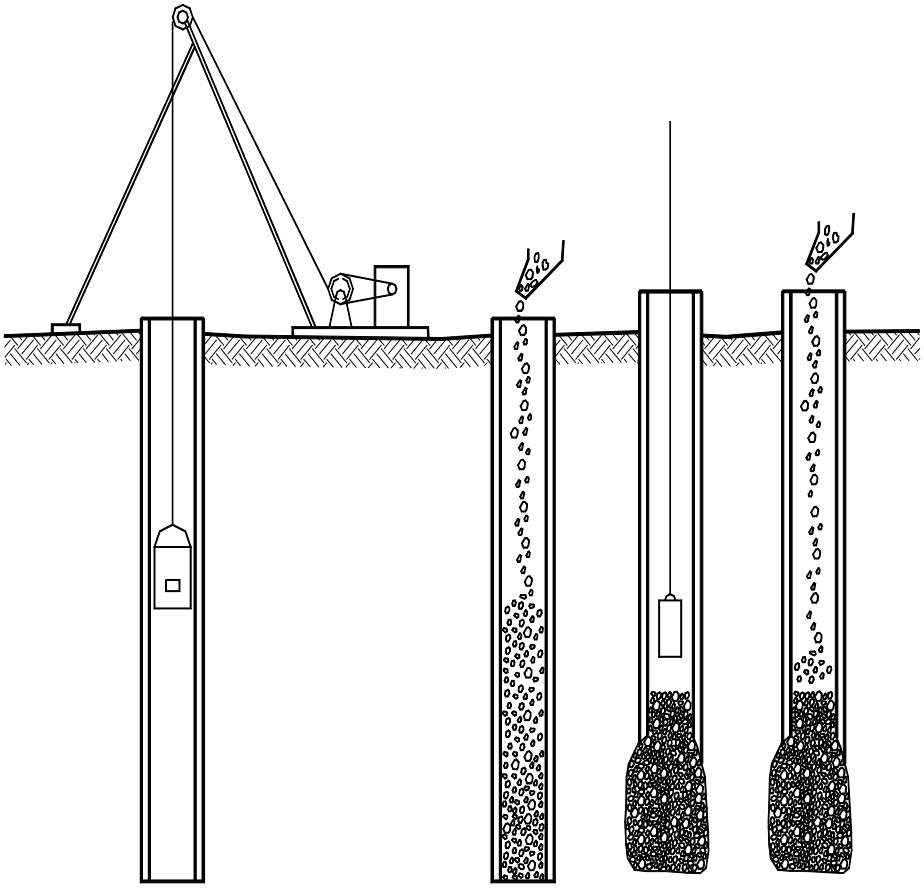

Figura 12.21 Columnas de piedra o grava.

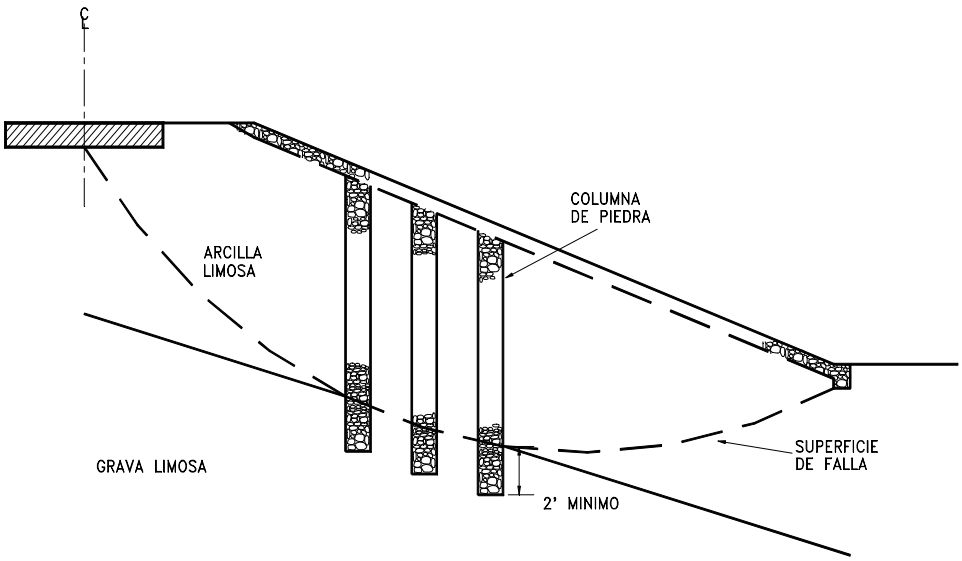

Figura 12.22 Diagrama esquemático de la utilización de columnas de piedra para estabilizar un deslizamiento.

4. Compactación dinámica

El sistema de compactación dinámica consiste en dejar caer de una altura importante un bloque pesado metálico o de concreto. El proceso repetitivo de golpeo produce una compactación del suelo.

Se utilizan bloques cuyo peso puede variar entre 5 y 200 toneladas con alturas de caída entre 4 y 30 metros. El espaciamiento entre centros de impacto varía de 4 a 8 metros. Se requieren varios golpes en cada sitio para obtener el resultado deseado. Se le puede utilizar en una gran cantidad de suelos desde basuras y materiales orgánicos hasta arcillas y suelos granulares gruesos.

La energía que se requiere para obtener un determinado resultado aumenta con la cantidad de finos en una relación de 1 : 3 de grava hasta arcilla.

Para calcular la profundidad de influencia o de compactación se utiliza la expresión:

$D = ½ \sqrt{WH}$

Donde

W = Peso del bloque en toneladas

H = Altura de caida en metros

D = Profundidad de influencia en metros.

Generalmente la compactación dinámica se hace utilizando varias etapas. En las primeras etapas el espaciamiento entre sitios de golpeo es mayor que en las etapas finales.

Debe tenerse cuidado en la estabilización de deslizamiento utilizando compactación dinámica que se generan presiones de poros, las cuales pueden activar o acelerar los movimientos.

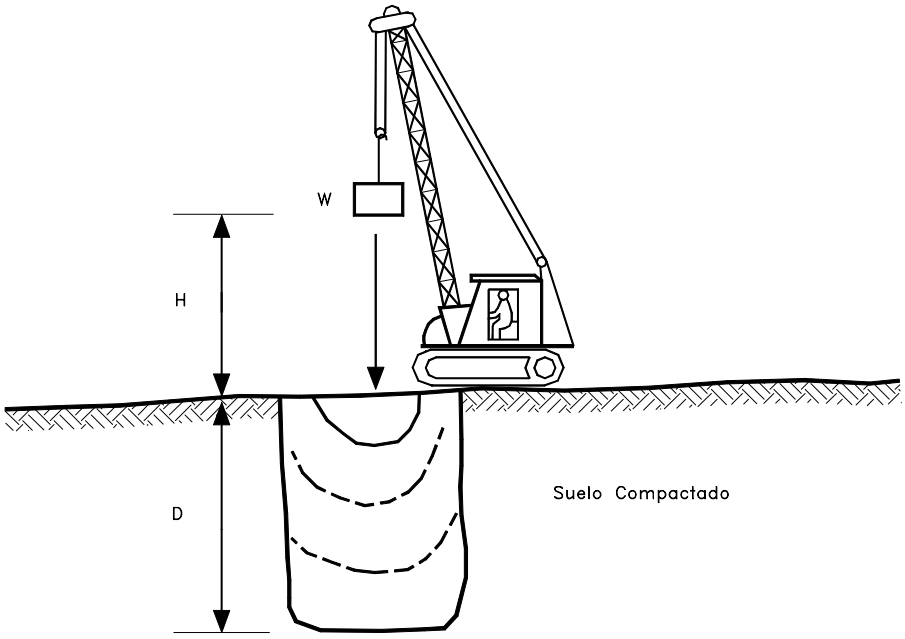

Figura 12.23 Diagrama del sistema de compactación dinámica.

