

DESLIZAMIENTOS Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN ZONAS TROPICALES

JAIME SUAREZ DIAZ

Profesor Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga – Colombia

Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos

Suárez Díaz Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales

© 1998, Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

La legislación autoral colombiana (Ley 23 de 1982) en su artículo 32 permite la utilización de las obras o parte de ellas con propósitos de enseñanza y sin fines de lucro, con la obligación de mencionar el nombre del autor y el título de la obra utilizada.

Editor: Ingeniería de Suelos Ltda.

Dibujos: Luis Leonardo Silva Sarquez - Climaco Acevedo Prada

Diseño cubierta: Publicaciones UIS

Impresión: Publicaciones UIS

Publicación: Julio de 1998

Número de ejemplares: 1.000

ISBN

Distribuido por Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos Ltda. Calle 41 # 28-33 Bucaramanga, Colombia.

Fax + 57 – 76457507

E Mail Erosion@multinet.com.co

Impreso en Colombia

A Fanny , la persona que sufrió conmigo día y noche durante cinco años para lograr la meta de publicar el presente libro.

Contenido

PRESENTACION	Pág. ix
CAPITULO 1	
Caracterización de los Movimientos	1
1.2 Nomenclatura de un talud o ladera.....	1
1.3 Nomenclatura de los procesos de movimiento.....	3
1.4 Dimensiones.....	4
1.5 Etapas en el proceso de falla.....	5
1.6 Procesos en la etapa de deterioro.....	6
1.7 Clasificación de los movimientos de Varnes.....	11
1.8 Caracterización del movimiento.....	24
1.9 Movimientos post-falla.....	29
1.10 Evolución o proceso de falla.....	30
CAPITULO 2	
Procedimientos de Investigación	35
2.2 Organización del estudio.....	39
2.3 Procedimiento de análisis de la información existente.....	41
2.4 Visita de reconocimiento.....	44
2.5 Estudio topográfico.....	45
2.6 Investigación geotécnica detallada.....	47
2.7 Sondeos geotécnicos.....	51
2.8 Ensayos de campo.....	57
2.9 Ensayos geofísicos.....	63
2.10 Ensayos de laboratorio.....	66
2.11 Instrumentación.....	67
2.12 Caracterización de un deslizamiento.....	75
CAPITULO 3	
Esfuerzo y Resistencia al Cortante	81
3.2 Circulo de Mohr.....	85
3.3 Medición de la resistencia al cortante.....	87
3.4 Ensayos de laboratorio.....	89
3.5 Ensayos in situ.....	97
3.6 Diferencias entre las resistencias de campo y de laboratorio.....	100
3.7 Resistencia de suelos residuales y saprolitos.....	102
3.8 Resistencia al cortante de algunos suelos comunes.....	105
3.9 Resistencia al cortante de rocas.....	107

CAPITULO 4	
Métodos de Análisis de Estabilidad	117
4.2 Equilibrio límite y factor de seguridad.....	121
4.3 Métodos de análisis.....	123
4.4 Métodos numéricos y aplicaciones del computador.....	133
4.5 Análisis de estabilidad de taludes en roca.....	136
4.6 Análisis sísmico.....	148
CAPITULO 5	
Litología y Estructura Geológica	151
5.2 Litología.....	152
5.3 Grupos litoestructurales.....	163
5.4 Microestructura de las rocas.....	164
5.5 Estructura de la masa de roca.....	168
5.6 Fallas controladas por la estructura.....	175
5.7 Condiciones de deslizamiento y volteo en rocas.....	177
5.8 Coluviones.....	178
CAPITULO 6	
Suelos Residuales	185
6.2 Metodología para la caracterización integral de los suelos residuales.....	187
6.3 El proceso de meteorización.....	189
6.4 Microestructura de los suelos residuales.....	195
6.5 Estructura de los suelos residuales.....	197
6.6 Propiedades mecánicas de los suelos residuales.....	199
6.7 Suelos residuales especiales.....	207
6.8 Superficies preferenciales de falla a deslizamiento.....	209
6.9 Clasificación de la FAO para suelos tropicales.....	211
6.10 Sistema de clasificación de suelos residuales de Wesley.....	213
6.11 Caracterización del perfil de suelos residuales.....	215
6.12 Perfiles de meteorización y deslizamientos de los taludes en algunos suelos residuales.....	218
CAPITULO 7	
Lluvias, Presión de Poros y sus Efectos	233
7.2 Régimen de lluvias.....	233
7.3 La humedad superficial.....	236
7.4 La infiltración.....	237
7.5 El flujo no saturado.....	238
7.6 Presiones de poro negativas.....	244
7.7 El nivel freático.....	245
7.8 La presión de poros.....	248

7.9	Flujo saturado.....	249
7.10	Coefficiente de permeabilidad.....	254
7.11	Efectos del agua subterránea.....	255
7.12	Deslizamientos relacionados con las aguas subterráneas.....	257
7.13	Comportamiento de presas de tierra.....	260
7.14	El agua superficial o escorrentía.....	262
7.15	La erosión.....	263

CAPITULO 8
Vegetación y Bioingeniería **275**

8.2	Características de las plantas y del suelo fértil.....	277
8.3	Efectos hidrológicos de la vegetación.....	277
8.4	Control de erosión.....	280
8.5	Sobrecarga y fuerza del viento.....	281
8.6	Características de las raíces.....	283
8.7	Acción de refuerzo de las raíces.....	288
8.8	Análisis de Estabilidad teniendo en cuenta las raíces.....	292
8.9	Diseño de revegetalización.....	293
8.10	Bioingeniería	294

CAPITULO 9
Amenazas Sísmicas **303**

9.2	Sismicidad.....	304
9.3	Características de las ondas sísmicas.....	308
9.4	Análisis de amenaza sísmica.....	309
9.5	Susceptibilidad sísmica.....	310
9.6	Ampliación de la onda en el sitio.....	317
9.7	Licuación.....	317
9.8	Características de los deslizamientos cosísmicos.....	321
9.9	Fracturación cosísmica.....	325
9.10	Deslizamientos por actividad volcánica.....	327
9.11	Análisis sísmico de taludes.....	328

CAPITULO 10
Procesos de origen Antrópico **335**

10.2	Procesos de urbanización.....	336
10.3	Modificaciones de la topografía.....	338
10.4	Deforestación.....	344
10.5	Cambios hidrológicos.....	344
10.6	Procesos de erosión urbana.....	350

CAPITULO 11
Zonificación de Amenaza y Riesgo **355**

11.2	Definición de términos.....	356
viii	Contenido	
11.3	Susceptibilidad.....	358
11.4	Amenaza.....	362
11.5	Vulnerabilidad.....	368
11.6	Riesgo.....	370
11.7	Uso de sistemas de información geográfica.....	376

CAPITULO 12	
Prevención, Estabilización y Diseño	385
12.2 Métodos para disminuir o eliminar el riesgo.....	385
12.3 Prevención.....	391
12.4 Restricciones al desarrollo de áreas de riesgo.....	392
12.5 Métodos de elusión de la amenaza.....	395
12.6 Métodos de estructuras de control de movimientos.....	396
12.7 Mejoramiento de la resistencia del suelo.....	402
12.8 Protección de la superficie del talud.....	415
12.9 Modificación de la Topografía.....	417
12.10 Diseño de terraplenes.....	425
CAPITULO 13	
Control de Aguas Superficiales y Subterráneas	429
13.2 Drenaje superficial.....	430
13.3 Drenaje subterráneo.....	440
13.4 Drenes horizontales o de penetración.....	452
13.5 Colchones de drenaje.....	459
13.6 Trincheras estabilizadoras.....	459
13.7 Pantallas de drenaje.....	461
13.8 Galerías de drenaje.....	463
13.9 Pozos verticales de drenaje.....	465
13.10 Subdrenaje de estructuras de contención.....	468
13.11 Drenaje por electroosmosis.....	471
CAPITULO 14	
Estructuras de Contención o Refuerzo	473
14.2 Muros rígidos.....	488
14.3 Presiones de tierra en condiciones estables.....	492
14.4 Muros flexibles.....	503
14.5 Tierra reforzada.....	512
14.6 Estructuras ancladas.....	518
14.7 Estructuras enterradas.....	533
INDICE	541

Presentación

Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, pretende ser un texto guía para el estudio y la práctica de Ingeniería y Geotécnia, incluyendo análisis, diseño y construcción de taludes con énfasis en los problemas de deslizamientos de tierra.

Inicialmente, el texto eran los apuntes de clase del curso de Estabilidad de Taludes en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y el primer borrador fue publicado en forma artesanal por un grupo de personas interesadas en la divulgación de los conocimientos de Ingeniería en Colombia. Posteriormente y por solicitud de ingenieros interesados en el tema, se decidió presentar esta publicación en forma de libro.

Previamente a la publicación del presente libro, se requirió un trabajo de investigación sobre el estado del arte de la estabilidad de taludes en suelos residuales durante cinco años de trabajo permanente y con dedicación de varias horas diarias. La recopilación de información fue difícil, debido a que existen muy pocos libros guía sobre este tema en el mundo y se tuvo que acudir a la asistencia a congresos internacionales en las regiones más alejadas del mundo.

La estabilidad de taludes es una ciencia que demanda una gran cantidad de experiencia y por esta razón se requirieron muchos años para adquirirla y poder presentar un estado del arte sobre el tema. La mayor parte de esta experiencia fue obtenida en el manejo de problemas de estabilidad de taludes en los Andes Colombianos, especialmente en el estudio de suelos residuales de montaña tropical; Sin embargo, el libro incluye una gran cantidad de conocimientos que son comunes a materiales no tropicales, basados en la mecánica de suelos y la Ingeniería Geotécnica tradicional.