5. Compactación con explosivos

El uso de explosivos para compactar el material y en esta forma estabilizar un suelo natural, se limita a suelos granulares con menos del 20% de limos y menos del 5% de arcillas. Se utilizan cargas de explosivos relativamente pequeñas a espaciamientos entre 3 y 7.5 metros, con explosiones repetitivas.

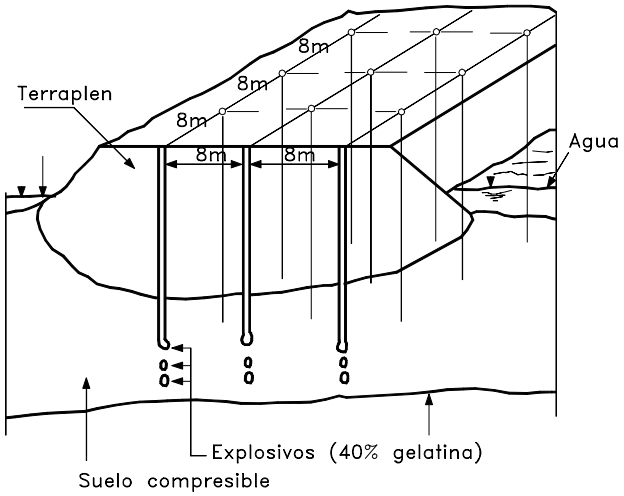

Figura 12.24 Uso de explosivos para mejorar la capacidad del suelo debajo de un terraplén.

El sistema de funcionamiento consiste en producir la licuación de los suelos en un volumen semiesférico de suelo alrededor de cada punto de explosión,y en esta forma generar compactación. En taludes con factores de seguridad muy bajos, la compactación con explosivos puede producir la falla del talud. El riesgo del sistema es alto cuando la susceptibilidad a la licuación es alta.

12.8 PROTECCION DE LA SUPERFICIE DEL TALUD

El objetivo de la protección de la superficie del talud es prevenir la infiltración debido a la lluvia y mantener el suelo parcialmente seco. Las medidas de protección incluyen el concreto lanzado, los bloques de mampostería, la protección con piedras, el recubrimiento con productos sintéticos. Estos recubrimientos pueden complementarse con prácticas de cobertura vegetal (Ver capítulo 8). Aunque, el factor de seguridad no se modifica teóricamente, en la práctica sí se produce un efecto estabilizante al mantener las fuerzas de succión o presiones negativas, las cuales actúan como fuerzas resistentes que tratan de impedir las fallas al cortante o el colapso. El recubrimiento de la superficie de un talud con productos artificiales puede implicar un aumento en los valores de escorrentía, lo cual requiere de la construcción de estructuras de control de aguas superficiales capaces de manejar los volúmenes producidos de acuerdo a la intensidad de las lluvias.

Concreto Lanzado

El concreto lanzado es una mezcla de cemento y agregados, los cuales se pueden colocar en seco o por vía humeda, en la forma como se indica en el capítulo 14. Generalmente, se coloca una malla de refuerzo previamente al lanzado del concreto. Se debe tener especial cuidado en las consecuencias de procesos de expansión y contracción, los cuales pueden destruir por agrietamiento la superficie de los taludes. Para facilitar el drenaje, se deben construir huecos o lloraderos que atraviesen la superficie de recubrimiento y, en esta forma evitar las presiones de poro por represamiento de agua subterránea.

Recubrimiento en suelo cemento

El recubrimiento en suelo cemento puede mejorar las condiciones de permeabilidad de un talud haciéndolo relativamente impermeable y, en esta forma disminuyendo la infiltración. En Hong Kong y los países del Sureste Asiático, se utiliza con mucha frecuencia un recubrimiento llamado “Chunam Plaster”, el cual consiste en una mezcla de cemento, cal y suelo, generalmente, en las siguientes proporciones: una parte de cemento Portland, tres partes de cal hidratada y veinte partes de suelo residual de granitos o suelos volcánicos (Geotechnical Control Office, 1984). El suelo debe estar libre de materia orgánica y raíces. El cemento y la cal deben mezclarse secas antes de agregarlas al suelo. Se agrega la mínima cantidad de agua consistente con la trabajabilidad de la mezcla. Si la relación agua-cemento es muy alta se produce agrietamiento severo del recubrimiento. Generalmente, el Chunam se aplica en dos capas cada uno de aproximadamente 3 cm. La primera capa es escarificada antes de colocar la segunda, dejando un tiempo de aproximadamente de 24 horas entre las dos

capas. Con frecuencia, se utiliza un sistema de anclajes o dovelas de 30 cm de longitud clavadas a distancias de 1.5 metros.

Mampostería

La mampostería puede consistir en bloques de concreto o en piedra pegada con concreto o mortero. Las juntas entre bloques adyacentes generalmente, se rellenan con un mortero 3 a 1 o se utiliza vegetación. En el caso de recubrimiento utilizando concreto o mortero se deben dejar lloraderos para evitar la acumulación de aguas subterráneas.

Rip-Rap

La solución consiste en colocar sobre la superficie del talud piedra suelta acumulada la una sobre la otra con el objeto específico de proteger contra la erosión. Usualmente por debajo del Rip-Rap se coloca un geotextil no tejido como elemento de protección adicional. El Rip-Rap puede colocarse a mano o al volteo.
Generalmente, al colocarse al volteo el espesor de la capa es menor pero en cualquier caso no debe ser inferior a 12 pulgadas. El tamaño de las piedras depende de la pendiente del talud, pudiéndose colocar piedras de mayor tamaño en pendientes menores.