El libro, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales está dirigido con la misma intensidad tanto a los profesionales en la práctica de la geotécnia como a los estudiantes de Geología e Ingenierías Civil y Ambiental a niveles de pregrado y post-grado, aunque el nivel del libro requiere de conocimientos básicos previos de Geología, y mecánica de suelos para su mejor comprensión.

Algunos temas fueron tratados a profundidad, teniendo en cuenta que no existen publicaciones sobre el tema en idioma español y otros se trataron en forma general, debido a que existen otros textos mucho más especializados sobre temas específicos de la mecánica de suelos o la Geología.

x Presentación

Es necesario enfatizar que el presente manual es un documento guía y sus recomendaciones no son mandatorias ni aplicables en todos los casos, y que el conocimiento de la Ingeniería Geotécnica está evolucionando a una rata tal, que en pocos años los conceptos pueden requerir una re-evaluación.

La idea actual, es el realizar actualizaciones periódicas del presente texto en el momento en que exista suficiente conocimiento adicional que lo justifique.

Agradezco la colaboración recibida por numerosas personas que ayudaron en la preparación y revisión del libro pero en especial quiero dejar constancia que el presente libro no hubiera podido ser realizado sin la ayuda de Fanny Ardila Rodríguez y Leonardo Silva Sarquez, quienes dedicaron varios meses de su tiempo libre a trabajar arduamente en la elaboración del libro.

Es importante para mi, recibir observaciones, comentarios y recomendaciones, las cuales serán incluidas en las próximas ediciones.

Jaime Suárez Díaz
Julio, 1998

1 Caracterización de los movimientos

1.1 INTRODUCCION

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

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

El presente texto intenta presentar un estado del arte en el análisis de deslizamientos de tierra en zonas tropicales y el diseño de obras de estabilización.

Previamente a la profundización en el estudio del comportamiento de los taludes en zonas tropicales, se requiere establecer una serie de pautas en lo referente a nomenclatura y clasificación. Para ello en la literatura se encuentran dos sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson (1968) y por Varnes (1958 y 1978). Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y es el sistema que se utiliza en el presente texto; Sin embargo, a esta clasificación se agregaron algunos factores importantes, entre ellos la diferenciación entre los procesos de deterioro y los de deslizamiento, pero en términos generales se mantuvieron los principios básicos de la clasificación del Transportation Research Board.

1.2 NOMENCLATURA DE UN TALUD O LADERA

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 1.1).

2 Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales

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

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

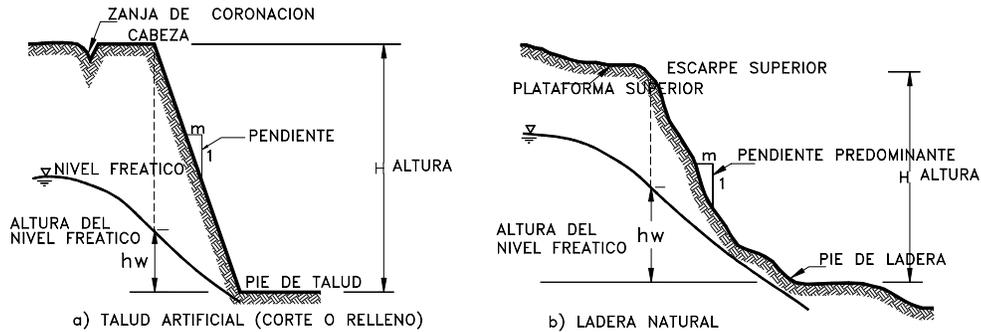


Figura 1.1. Nomenclatura de taludes y laderas.

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

1. *Altura*

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.

2. *Pie*

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

3. *Cabeza o escarpe*

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

4. *Altura de nivel freático*

Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

5. *Pendiente*

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

Ejemplo: Pendiente : 45° , 100%, o 1H:1V.

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

1.3 NOMENCLATURA DE LOS PROCESOS DE MOVIMIENTO

Los procesos geotécnicos activos de los taludes y laderas corresponden generalmente, a movimientos hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelo natural o relleno, o una combinación de ellos. Los movimientos ocurren generalmente, a lo largo de superficies de falla, por caída libre, movimientos de masa, erosión o flujos. Algunos segmentos del talud o ladera pueden moverse hacia arriba, mientras otros se mueven hacia abajo.

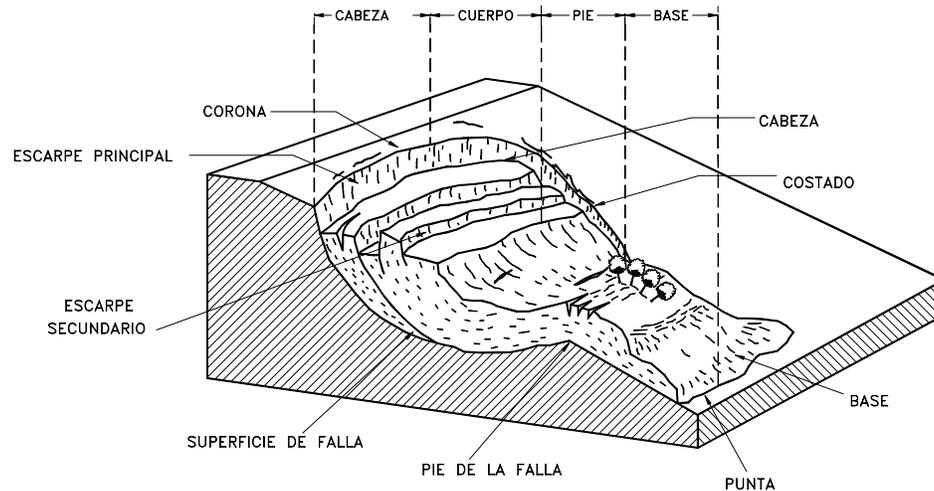


Figura 1.2. Nomenclatura de un deslizamiento.

En la figura 1.2 se muestra un deslizamiento o movimiento en masa típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

1. *Escarpe principal*

Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.

2. *Escarpe secundario*

Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

3. *Cabeza*

Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

4. *Cima*

El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

5. *Corona*

El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.

6. Superficie de falla

Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.

7. Pie de la superficie de falla

La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

8. Base

El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

9. Punta o uña

El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

10. Costado o flanco

Un lado (perfil lateral) del movimiento.

11. Superficie original del terreno

La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

12. Derecha e izquierda

Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

1.4 DIMENSIONES

Para definir las dimensiones de un movimiento se utiliza la terminología recomendada por el IAEG (Figura 1.3):

1. Ancho de la masa desplazada W_d

Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud, L_d .

2. Ancho de la superficie de falla W_r

Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud L_r .

3. Longitud de la masa deslizada L_d

Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

4. Longitud de la superficie de falla L_r

Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

5. Profundidad de la masa desplazada D_d

Máxima profundidad de la masa movida perpendicular al plano conformado por W_d y L_d

6. Profundidad de la superficie de falla D_r

Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por W_r y L_r .

7. Longitud total L

Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

8. Longitud de la línea central L_{cl}

Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

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

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

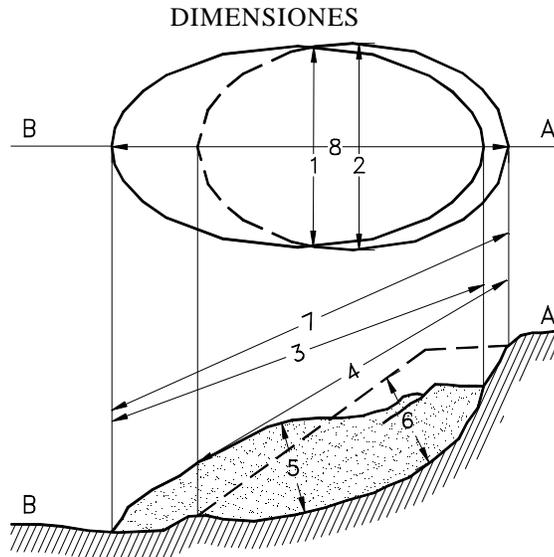


Figura 1.3. Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG Commission on Landslides (1990).

1.5 ETAPAS EN EL PROCESO DE FALLA

La clasificación de deslizamientos pretende describir e identificar los cuerpos que están en movimiento relativo. Las clasificaciones existentes son esencialmente geomorfológicas y solamente algunas de ellas introducen consideraciones mecánicas o propiamente geológicas.

Las caracterizaciones geotécnicas son necesarias y por esta razón, las clasificaciones eminentemente topográficas y morfológicas, como las propuestas por Varnes (1978), Hutchinson (1988), etc., deben adaptarse a las condiciones verdaderas de los movimientos.

En este orden de ideas se deben considerar cuatro etapas diferentes en la clasificación de los movimientos:

- a. Etapa de deterioro o antes de la falla donde el suelo es esencialmente intacto.
- b. Etapa de falla caracterizada por la formación de una superficie de falla o el movimiento de una masa importante de material.
- c. La etapa post-falla que incluye los movimientos de la masa involucrada en un deslizamiento desde el momento de la falla y hasta el preciso instante en el cual se detiene totalmente.

d. La etapa de posible reactivación en la cual pueden ocurrir movimientos que pueden considerarse como una nueva falla, e incluye las tres etapas anteriores.