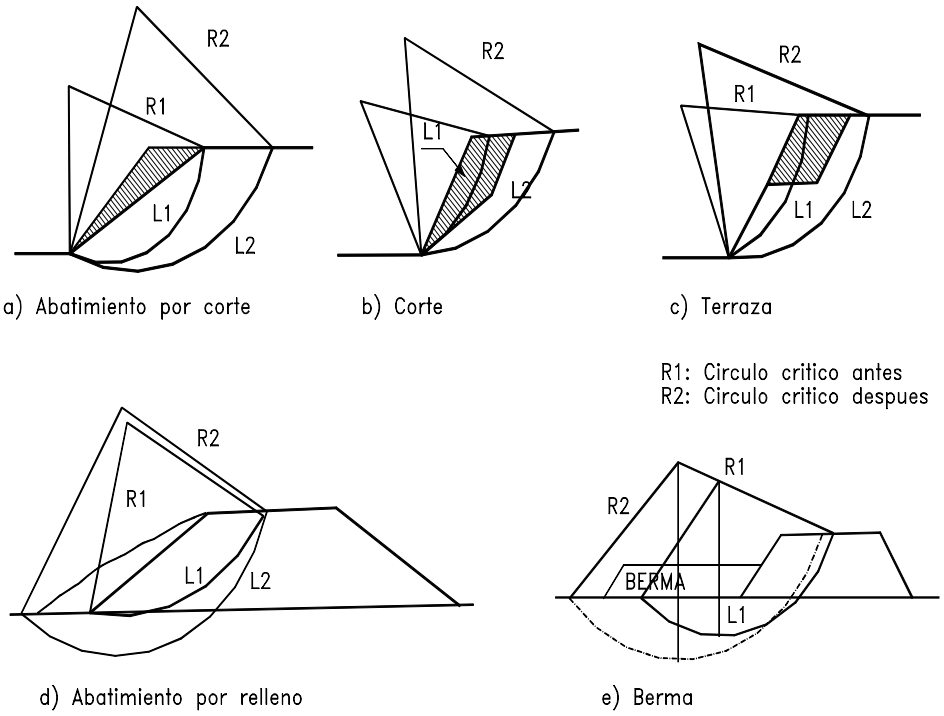

Figura 12.25 Efecto de la modificación topográfica sobre la localización de círculo crítico de falla.

12.9 MODIFICACION DE LA TOPOGRAFIA

Abatimiento de la pendiente del talud

Al disminuir la pendiente del talud, el círculo crítico de falla se hace más largo y más profundo para el caso de un talud estable, aumentándose en esta forma el factor de seguridad. El abatimiento se puede lograr por corte o por relleno.
El abatimiento de la pendiente del talud es económicamente posible en taludes de poca altura, pero no ocurre lo mismo en taludes de gran altura, debido al aumento exagerado de volumen de tierra de corte con el aumento de la altura. El abatimiento por relleno en ocasiones no es posible por falta de espacio en el pie del talud.

Remoción de materiales de la cabeza

La remoción de una suficiente cantidad de materiales en la parte superior del talud puede resultar en un equilibrio de fuerzas que mejore la estabilidad del talud. En la práctica este método es muy útil en fallas activas. La cantidad de material que se requiere depende del tamaño y características del movimiento y de la geotecnia del sitio.

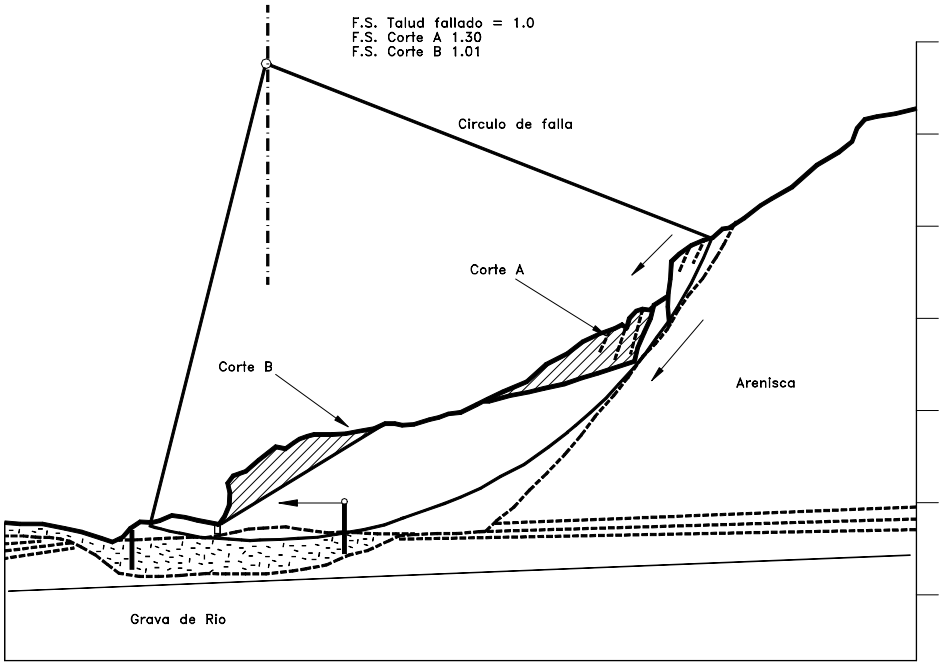

Figura 12.26 Corte de parte del material deslizado para mejorar el factor de seguridad

Antes de iniciar el proceso de corte debe calcularse la cantidad de material que se requiere remover con base en un análisis de estabilidad para un factor de seguridad propuesto. El cálculo se realiza generalmente, por un sistema de ensayo y error.

Finalmente la efectividad técnica del sistema y el factor económico van a determinar su viabilidad. En ocasiones estos materiales pueden ser utilizados como préstamo para terraplenes en el mismo proyecto.

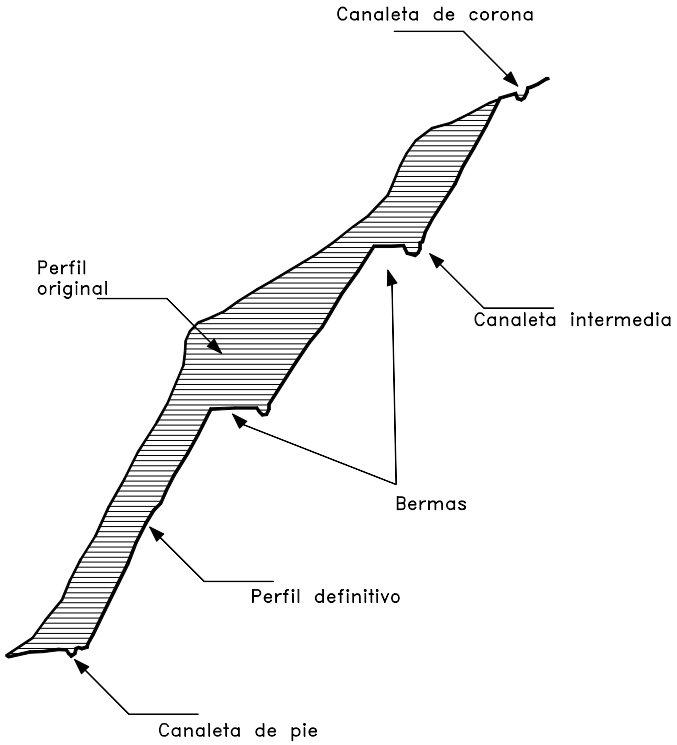

Figura 12.27 Estabilización por conformación del talud y bermas.

Terrazas o bermas intermedias

La construcción de terrazas en la parte alta de un deslizamiento de rotación tiende a reducir el momento actuante y controlar el movimiento. Si el proceso se hace en la parte inferior se puede lograr el proceso inverso de disminuir el factor de seguridad. En deslizamientos de traslación y en ciertos flujos o deslizamientos de residuos generalmente no es efectivo emplear métodos de remoción de materiales.

El efecto es el de disminuir las fuerzas actuantes, en la zona más crítica para la generación de momentos desestabilizantes. En esta forma el círculo crítico de falla se hace más profundo y más largo aumentándose el factor de seguridad.
Al construir las terrazas el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, los cuales a su vez deben ser estables. El terraceo se le puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación. La altura de las gradas es generalmente, de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial. El sistema de cunetas a su vez debe conducir a una estructura de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía.