1.6 PROCESOS EN LA ETAPA DE DETERIORO

El deterioro, con el tiempo puede dar lugar a la necesidad de mantenimiento o construcción de obras de estabilización. Al deterioro, sin embargo, se le da muy poca atención en el momento del diseño y el énfasis se dirige a evitar las fallas profundas, más que a evitar los fenómenos anteriores a la falla.

Cuando un talud se corta, para la construcción de una vía o de una obra de infraestructura, ocurre una relajación de los esfuerzos de confinamiento y una exposición al medio ambiente, cambiándose la posición de equilibrio por una de deterioro acelerado.

El deterioro comprende la alteración física y química de los materiales y su subsecuente desprendimiento o remoción. Este incluye la alteración mineral, los efectos de relajación y la abrasión. La iniciación y propagación de fracturas es de significancia particular en la destrucción de la superficie que puede conducir a caídos de roca o colapso del talud.

La clasificación de los modos comunes de deterioro fue propuesta por Nicholson y Hencher (1997), pero en el presente texto se amplió con el objeto de incluir la mayoría de los procesos que ocurren previamente a la falla masiva.

1. Caída de granos

Consiste en la caída de granos individuales de la masa de roca con desintegración física a granos como prerequisite. Depende de la resistencia de las uniones intergranulares y las microgrietas relacionadas con los granos.

Causa un debilitamiento general del material de roca. No representa una amenaza en sí misma pero puede conducir a la pérdida de soporte y subsecuente colapso en pequeña escala. Los finos pueden sedimentarse y producir depósitos dentro de las estructuras de drenaje.

Como solución se sugiere la limpieza de los residuos en el pie del talud y el cubrimiento con técnicas de bioingeniería concreto lanzado y refuerzo local, donde exista riesgo de colapso.

2. Descascaramiento

Caída de cáscaras de material de la masa de roca. Las cáscaras tienen forma de láminas con una dimensión significativamente menor a las otras dos dimensiones. Puede reflejar la litología, fisilidad, o puede reflejar la penetración de la meteorización.

Los fragmentos en forma de láminas no son grandes y no constituyen una amenaza significativa, sin embargo, se produce un depósito de sedimentos en el pie del talud.

Como tratamiento se sugiere las técnicas de bioingeniería y concreto lanzado con pequeños anclajes y obras de concreto dental.

PROCESOS DE DETERIORO

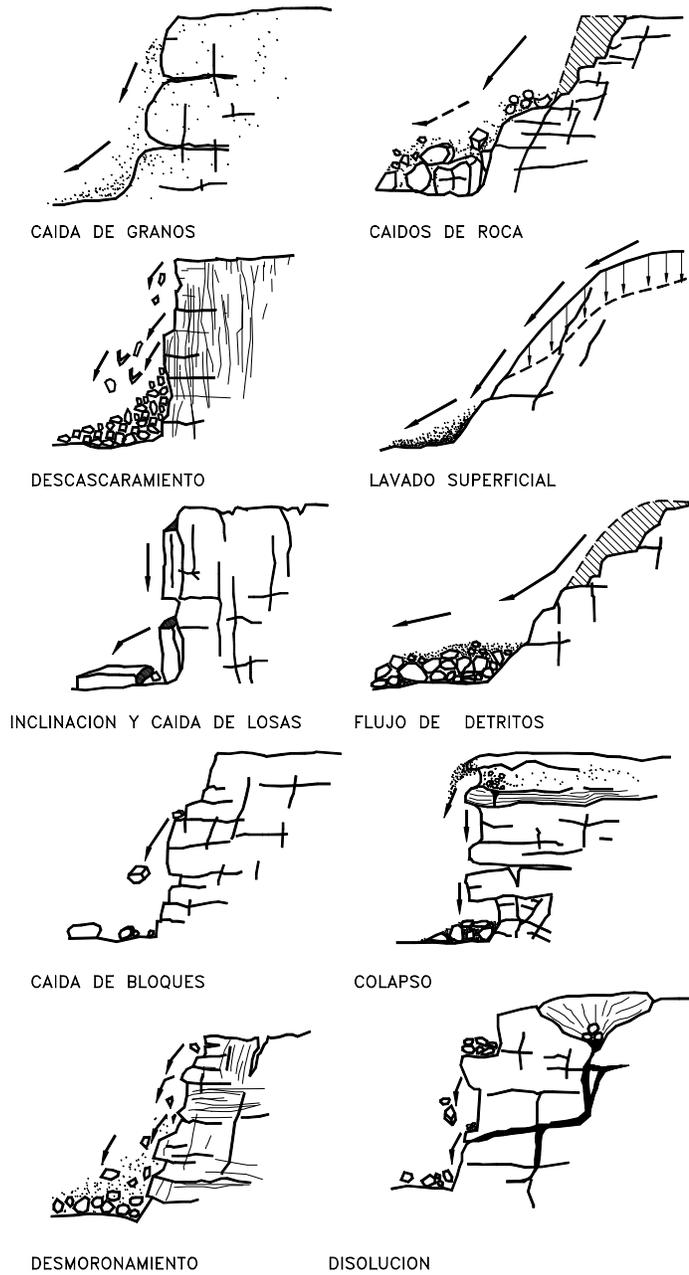


Figura 1.4. Procesos de deterioro en macizos rocosos (Nicholson y Hencher – 1997).

3. Formación, inclinación y caída de losas de roca

Se forman prismas o pequeñas placas con dimensión mínima de 50 mm, pudiendo existir deslizamiento y rotación o pandeo. Generalmente, las fracturas a tensión paralelas a la superficie del talud son prerequisite para su ocurrencia, seguidas por la pérdida de soporte.

Pueden caer grandes bloques de material y pueden significar una amenaza importante, causando daño a los canales de drenaje, cercas, pavimentos o puede crear taludes negativos. Las inclinaciones pueden considerarse como un proceso de deterioro o como un movimiento del talud.

Como tratamiento se sugiere la construcción de gradas o escaleras, bermas intermedias, refuerzo con pernos o estructuras de contención.

4. Caídos de bloques

Pueden caer por gravedad, en forma ocasional bloques individuales de roca de cualquier dimensión, produciendo un deterioro en la estructura del talud.

La amenaza es difícil de predecir debido al gran rango de tamaños que pueden caer y especialmente los bloques grandes pueden causar daño estructural. En ocasiones bajan saltando y rodando y pueden caminar grandes distancias. Estos caídos corresponden a los caídos de roca en la clasificación general de movimientos en taludes.

Como tratamiento se sugiere la construcción de gradas, la utilización de mallas de acero, concreto lanzado o mampostería.

5. Desmoronamiento del talud

El desmoronamiento general del talud produce la caída de bloques de diversas dimensiones en forma semicontinua. Puede causar una amenaza significativa y crear grandes acumulaciones de detritos en el pie del talud.

Como solución se sugiere la construcción de gradas, colocación de mallas, trampas para detritos y cercas protectoras; también se pueden construir estructuras de submuración en mampostería o concreto lanzado. Los bloques grandes pueden requerir aseguramiento con pernos, anclajes o cables.

Las áreas con desintegración severa pueden requerir soporte total o disminuir el ángulo de inclinación del talud.

6. Caídos de roca

La caída de muchos bloques de roca “en un solo evento” requiere que haya ocurrido un debilitamiento de la masa de roca, debido a la fragmentación y a la ausencia de soporte lateral. El volumen de la falla depende de los diversos planos de discontinuidad y puede cubrir en un solo momento varios planos (falla en escalera).

7. Lavado superficial o erosión

La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas.

Las gotas de lluvia pueden contribuir al desprendimiento de las partículas o granos. Puede producir sedimentación de materiales en el pie del talud.

Como solución se propone generalmente, la construcción de obras de drenaje y de bioingeniería, así como concreto dental, concreto lanzado o modificaciones de la topografía del talud.

Los procesos de erosión son muy comunes en suelos residuales poco cementados o en suelos aluviales, especialmente, los compuestos por limos y arenas finas principalmente, cuando la cobertura vegetal ha sido removida. Se conocen varios tipos de erosión:

a. Erosión Laminar

El proceso de erosión laminar se inicia por el impacto de las gotas de agua lluvia contra la superficie del suelo, complementada por la fuerza de la escorrentía produciendo un lavado de la superficie del terreno como un todo, sin formar canales definidos. Al caer las gotas de lluvia levantan las partículas de suelo y las reparten sobre la superficie del terreno.

La velocidad de las gotas de lluvia puede alcanzar valores hasta de 10 metros por segundo y su efecto es muy grande sobre las superficies de talud expuestos y sin cobertura vegetal. El proceso es particularmente grave cuando la pendiente del talud es grande, como es el caso de los taludes de cortes en obras viales.

b. Erosión en surcos

Los surcos de erosión se forman por la concentración del flujo del agua en caminos preferenciales, arrastrando las partículas y dejando canales de poca profundidad generalmente, paralelos. El agua de escorrentía fluye sobre la superficie de un talud y a su paso va levantando y arrastrando partículas de suelo, formando surcos (rills).

Los surcos forman una compleja microred de drenaje donde un surco al profundizarse va capturando los vecinos, formando surcos de mayor tamaño, los cuales a su vez se profundizan o amplían formando cárcavas en forma de V que pueden transformarse a forma de U.

Inicialmente la cárcava se profundiza hasta alcanzar una superficie de equilibrio, la cual depende de las características geológicas e hidráulicas, para luego iniciar un proceso de avance lateral mediante deslizamientos de los taludes semiverticales producto de la erosión.

La localización en cuanto a su profundidad y la velocidad de avance del proceso es controlada por los fenómenos de tipo hidráulico y por la resistencia del material a la erosión. Los surcos de erosión pueden estabilizarse generalmente, con prácticas de agricultura.

c. Erosión en Cárcavas

Las cárcavas constituyen el estado más avanzado de erosión y se caracterizan por su profundidad, que facilita el avance lateral y frontal por medio de desprendimientos de masas de material en los taludes de pendiente alta que conforman el perímetro de la cárcava.

Las cárcavas inicialmente tienen una sección en V pero al encontrar un material más resistente o interceptar el nivel freático se extienden lateralmente, tomando forma en U (Figura 1.5).

d. Erosión interna (Piping)

El agua al fluir por ductos concentrados dentro del suelo produce erosión interna, la cual da origen a derrumbamientos o colapsos que pueden generar un hundimiento del terreno o la formación de una cárcava.

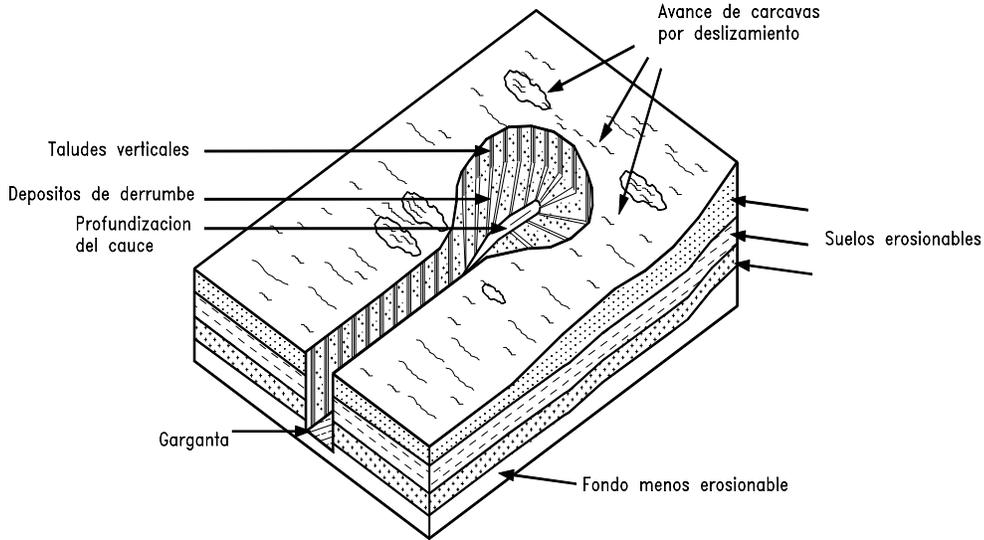


Figura 1.5. Esquema general de cárcava de erosión.

e. Erosión por afloramiento de agua

Un caso de erosión puede ocurrir en los sitios de afloramiento de agua, formando pequeñas cavernas y/o taludes negativos, los cuales a su vez pueden producir desprendimientos de masas de suelo.

8. Flujo de detritos

El desprendimiento y transporte de partículas gruesas y finas en una matriz de agua y granos en forma de flujo seco o saturado. Los flujos de detritos son impredecibles, mueven grandes volúmenes de material y pueden crear una amenaza moderada a alta.

Se requiere un análisis especial de cada caso para su tratamiento. Generalmente no se les considera como procesos de deterioro sino como deslizamientos. Sin embargo, pueden generar grandes deslizamientos del macizo al producir cambios topográficos importantes.

9. Colapso

Bloques independientes de gran tamaño colapsan debido a la falta de soporte vertical. El tamaño de los bloques es de más de 500 mm e incluyen los taludes negativos (overhangs). Representa una escala grande de amenaza, de acuerdo a su tamaño y potencial de colapso. Las soluciones incluyen concreto dental, estructuras de refuerzo, submuración y otras estructuras de retención.

10. Disolución

La disolución de materiales solubles en agua que puede ser acelerado por las condiciones locales, especialmente la presencia de aguas agresivas. Puede producir cavidades internas que podrían colapsar o formar cárcavas karsticas. Como tratamiento se sugiere la inyección o relleno de las cavidades o la construcción de estructuras de puente.

11. Expansión y contracción

En los suelos arcillosos se producen cambios de volumen por cambios de humedad asociados con el potencial de succión del material. Estas expansiones y contracciones producen agrietamientos y cambios en la estructura del suelo generalmente, con pérdida de la resistencia al cortante.

Se puede disminuir evitando los cambios de humedad o disminuyendo el potencial de expansión utilizando procedimientos físicos y químicos como es la adición de cal.

12. Agrietamiento cosísmico

Los eventos sísmicos pueden producir agrietamientos especialmente en los materiales rígidos y frágiles. Los agrietamientos cosísmicos debilitan la masa de talud y generan superficies preferenciales de falla. El agrietamiento cosísmico es menor cuando existe buen refuerzo subsuperficial con raíces de la cobertura vegetal.

13. Deformaciones por concentración de esfuerzos y fatiga

Los materiales al estar sometidos a esfuerzos de compresión o cortante sufren deformaciones, las cuales aumentan con el tiempo en una especie de fatiga de los materiales de suelo o roca. Estas deformaciones se pueden evitar disminuyendo los esfuerzos sobre el suelo, construyendo estructuras de contención o refuerzo.

14. Agrietamiento por tensión

La mayoría de los suelos poseen muy baja resistencia a la tensión y la generación de esfuerzos relativamente pequeños, (especialmente arriba de la cabeza de los taludes y laderas), puede producir grietas de tensión, las cuales facilitan la infiltración de agua y debilitan la estructura de la masa de suelo permitiendo la formación de superficies de falla.

1.7 CLASIFICACION DE LOS MOVIMIENTOS EN MASA

Para la clasificación de los movimientos en masa se presenta el sistema propuesto originalmente por Varnes (1978), el cual tipifica los principales tipos de movimiento.

Para el propósito del presente texto se presentan algunas observaciones del autor a los procesos de movimiento identificados por Varnes. Algunos de estos

movimientos están incluidos en la clasificación de los procesos de deterioro previos a un deslizamiento y es difícil identificar cuándo son procesos de deterioro y cuándo son componentes principales del movimiento del talud.

1. Caído

En los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. (Figuras 1.6 a 1.8).

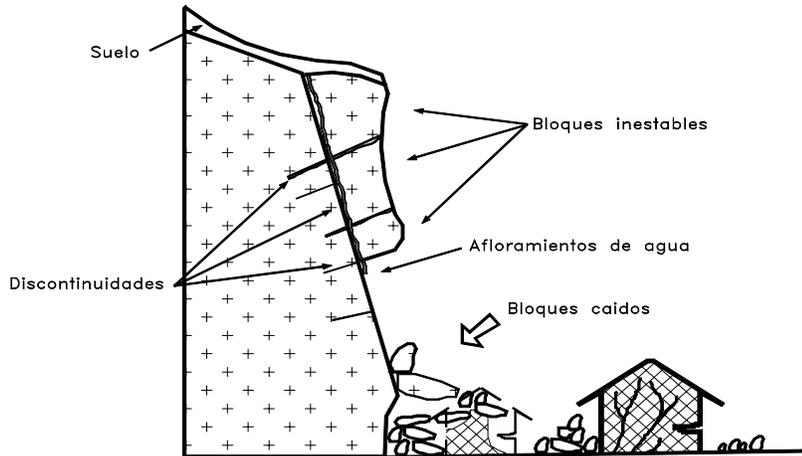


Figura 1.6 Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada.

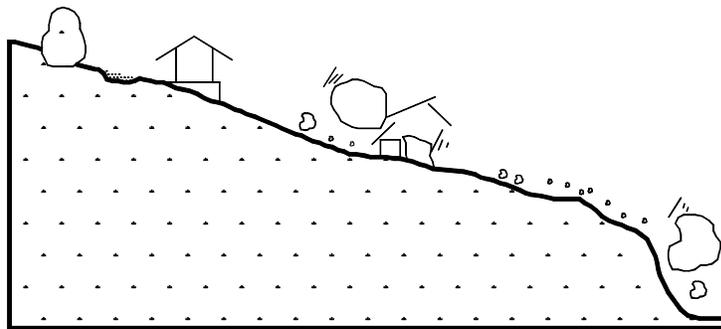


Figura 1.7 Caídos de bloques rodando.

El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material.

La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse como caídos de caída libre cuando la pendiente superficial es de más de 75 grados. En taludes

de ángulo menor generalmente, los materiales rebotan y en los taludes de menos de 45 grados los materiales tienden a rodar.

Los “caídos de roca” corresponden a bloques de roca relativamente sana, los caídos de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas (Figura 1.9).