En suelos residuales generalmente, la grada más alta debe tener una pendiente menor, teniendo en cuenta que el suelo subsuperficial es usualmente el menos resistente. Las terrazas generalmente, son muy útiles para control de aguas de escorrentía.
En todos los casos debe considerarse el efecto que se puede tener sobre los taludes arriba y abajo de la terraza a excavar.

Diseño de la geometría de las bermas

Uno de los objetivos principales del área de la estabilidad de taludes, es el diseño de taludes topográficamente estables. Este tipo de problema se le presenta al Ingeniero en el trazado de vías, explanaciones, exploraciones mineras, urbanizaciones, etc. El diseño comprende las decisiones de tipo topográfico y estabilización que se requiere presupuestar, previamente a la construcción de la obra civil.

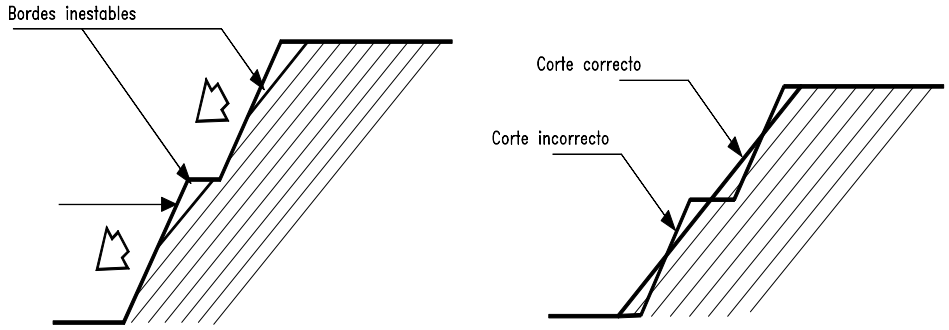

Figura. 12.28 Cortes en taludes con juntas semiparalelas a la topografía del terreno.

El diseño de un talud consiste en definir su altura, pendiente y elementos topográficos con base en parámetros geotécnicos. Para el diseño de un talud se pueden emplear varios sistemas:

1. Uso de códigos como los existentes en Hong Kong y la ciudad de Los Angeles.
2. Empleo de gráficos de diseño, teniendo en cuenta algunas de las características del suelo o macizo rocoso .
3. Cálculo de factor de seguridad del talud y diseño por el sistema de prueba y error, hasta encontrar el diseño que mejor se ajuste a los requisitos de estabilidad establecidos.
4. Definición de pendientes y alturas de acuerdo al comportamiento de taludes similares en la misma formación geológica .

Se recomienda que los diseños no sean ciegos, sino que obedezcan a un conocimiento muy claro de los factores básicos y mecanismos de falla. Un sistema que funcionó exitosamente en un sitio, no necesariamente es aplicable en otro.

Diseños semiempíricos

Debido a las dificultades que existen para la utilización de diseños empleando el sistema tradicional clásico en taludes de zonas tropicales, se ha intentado formular reglas de diseño con base en la experiencia conocida. El uso de este sistema semi-empírico requiere de mucho cuidado, si la experiencia no proviene de la misma formación geológica en las mismas condiciones topográficas, climáticas y geotécnicas.

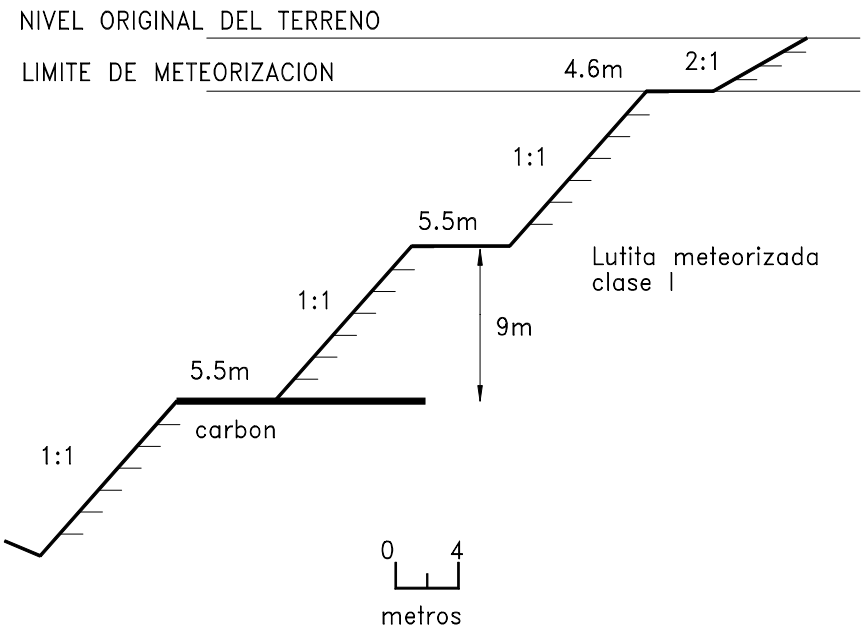

Figura. 12.29 Configuración típica de taludes en lutitas meteorizadas con mantos de carbón (Kentucky department of Highways 1993).

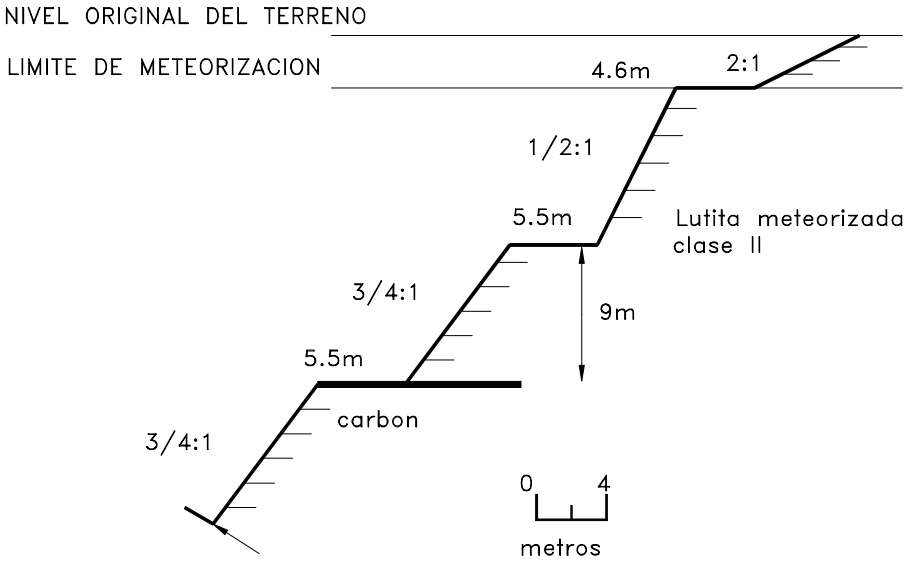

Figura. 12.30 Configuración típica de taludes en lutitas ligeramente meteorizadas (Kentucky department of Highways, 1993).