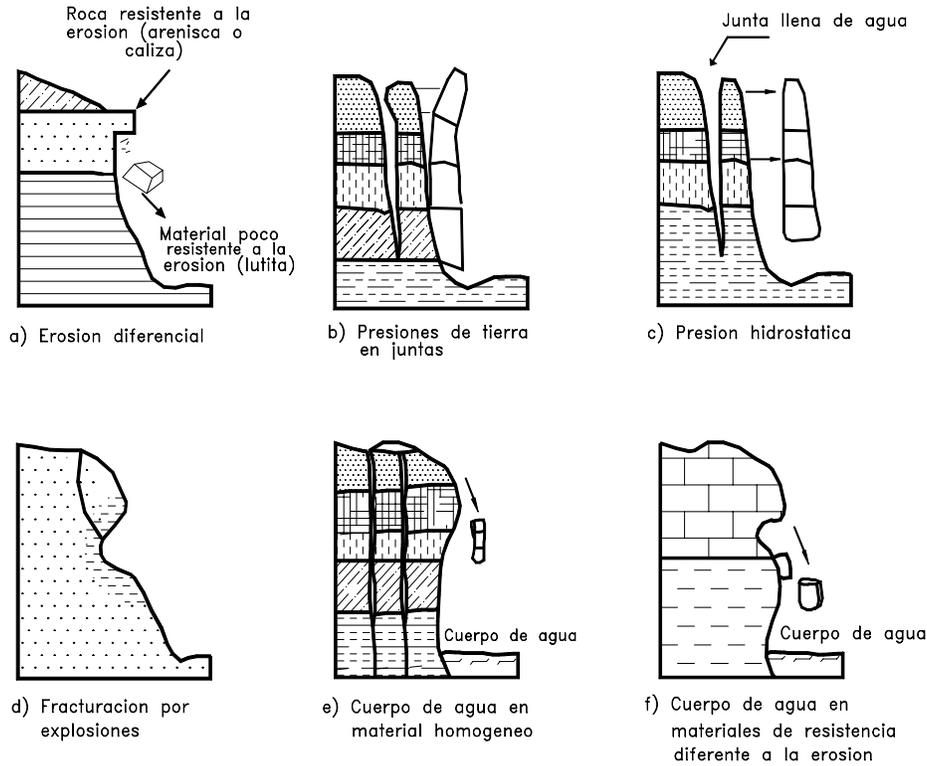


Figura 1.8 Algunos mecanismos de falla de caídos.

Wyllie y Norrish (1996) indican como causas de los caídos de roca en California la lluvia, la roca fracturada, el viento, la escorrentía, las fracturas planares adversas, el movimiento de los animales, la erosión diferencial, las raíces de los árboles, los nacimientos de agua, las vibraciones de maquinaria y vehículos y la descomposición del suelo.

Deben incluirse adicionalmente, los terremotos, los cortes de las vías, explotación de materiales y las actividades antrópicas.

2. Inclinación o volteo

Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas (Figura 1.10).

14 Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales

Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos. La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos.

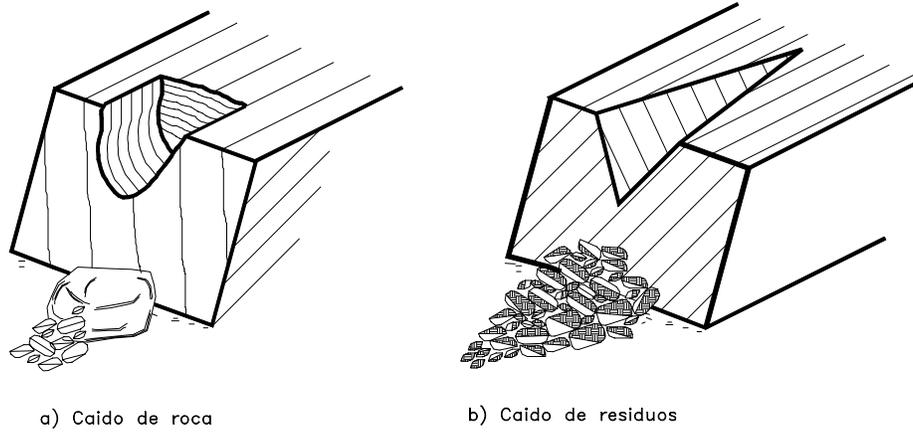


Figura 1.9. Esquema de caídos de roca y residuos.

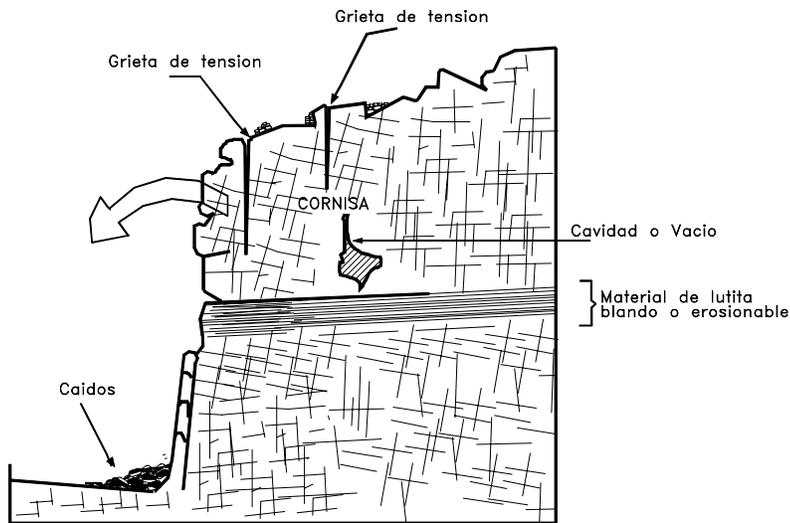


Figura 1.10. Volteo o inclinación en materiales residuales.

Dependiendo de las características geométricas y de estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes (Figuras 1.11 y 1.12). Las inclinaciones pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas. Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación.

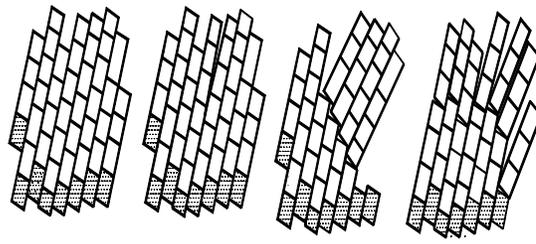


Figura 1.11 Proceso de falla al volteo.

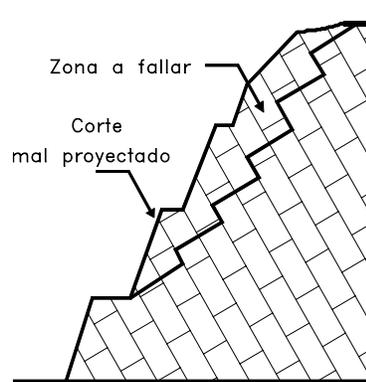


Figura 1.12 El volteo puede generar un desmoronamiento del talud o falla en escalera.

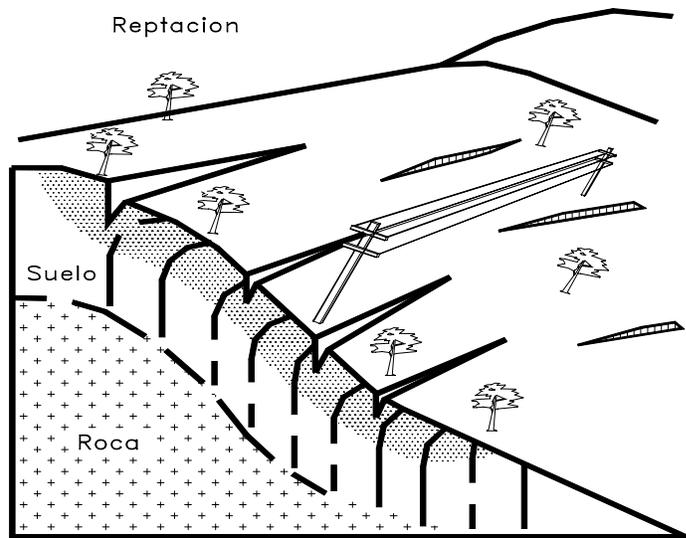


Figura 1.13. Esquema de un proceso de reptación.

3. Reptación

La reptación consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Generalmente, el movimiento es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno (Figura 1.13).

Se le atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados.

La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como los flujos o deslizamientos.

4. Deslizamiento

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada (Figura 1.14). El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla.

Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes.

Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos, deforestación, etc.

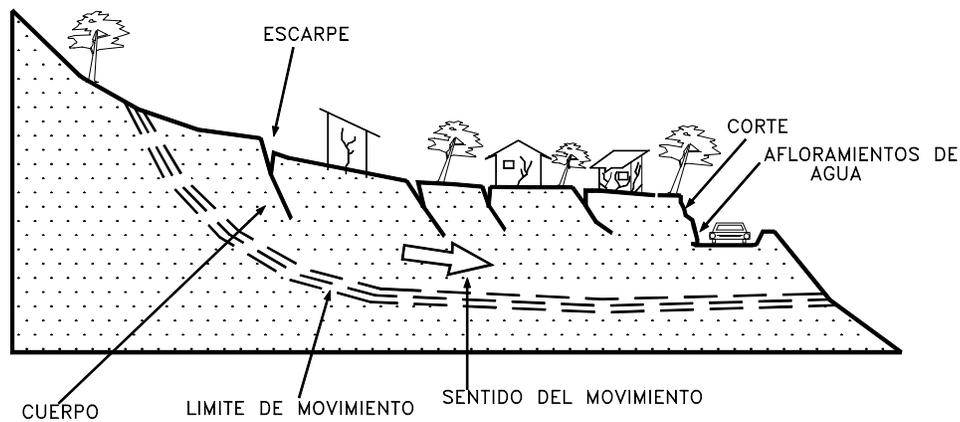


Figura 1.14 Deslizamientos en suelos blandos.

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y translacionales o planares. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse.

a. Deslizamiento Rotacional

En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento (Figura 1.15).

Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento.

En muchos deslizamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de “cuchara”. Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser semi-vertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos.

El movimiento aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparentemente semi-vertical y tiene muy poca rotación, sin embargo se puede observar que generalmente, la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

Los deslizamientos rotacionales en suelos generalmente tienen una relación D_r/L_r entre 0.15 y 0.33 (Skempton y Hutchinson 1969).

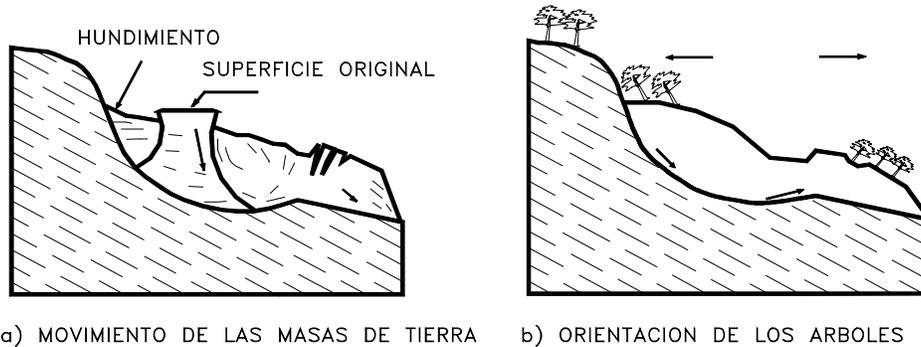


Figura 1.15 Deslizamiento rotacional típico.

Frecuentemente la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad (Figura 1.16).

Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren usualmente, en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y por su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura.

En zonas tropicales este tipo de suelos no es común y cuando existe rotación, la superficie de falla es usualmente curva pero no circular; Sin embargo, en zonas de meteorización muy profunda y en rellenos de altura significativa algunas superficies de falla pueden asimilarse a círculos.

Dentro del deslizamiento comúnmente, ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente ocurren varios deslizamientos sucesivos en su origen pero que conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes.

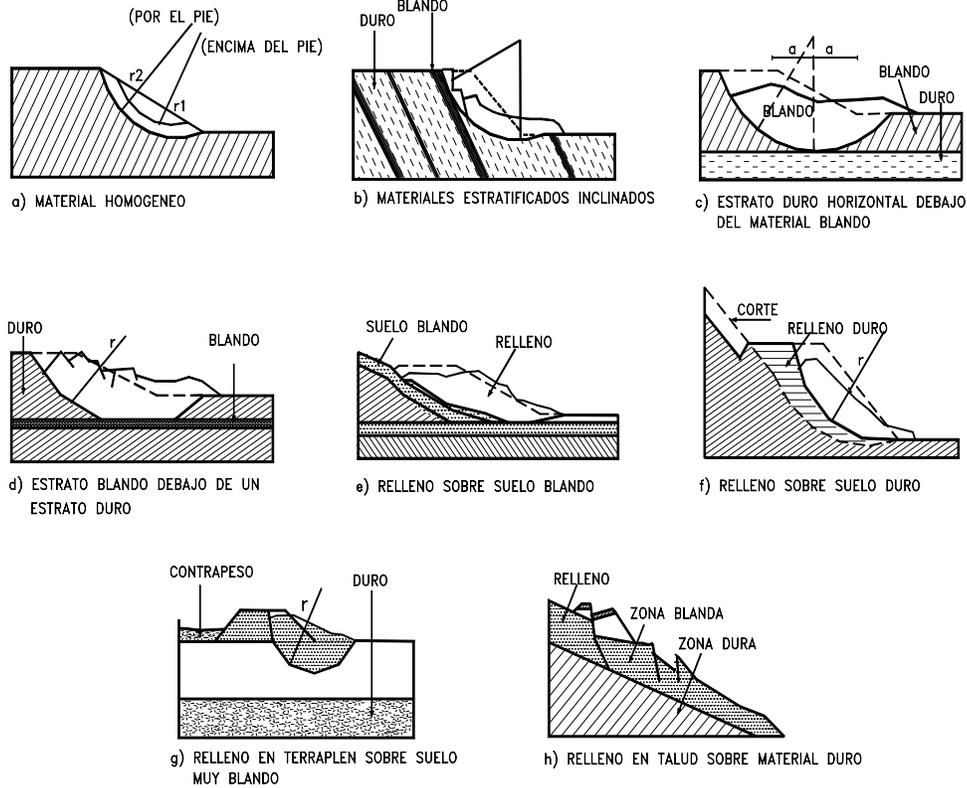


Figura 1.16 Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos a rotación.

b. Deslizamiento de traslación

En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo (Figura 1.17). Los movimientos traslacionales tienen generalmente, una relación D_r/L_r de menos de 0.1. La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización.

Sin embargo, un movimiento de rotación trata de autoestabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo. Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo.

Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como deslizamiento de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera.

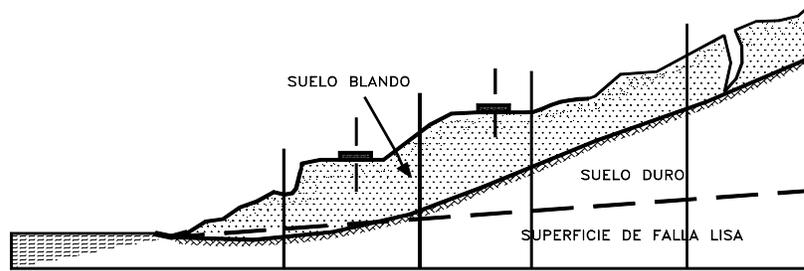


Figura 1.17 Deslizamiento de translación en la vía Tijuana - Ensenada en México.

5. Esparcimiento lateral

En los esparcimientos laterales el modo de movimiento dominante es la extensión lateral acomodada por fracturas de corte y tensión. El mecanismo de falla puede incluir elementos no solo de rotación y translación sino también de flujo. (Figura 1.18). Generalmente, los movimientos son complejos y difíciles de caracterizar. La rata de movimiento es por lo general extremadamente lenta.

Los esparcimientos laterales pueden ocurrir en masas de roca sobre suelos plásticos y también se forman en suelos finos, tales como arcillas y limos sensitivos que pierden gran parte de su resistencia al remodelarse.

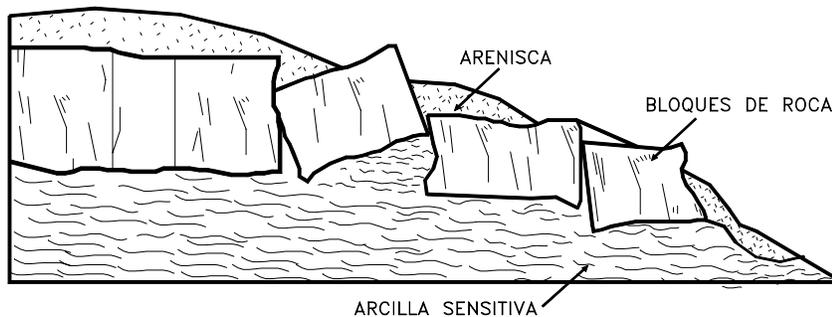


Figura 1.18. Esquema de un esparcimiento lateral

La falla es generalmente progresiva, o sea, que se inicia en un área local y se extiende. Los esparcimientos laterales son muy comunes en sedimentos glaciales y marinos pero no los son en zonas de suelos tropicales residuales. Se deben distinguir dos tipos así:

- a. Movimientos distribuidos en una extensión pero sin una superficie basal bien definida de corte o de flujo plástico. Esto ocurre predominantemente en rocas, especialmente en las crestas de serranías. La mecánica de este movimiento no es bien conocida.
- b. Movimientos que envuelven fracturas y extensión de roca o suelo, debido a licuación o flujo plástico del material subyacente. Las capas superiores pueden hundirse, trasladarse, rotarse, desintegrarse o pueden licuarse y fluir.

6. Flujo

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos (Figura 1.19), así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra.

Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales subsuperficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo.

Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensitivos tales como sedimentos no consolidados.

Recientemente se han realizado estudios para cuantificar el nivel de lluvias que se requieren para producir flujos y es frecuente la ocurrencia de los flujos simultáneamente en sitios diferentes, dentro de una misma formación en el momento de una determinada lluvia de gran intensidad o de un evento sísmico.

a. Flujo en roca

Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución de velocidades puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes.

Se observa la relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están generalmente, relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación, ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son comúnmente muy empinadas (más de 45°).

Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida.

b. Flujo de residuos (Detritos)

Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento.

El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

Fotografía 1.1 Flujo en suelos residuales de granitos.

Fotografía 1.2 Mezcla de arenas y residuos en un flujo en suelos residuales .

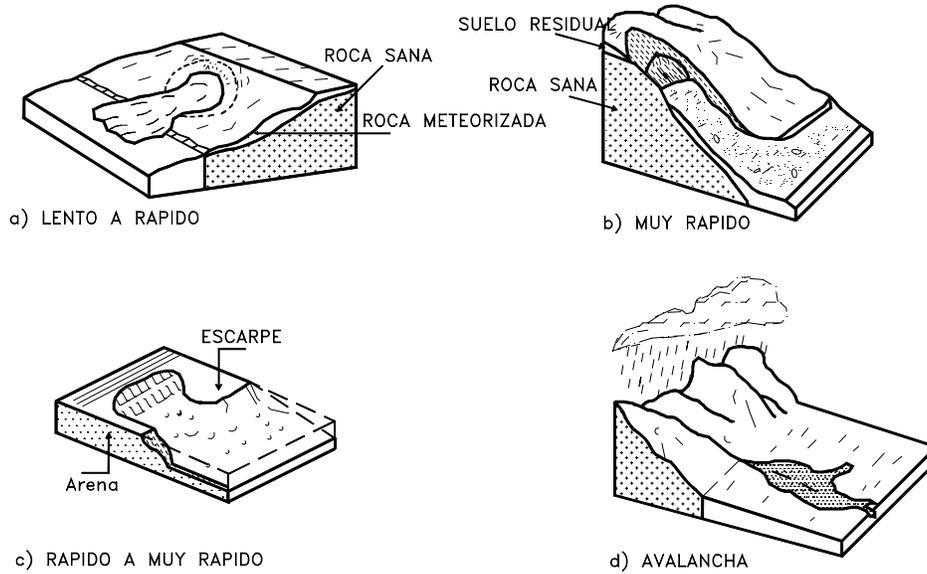


Figura 1.19 Flujos de diferentes velocidades.

Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una honda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas ondas menores superimpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo.

Cuando el canal es más pequeño que el flujo, se forman ondas horizontales o depósitos laterales a los lados del canal.

c. Flujo de suelo

Los flujos de suelo también pueden ser secos y más lentos de acuerdo a la humedad y pendiente de la zona de ocurrencia.

En zonas de alta montaña y desérticas ocurren flujos muy secos, por lo general pequeños pero de velocidades altas.

d. Flujos de lodo

Dentro de los flujos de tierra están los “flujos de lodo”, en los cuales los materiales de suelo son muy finos y las humedades muy altas y ya se puede hablar de viscosidad propiamente dicha, llegándose al punto de suelos suspendidos en agua. Los flujos de lodo poseen fuerzas destructoras grandes que dependen de su caudal y velocidad.

Un flujo de lodo posee tres unidades morfológicas: un origen que generalmente es un deslizamiento, un camino o canal de flujo y finalmente una zona de acumulación. El origen consiste en una serie de escarpes de falla o deslizamientos de rotación o translación, el camino o canal es generalmente un área estrecha, recta o una serie de canales a través del cual fluye el material viscoso, el ancho, profundidad y pendiente del camino del flujo varía de acuerdo a las condiciones topográficas y morfológicas.

La zona de acumulación es generalmente, un área de menor pendiente en la cual el flujo pierde velocidad y forma un abanico de depositación.

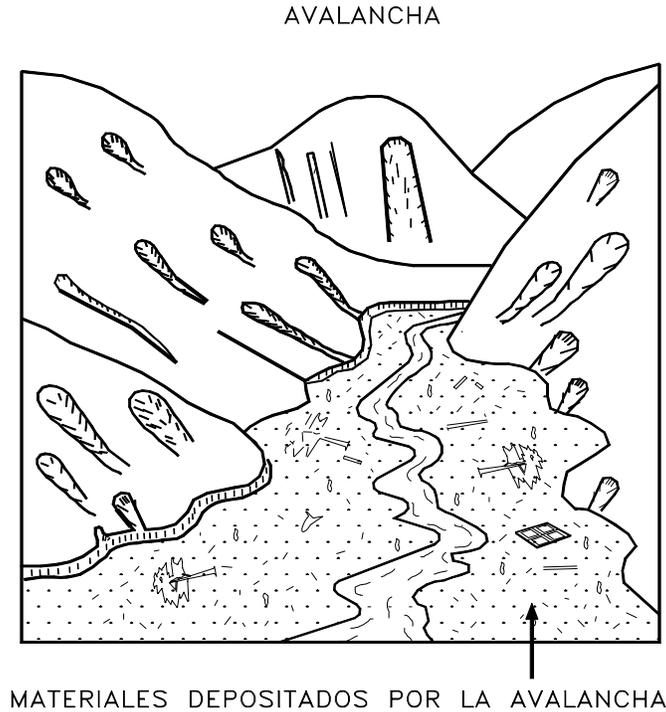


Figura 1.20 Avalancha en cauce de río por acumulación de materiales producto de una gran cantidad de deslizamientos ocurridos en el momento de un sismo.

7. Avalanchas

En las avalanchas la falla progresiva es muy rápida y el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo” (Figura 1.20). Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un requisito para que ocurran.

Las avalanchas son generadas a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados con un volumen importante de agua, los cuales forman una masa de comportamiento de líquido viscoso que puede lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo y que corresponden generalmente, a fenómenos regionales dentro de una cuenca de drenaje. Las avalanchas pueden alcanzar velocidades de más de 50 metros por segundo en algunos casos.

El movimiento de las avalanchas se le puede relacionar con “flujo turbulento de granos”. Este mecanismo no requiere de la presencia de una fase líquida o gaseosa y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

8. Movimientos complejos

Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente, este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo”. Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo.

Tabla.1.1 Glosario de nombres para la caracterización de movimientos en masa (adaptado de Cruden y Varnes –1996)

Tipo	Secuencia	Estado de actividad	Estilo	Velocidad	Humedad	Material
Caído	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente	Seco	Roca
Inclinación	Retrogresivo	Reactivado	Compuesto	rápido	Húmedo	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Múltiple	Muy rápido	Mojado	Residuos
Esparcimiento	Alargándose	Inactivo	Sucesivo	Rápido	Muy	
Flujo	Confinado	Dormido	Sencillo	Moderado	Mojado	
	Disminuyendo	Abandonado		Lento		
	Moviéndose	Estabilizado		Muy lento		
		Relicto		Extremadamente lento		

1.8 CARACTERIZACION DEL MOVIMIENTO

Adicionalmente al tipo de movimiento es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, estilo, velocidad, humedad, y material.

1. Tipo de material

Los términos siguientes han sido adoptados como descripción de los materiales que componen un determinado movimiento del talud.

a. Roca

Se denomina “Roca” a la roca dura y firme que estaba intacta en su lugar antes de la iniciación del movimiento.

b. Residuos

Se denomina con el nombre de Residuos o “Detritos” al suelo que contiene una significativa proporción de material grueso. Se considera que si más del 20% del material en peso es mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente, debe llamarse como Residuos.

Por lo general, deben existir partículas mucho mayores de 2 milímetros para que pueda considerarse de este modo.

c. Tierra

Se denomina tierra, al material de un deslizamiento que contiene más del 80% de las partículas menores de 2 milímetros. Se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas.

2. Humedad

Se proponen cuatro términos para definir las condiciones de humedad así:

- a. Seco:** No contiene humedad “visible”.
- b. Húmedo:** Contiene algo de agua pero no posee agua (corriente) libre y puede comportarse como un sólido plástico pero no como un líquido.
- c. Mojado:** Contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee cantidades visibles de agua que pueden salir del material.
- d. Muy mojado:** Contiene agua suficiente para fluir como líquido, aún en pendientes bajas.

3. Secuencia de repetición

La secuencia se refiere a movimientos que inician en un área local y progresan o se repiten en una determinada dirección. Varnes (1978) recomienda utilizar la siguiente terminología:

a. Progresivo

La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

b. Retrogresivo

La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento

c. Ampliándose

La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales

d. Alargándose

La superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término alargándose puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.

e. Confinado

Se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.

f. Disminuyendo

El volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo.

4. Velocidad del movimiento

En la tabla 1.2 se indica la escala de velocidades de movimientos propuestas por el Transportation Research Board de los Estados Unidos, la cual se puede considerar como escala única de rata de movimiento. En algunos casos, ocurren velocidades diferentes de los diversos modos de movimiento y se requiere definir cada uno de ellos.

La velocidad del movimiento tiene gran influencia sobre el poder destructivo de un deslizamiento. Generalmente, los deslizamientos extremadamente rápidos corresponden a catástrofes de gran violencia, ocasionalmente con muchos muertos y cuyo escape es poco probable.

Por otro lado los movimientos extremadamente lentos son imperceptibles sin instrumentos y representan, en general un riesgo muy bajo de pérdida de vidas humanas.

Tabla 1.2 Velocidad de los movimientos (Adaptado de Cruden, Varnes - 1996)

Clase	Descripción	Velocidad (mm/sg)	Desplazamiento	Poder destructor
7	Extremadamente rápido			Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes; escape improbable.
		5×10^3	5 m/seg	
6	Muy rápida			Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
		5×10^1	3 m/min	
5	Rápida			Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
		5×10^{-1}	1.8 m/hora	
4	Moderada			Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
		5×10^{-3}	13 m/mes	
3	Lenta			Construcciones remediales pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
		5×10^{-5}	1.6 m/año	
2	Muy lenta			Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
		5×10^{-7}	16 mm/año	
1	Extremadamente lenta			Imperceptibles sin instrumentos; construcción posible pero deben tenerse precauciones.

5. Estilo

Varnes estableció una nomenclatura de actividad de deslizamiento cuando aparecen conjuntamente diferentes tipos de movimiento:

a. Complejo

Un deslizamiento complejo es aquel que tiene al menos dos tipos de movimiento, por ejemplo, inclinación y deslizamiento.

b. Compuesto

El término compuesto corresponde al caso en el cual ocurren simultáneamente varios tipos de movimiento en diferentes áreas de la masa desplazada.

c. Múltiple

Se denomina como múltiple un deslizamiento que muestra movimientos repetidos del mismo tipo (Figura 1.22), generalmente, ampliando la superficie de falla.

Un movimiento sucesivo corresponde a movimientos repetidos pero que no comparten la misma superficie de falla.

d. Sencillo

Corresponde a un solo tipo de movimiento.

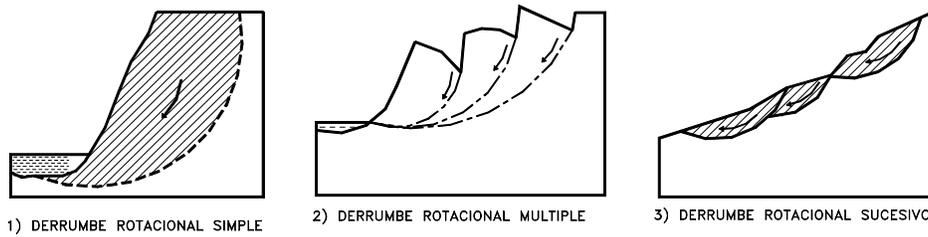


Figura 1.21. Deslizamientos rotacionales simples y múltiples.