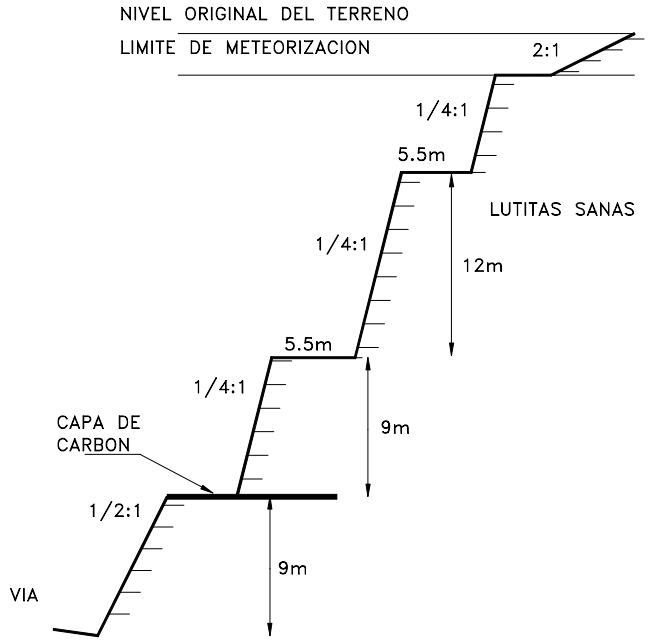

Figura 12.31 Configuración típica de taludes en lutitas sanas (Kentucky department of Highways, 1993).

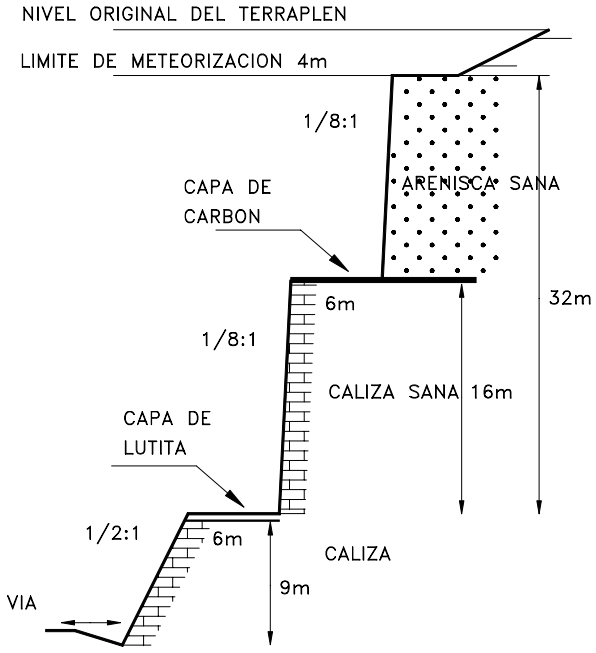

Figura. 12.32 Configuración típica de taludes en calizas y areniscas (Kentucky department of Highways, 1993).

Sin embargo, la experiencia en formaciones similares representa una buena guía, cuando no se cuenta con información suficiente para realizar un diseño detallado.
El estudio patológico de las fallas, cuando los factores que contribuyen a una falla pueden ser evaluados, sirve también como bases para objeto del diseño en taludes, dentro de una misma formación geológica. En todos los casos es necesario que el Ingeniero logre entender los fenómenos que pueden ocurrir dentro de los taludes objeto del diseño. De esta experiencia se pueden obtener gráficas de diseño que se muestran en el presente capítulo.
En el diseño de cortes se debe tener en cuenta la geología del talud y en especial las estructuras o discontinuidades y el perfil de meteorización. En las figuras 12.30 a 12.33 se muestran algunos taludes típicos recomendados por departamentos de transporte en los Estados Unidos.

Criterios generales para el diseño de bermas y pendientes

Para el diseño de bermas y pendientes se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

1. Formación Geológica

A mayor competencia de la roca se permiten mayores pendientes y mayores alturas. Las areniscas, calizas y rocas ígneas duras y sanas permiten taludes casi verticales y grandes alturas. Los esquistos y lutitas no permiten taludes verticales.

2. Meteorización

Al aumentar la meteorización se requieren taludes más tendidos, menores alturas entre bermas y mayor ancho de las gradas. Los materiales muy meteorizados requieren de taludes inferiores a 1H:1V, en la mayoría de las formaciones geológicas no permiten alturas entre bermas superiores a 7 metros y requieren anchos de berma de mínimo 4 metros.
Para cortes en materiales meteorizados la pendiente en la parte más profunda del corte permite ángulos superiores a la cabeza del talud. Se recomienda para cortes de gran altura establecer ángulos diferentes de pendiente para el pie y la cabeza del corte adaptándolos a la intensidad del proceso de meteorización.

3. Microestructura y estructura geológica

A menos que las discontinuidades se encuentren bien cementadas las pendientes de los taludes no deben tener angulos superiores al buzamiento de las diaclasas o planos de estratificación. Entre menos espaciadas sean las discontinuidades se requieren pendientes menores de talud. Para materiales muy fracturados se requieren taludes, alturas y bermas similares a los que se recomiendan para materiales meteorizados.

4. Minerales de arcilla

Los suelos que contengan cantidades importantes de arcillas activas, tipo Montmorillonita, requieren de pendientes de talud inferiores a 2H:1V. Los suelos con Kaolinita permiten generalmente, taludes hasta 1H:1V. Las alturas entre bermas en suelos arcillosos no deben ser superiores a 5 metros y las gradas deben tener un ancho mínimo de 4 metros.

5. Niveles freáticos y comportamiento hidrológico

Los suelos saturados no permiten taludes superiores a 2H:1V a menos que tengan una cohesión alta.

6. Sismicidad

En zonas de amenaza sísmica alta no se deben construir taludes semiverticales o de pendientes superiores a 1/2H:1V , a menos que se trate de rocas muy sanas.

7. Factores antrópicos

En zonas urbanas no se recomienda construir taludes con pendientes superiores a 1H:1V y las alturas enttre bermas no deben ser superiores a 5 metros.

8. Elementos en riesgo

Los taludes con riesgo de vidas humanas deben tener factores de seguridad muy altos.

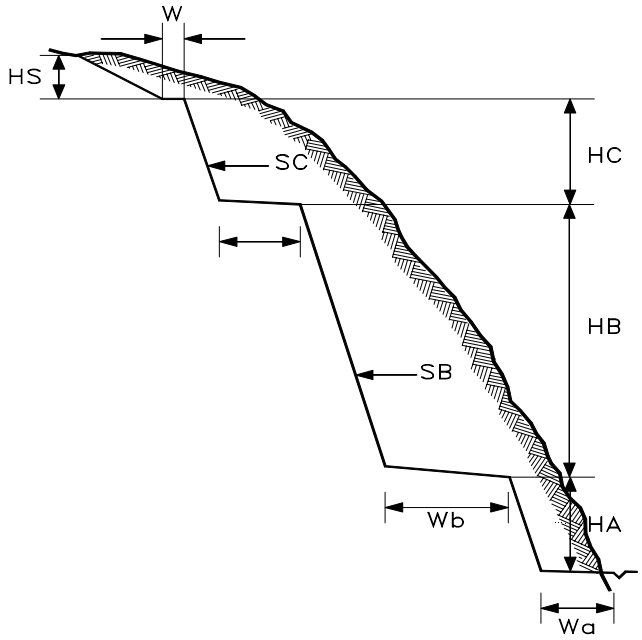

Figura 12.33 Criterios para el diseño de taludes en roca (West Virginia U.S.A.)

Tabla 12.10 Criterios para el diseño de taludes en roca (West Virginia U.S.A.)

	Alturas		Anchos		Taludes	
Tipo de roca	Ha	Hb - Ha	Wa	Wa - Wb	Sa	Sb – Sc
Cortes en lutitas intercaladas con areniscas	2 a 6	6 a 10	0 a 10	6 a 12	½ : 1	¼ : 1 a: 1
Areniscas	3 a 10	10 a 14	0 a 6	6 a 10	¼ : 1	¼ : 1
Areniscas sobre lutitas (cortes altos)	3 a 10	10 a 14	0 a 8	6 a 12	¼ : 1	¼ : 1 a: 1
Areniscas y Lutita, cortes moderados	3 a 14	6 a 14	0 a 6	6 a 10	1 : 1	¼ : 1
Cortes en Lutita	3 a 8	6 a 10	0 a 10	6 a 10		½ : 1 a 2: 1

Contrapesos en el pie del deslizamiento

Al colocarle carga adicional a la base de un deslizamiento de rotación se genera un momento en dirección contraria al movimiento, el cual produce un aumento en el factor de seguridad.

Se debe hacer un análisis del peso requerido para lograr un factor de seguridad determinado. La adecuada cimentación de estos contrapesos debe ser requisito para que el sistema sea exitoso.
El efecto del sistema de contrapeso es el de hacer que el círculo crítico en la parte inferior del talud se haga más largo.

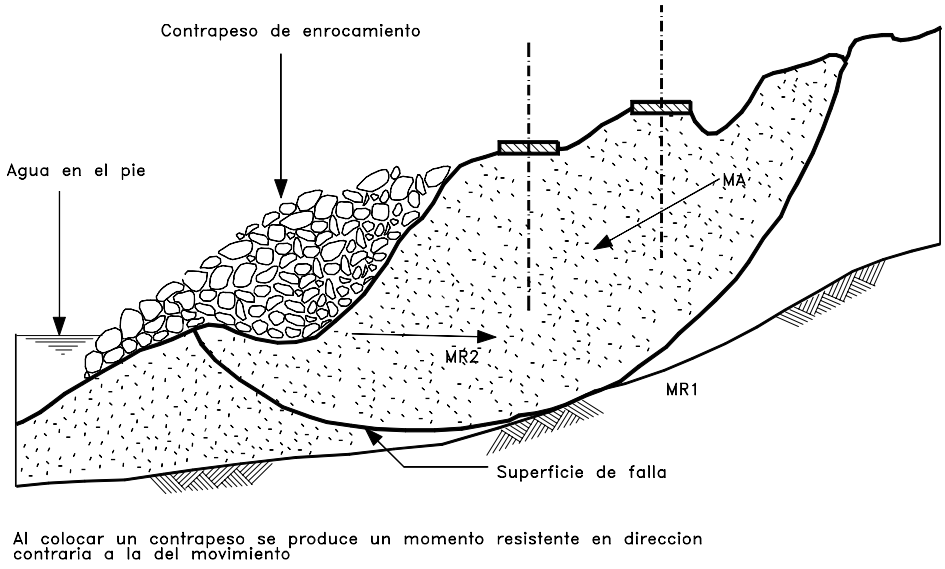

Figura 12.34 Contrapeso para estabilización de un deslizamiento activo

Los contrapesos pueden ser estructuras con un muro de contención o rellenos de tierra armada, llantas de caucho (Tiresoil), etc.

Bermas bajas en el pie de terraplenes sobre suelos blandos

El sistema de contrapesos es muy útil para la estabilización de taludes de terraplenes sobre zonas de suelos blandos, en los cuales las fallas ocurren generalmente, por falta de resistencia en el manto de cimentación del terraplén. En este caso se construye una berma que es un terraplén de menor altura junto al terraplén principal, el cual sirve de contrapeso aumentando la longitud de la superficie de falla.
Las bermas o contrabermas son usadas para colocar una carga al pie de un terraplén sobre suelo blando y en esta forma aumentar la resistencia abajo del pie. La berma se coloca en el área que de acuerdo al análisis de estabilidad se puede levantar.
La contraberma debe diseñarse en tal forma que sea efectiva para garantizar la estabilidad del terraplén principal y al mismo tiempo sea estable por sí misma. El efecto de la contraberma es crear un contrapeso que aumente la longitud y profundidad del circulo crítico de falla.

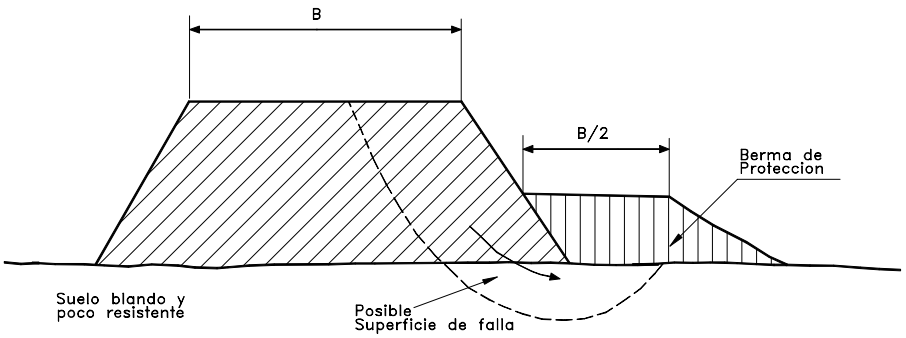

Figura 12.35 Detalle de Bermas bajas en el pié de deslizamientos

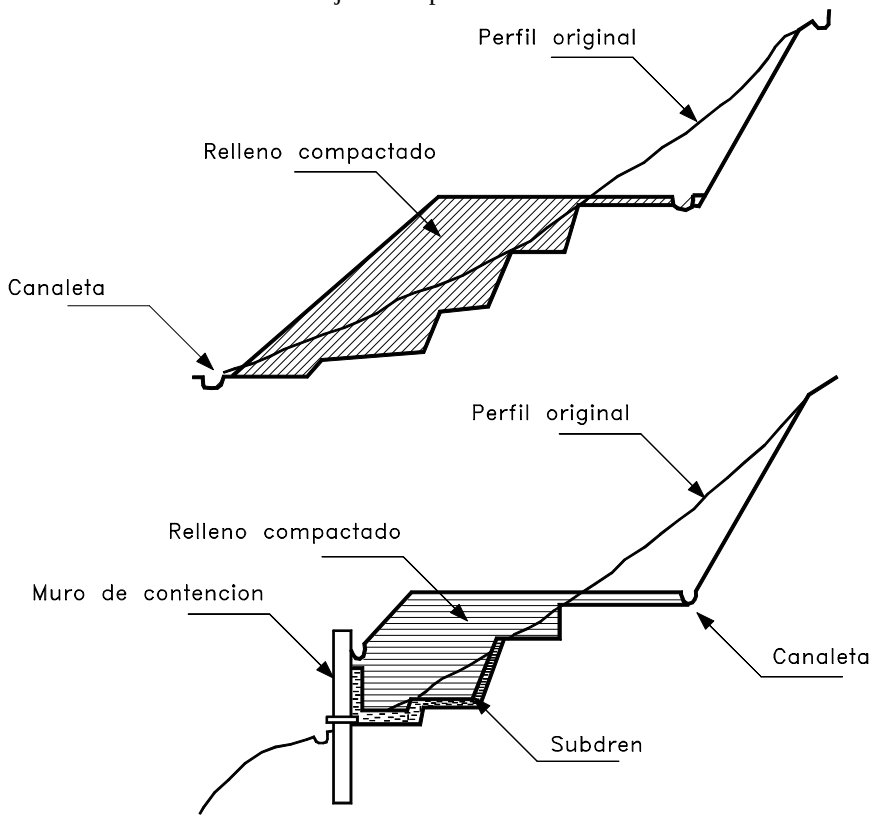

Figura 12.36 Alternativa de relleno y muro de contención.

12.10 DISEÑO DE TERRAPLENES

Los terraplenes son estructuras muy susceptibles a problemas de deslizamientos y erosión debido a su bajo grado de cementación y a que generalmente su colocación

genera una disminución del factor de seguridad del talud pre-existente, por aumento de los esfuerzos actuantes. Adicionalmente, se modifican las condiciones de humedad, la posición del nivel freático y se induce una superficie de debilidad en el contacto entre el terraplén y el suelo natural subyacente.

Para el diseño de terraplenes se deben tener en cuenta varios criterios:

1. La pendiente y altura deben producir un talud topográficamente estable.Si esto no es posible se deben construir estructuras de contención para el terraplén (Figura 12.33)
2. La compactación debe garantizar una resistencia interna suficiente
3. No deben bloquearse nacimientos de agua o zonas de humedad sin construir previamente un sistema de subdrenaje eficiente.
4. El contacto entre el suelo subyacente y el terraplén debe ser discontinuo para impedir la formación de una superficie de debilidad (Figura 12.34). Si persiste la posibilidad de movimiento se deben diseñar y construir llaves de cortante debajo del terraplén.(Figura 12.35).
5. El peso del terraplén no debe superar la capacidad de soporte del suelo sobre el cual se coloca, ni producir deslizamiento del suelo subyacente. Para disminuir el peso del terraplén se puede requerir la utilización de materiales livianos para el relleno.

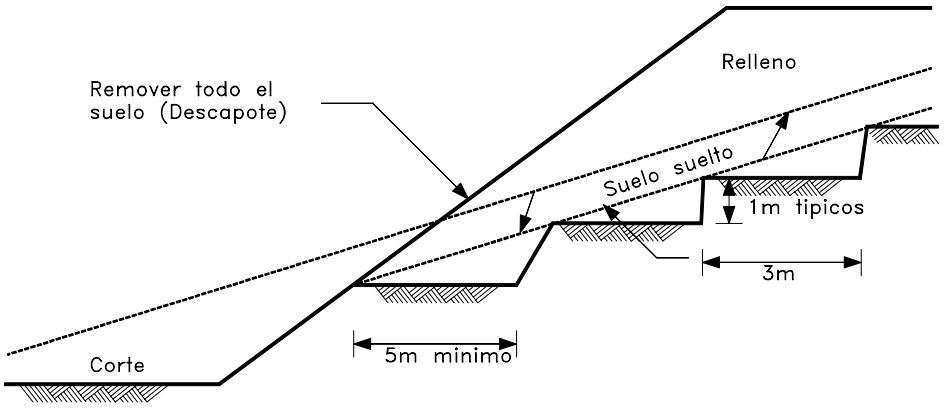

Figura 12.37 Preparación del terreno del talud previamente a la colocación de terraplenes.

Llaves de cortante en terraplenes

Las llaves de cortante son utilizadas para proveer una resistencia adicional al deslizamiento horizontal de la base de terraplenes o bermas. El principal propósito de la llave de cortante es forzar al círculo crítico a profundizarse a una formación profunda más resistente. Este método es muy efectivo cuando a poca profundidad debajo del terraplén aparecen mantos de suelos duros.
Para la construcción de la llave se realiza una excavación en zanja por debajo del nivel del terraplén y esta se rellena con roca o materiales muy competentes compactados . En su construcción debe tenerse cuidado de no producir un deslizamiento con la excavación.

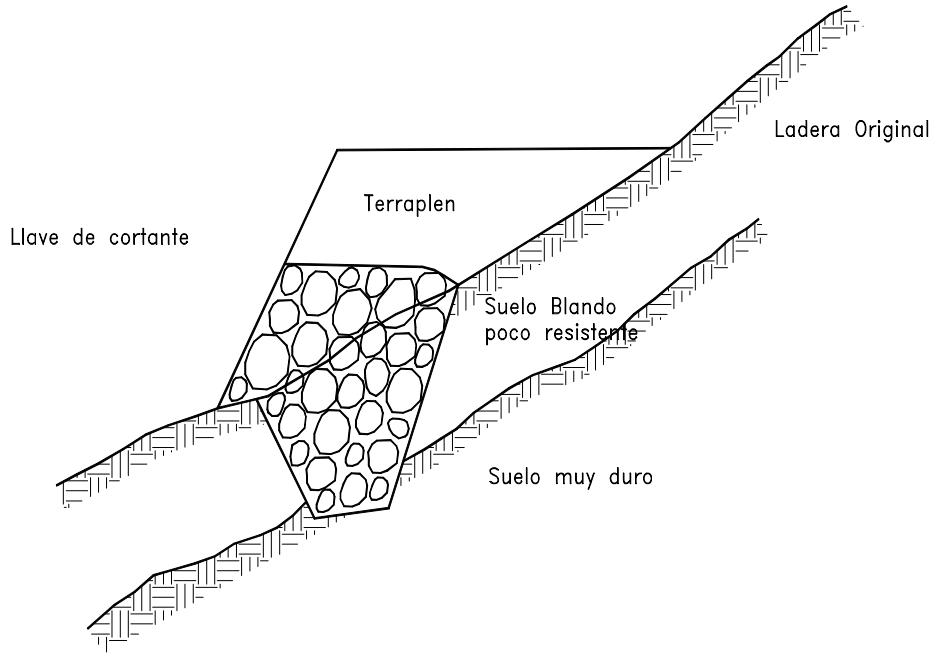

Figura 12.38 Llaves de cortante para terraplenes.

Reducción de peso de terraplenes

El uso de materiales livianos en terraplenes es una medida que puede ser muy efectiva para reducir las fuerzas gravitacionales que causan la inestabilidad. El tipo de material liviano a utilizar depende de su disponibilidad y costo
La lista de materiales livianos es muy larga e incluye:

- Arcillas o lutitas expandidas
- Aserrín de madera
- Tamo de arroz
- Residuos de extracción de aceite de palma
- Carbón
- Cenizas de residuos de Carbón
- Concreto Celular
- Poliestireno expandido
- Llantas usadas (Enteras o picadas)
- Conchas de ostras y almejas
- Turba seca
- Ladrillo partido
- Escoria
- Piedra pómez
- Materiales geológicos livianos.

Las ventajas o desventajas de algunos de estos materiales es descrita por Holtz (1989).

REFERENCIAS

Bodocsi, A., Bowers, M.T. (1991). "Permeability of acrylate, urethane and silicate grouted sands with chemicals". Proc. American Society Civil Engineers, journal Geotechnical Engineering Division, 117 (8), 1227-44.

Boyton, R.S., Blacklock J.R. (1985). "Lime slurry pressure injection Bulletin". Bulletin 331. National Lime Association, Arlington, Va., 43 pp.

Broms, B.B. (1991). "Stabilization of Soil with Lime Columns" Foundation Engineering Handbook, H.Y. Fang, Ed. New York: Van Nostrand Reinhold, Chapter 24, pp. 833-855.

C.D.M.B. (1995). "Normas técnicas para control de erosión". Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. 57 p.

Chummar A.V. (1992) "Stability of hill slopes prone to slides" Proceedings of the sixth international symposium on Landslides, Christchurch, pp. 683-686.

Geotechnical Control Office. (1984) "Geotechnical Manual for Slopes", 2nd ed. Hong Kong: Engineering Development Department.

Geotechnical Control Office. (1985) "Description of the Geotechnical control office engineering development department". Hong Kong. 8 pp.

Holtz R.D. (1989) "Synthesis of Highway practice 147:Treatment of problem foundations for Highway Embankments" Transportation Research Board Washigton D.C. pp. 14-16.

Holtz R.D., Schuster R.L. (1996) "Stabilization of soil slopes". Landslides investigation and mitigation. Special report 247. Transportation research Board. National research council.pp. 439-473.

Kockelman, W.J. (1986) "Some techniques for reducing landslide hazards". Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. 23, No. 1, pp. 29-52.

Pfeiffer, T.J., T.D. Bowen. (1989). "Computer simulation of rockfalls". Bulletin of the Association of engineering Geology, Vol. 26 No. 1, pp. 135-146.

Piteau, D.R. (1980). "Slope stability analysis for rock fall problems: The computer rock fall model for simulating rock fall distributions". In rock slope engineering, Part D, Reference Manual FHWA-TS-79-208, FHWA, U.S. Department of Transportation, pp. 62-68

Ritchie, A.M. (1963). "Evaluation of rock falla and its control". In Highway Research record 17, HRB, National research council, Washigton, D.C., pp. 13-28.

Rogers, C.D.F. (1991). " Slope stabilization using lime. In Proc., International conference on slope stability engineering: developments and applications", Institution of Civil engineers, Isle of Wight, Thomas Telford, Ltd., pp. 335-492.

Schuster R.L., Kockelman W.J. (1996) "Principles of landslide hazard reduction". Landslides investigation and mitigation, Special report 247, Transportation Research Board. Pp. 91-105.

U.S Geological Survey (1982). "Goal and tasks of the landslide part of a ground –failure hazards reduction program". U.S. Geological Survey circular 880, 49 p.

Wyllie D.C., Norrish N.E. (1996). "Stabilization of rock slopes". Landslides investigation and mitigation, Special report 247, Transportation Research Board. pp. 474-504.

Wu, S.S. (1984). "Rockfall evaluation by computer simulation". Transportation research record 1031, TRB, National research council, Washigton, D.C., pp. 1-5

13 Control de aguas superficiales y subterráneas

13.1 INTRODUCCION

Los métodos de estabilización de deslizamientos que contemplen el control del agua, tanto superficial como subterránea son muy efectivos y son generalmente, más económicos que la construcción de grandes obras de contención, en cuanto tienden a desactivar la presión de poros, considerada como el principal elemento desestabilizante de los taludes. El drenaje reduce el peso de la masa y al mismo tiempo aumenta la resistencia del talud al disminuir la presión de poros.

Existen varias formas de drenaje, superficial y profundo. El objetivo principal de estos métodos es el de disminuir la presión de poros y en esa forma aumentar la resistencia al corte y eliminar las fuerzas hidrostáticas desestabilizantes. El factor de seguridad de cualquier superficie de falla que pasa por debajo del nivel de agua puede ser mejorado por medio de subdrenaje.

Sistemas de control de aguas

Los sistemas más comunes para el control del agua son:

1. Zanjas de coronación o canales colectores (Drenaje Superficial).
2. Cortinas subterráneas.
3. Drenes interceptores.
4. Subdrenes horizontales o de penetración.
5. Galerías y túneles de drenaje.
6. Drenes verticales.
7. Trincheras estabilizadoras.
8. Pantallas de drenaje.
9. Pozos de drenaje.

La efectividad de los sistemas varía de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas y climáticas.

En cualquier sistema de subdrenaje el monitoreo posterior a su construcción es muy importante, deben instalarse piezómetros antes de la construcción de las obras de control que permitan observar el efecto del subdrenaje y a largo plazo dar información sobre la eficiencia del sistema, el cual puede ser deteriorado por taponamiento o desgaste.

El volumen de agua recolectada no es necesariamente un indicativo de su efecto, debido a que en suelos poco permeables, se puede obtener una reducción muy importante en las

presiones de poro y por lo tanto un aumento en el factor de seguridad, con muy poco flujo de agua hacia el sistema de subdrenaje.
En masas de roca el flujo de agua generalmente, está determinado por las juntas y por lo tanto cualquier sistema de drenaje debe estar destinado a interceptarlas.

13.2 DRENAJE SUPERFICIAL

El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud reduciendo la infiltración y evitando la erosión.
El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar la escorrentía tanto del talud como de la cuenca de drenaje arriba del talud y llevar el agua a un sitio seguro lejos del deslizamiento. El agua de escorrentía debe en lo posible, desviarse antes de que penetre el área del deslizamiento. Esto puede lograrse con la construcción de zanjas interceptoras en la parte alta del talud, llamadas zanjas de coronación. No se recomienda en problemas de taludes la utilización de conducciones en tubería por la alta susceptibilidad a agrietarse o a taponarse, generando problemas de infiltración masiva concentrada.

Por otro lado el agua que cae por lluvias directamente sobre la superficie del talud, debe ser evacuada lo más rápidamente posible, evitando al mismo tiempo que su paso cause daños considerables al talud, por erosión, almacenamientos e infiltraciones; perjuicios que pueden ser evitados, tratando el talud con una serie de medidas que favorezcan el drenaje. Entre las más utilizadas son: sellado de grietas con arcilla y empradización, imprimación del talud con asfalto, recubrimiento con plásticos, recubrimiento parcial o total con enrocado, conformación y nivelación para evitar o eliminar depresiones y alcantarillas superficiales.
En ocasiones es importante la construcción de medidas temporales de drenaje superficial después de ocurrido un deslizamiento para evitar su ampliación o aceleración. Estas obras pueden consistir en diques o canales de bolsas de polipropileno o fibras vegetales rellenas de suelo.

Caudal de escorrentía

La escorrentía recogida depende de varios factores, los cuales incluyen: Intensidad de la lluvia, área de drenaje, pendiente y longitud de los taludes a drenarse, naturaleza y extensión de la vegetación o cultivos, condiciones de la superficie y naturaleza de los suelos subsuperficiales.
Generalmente se recomienda para diseño de obras de drenaje taludes, la utilización del método racional para calcular las cantidades de agua recogida, debido a que los caudales calculados por la fórmula racional tienen intrínsecamente un factor de seguridad mayor que otros métodos.

$$Q = \frac{KiA}{3.600}$$

Donde:
Q = Caudal recolectado (litros/seg.).
i = Intensidad de Lluvia de diseño (mm/hora, la cual depende del tiempo de concentración.