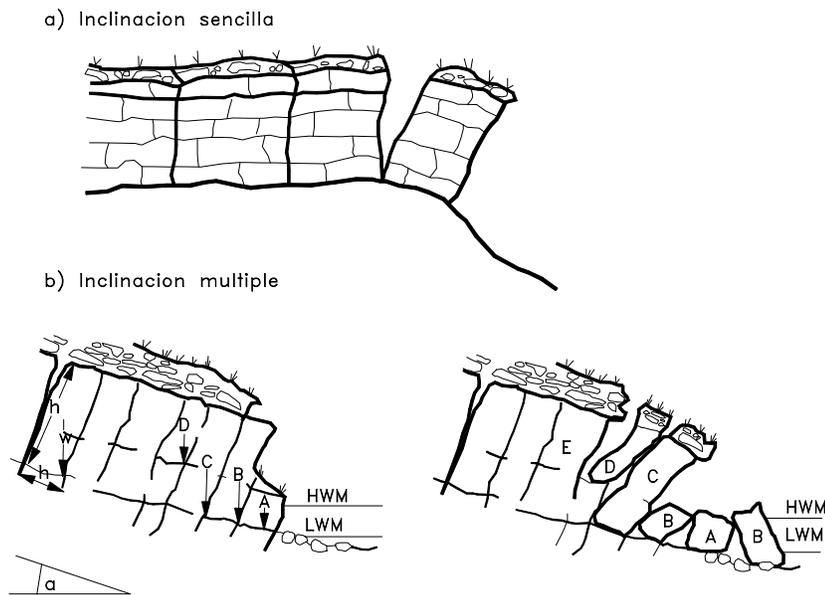


Figura 1.22. Inclinaciones sencillas y múltiples (Cruden, Varnes 1996).

6. Estado de actividad

a. Activo

Deslizamiento que se está moviendo en los actuales momentos.

b. Reactivado

Movimiento que está nuevamente activo, después de haber estado inactivo. Por ejemplo, deslizamientos reactivados sobre antiguas superficies de falla.

c. Suspendido

Deslizamientos que han estado activos durante los últimos ciclos estacionales pero que no se está moviendo en la actualidad.

d. Inactivo

Deslizamientos que llevan varios ciclos estacionales sin actividad.

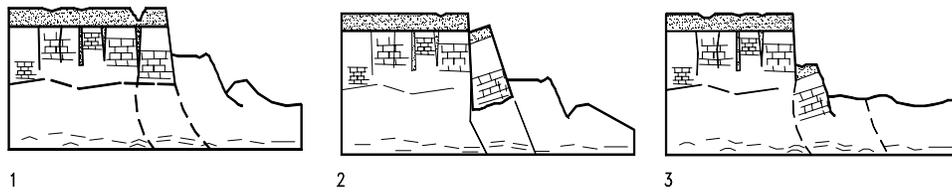


Figura 1.23 Deslizamientos retrogresivos.

e. Dormido

Deslizamiento inactivo pero que las causas del movimiento aparentemente permanecen.

f. Abandonado

Es el caso de un río que cambió de curso y que estaba produciendo un deslizamiento.

g. Estabilizado

Movimiento suspendido por obras remediales artificiales.

h. Relicto

Deslizamientos que ocurrieron posiblemente, hace varios miles de años se pueden llamar deslizamientos Relictos.

7. Estructura geológica

La formación geológica del sitio del movimiento es un factor determinante en el mecanismo de falla y en el comportamiento de un movimiento en un talud, especialmente en ambientes tropicales de montaña donde la textura y estructura geológica definen por lo general, la ocurrencia de fallas en los taludes.

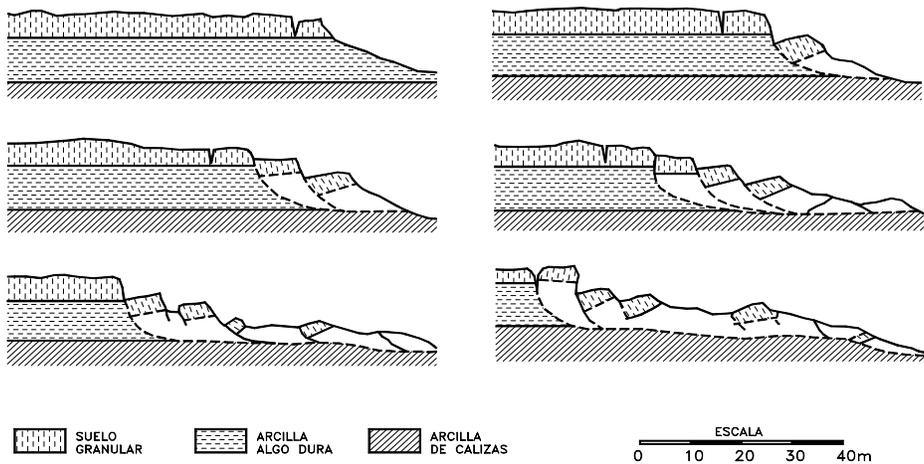


Figura 1.24 Desarrollo de deslizamientos en la costa de Rumania-Mar negro (Popescu-1996).

1.9 MOVIMIENTOS POST-FALLA

Los movimientos post-falla son movimientos en los cuales la energía inicial es máxima y va disminuyendo progresivamente. La energía del movimiento se disipa con el rompimiento, remoldeo o desaceleración por fricción del movimiento inicial. En el caso de un material perfectamente elastoplástico o dúctil, la energía potencial se disipa por fricción. La energía tiene tres componentes principales:

a. Energía Potencial

La cual se determina por las características geométricas y de localización del talud en el momento de la falla. Es importante determinar el valor de la energía potencial al final de la falla y su evolución posterior para poder predecir el comportamiento del movimiento. Esta energía potencial se convierte en energía cinética a medida que se produce aceleración del movimiento y esta energía cinética se disipa a otros tipos de energía al disminuirse la velocidad.

b. Energía Friccionante

Depende del comportamiento esfuerzo - deformación del suelo. En la práctica la energía de fricción es difícil de evaluar debido a que se disipa no solamente a lo largo de una superficie de falla definida, sino a lo largo de esfuerzos de desplazamiento en una gran cantidad de superficies dentro de la masa deslizada.

c. Energía de Remoldeo o Desmoronamiento

En suelos residuales no saturados y en rocas la energía de remoldeo disipa buena parte de la energía potencial o cinética; sin embargo, en la literatura existe muy poca documentación sobre el tema. Se conoce que los flujos de roca y detritos alcanzan distancias superiores cuando no se desmoronan y frenan rápidamente en el caso de desmoronamiento. En el caso de arcillas, la energía de remoldeo puede considerarse proporcional a la resistencia al corte no drenado y al índice de plasticidad de la arcilla. Entre menos resistente el material, la energía de remoldeo es menor y por lo tanto la disipación de energía cinética se produce a una rata menor aumentándose la longitud de recorrido del movimiento. En suelos no cohesivos la energía de remoldeo es muy pequeña pero la energía de fricción posee valores mucho más altos.

Longitud de Recorrido del Movimiento

Cuando la energía potencial de la falla se transforma en energía cinética en un porcentaje importante, la distancia de recorrido puede adquirir una dimensión relativamente grande. Se han obtenido relaciones entre el volumen de la masa fallada y la longitud de recorrido para avalanchas en roca y flujos de arcilla pudiéndose realizar las siguientes observaciones:

- a. La relación entre el volumen de falla y la distancia de recorrido depende del nivel de humedad o saturación de los materiales.
- b. La distancia de recorrido generalmente, aumenta con el volumen de la masa fallada.
- c. La energía y la longitud de recorrido aumenta con la altura del deslizamiento.

d. La relación $\log(\text{longitud}) - \log(\text{volumen})$ es esencialmente lineal y con los datos limitados que existen se ha propuesto una pendiente de 0.16 entre los dos valores.

Debe tenerse en cuenta que una vez ocurrida la falla, el movimiento posterior es de tal característica que no se aplican los principios de la mecánica de suelos o rocas y el comportamiento se describe mejor en términos de conceptos de mecánicas de fluidos integrados en un modelo viscoplástico, como el desarrollado para flujos rápidos y avalanchas por Hungr (1995).

El elemento energía debe también tenerse en cuenta. La energía producida por un evento sísmico puede generar energías cinéticas superiores a las de un evento estático.

1.10 EVOLUCION O PROCESO DE FALLA

La ocurrencia de una falla obedece a un proceso, el cual comprende una gran cantidad de factores que incluyen:

1. Condiciones originales del talud (Susceptibilidad a los deslizamientos)

La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.

2. Factores de deterioro (Modificación lenta de las condiciones originales)

El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.

1. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.
2. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.
3. Erosión interna o sifonamiento.

Los factores de deterioro pueden producir movimientos en el talud, los cuales en ocasiones pueden ser detectados por medio de métodos geoacústicos o por inclinómetros (Figura 1.25).

3. Factores detonantes (Activación del movimiento)

El resultado es un aumento en los esfuerzos de cortante. Estos esfuerzos aumentan a lo largo de la superficie de falla hasta que ocurre el movimiento.

En el fenómeno de detonación actúan una serie compleja de procesos los cuales en ocasiones, se traslapan con los factores de deterioro: