



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTABILIDAD DE TALUDES EN LOS DEPARTAMENTOS  
DE GUATEMALA Y ALTA VERAPAZ, CASOS REALES**

CARLOS EDUARDO GUILLÉN MARTÍNEZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ROBERTO GUILLÉN LOZANO

GUATEMALA, MARZO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTABILIDAD DE TALUDES EN LOS DEPARTAMENTOS  
DE GUATEMALA Y ALTA VERAPAZ, CASOS REALES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS EDUARDO GUILLÉN MARTÍNEZ

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ROBERTO GUILLÉN LOZANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Quezada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Lionel Alfonso Barillas Romillo
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Montenegro Paiz
EXAMINADOR	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
SECRETARIO	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTABILIDAD DE TALUDES EN LOS DEPARTAMENTOS  
DE GUATEMALA Y ALTA VERAPAZ, CASOS REALES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil con fecha 9 de septiembre de 2003.

Carlos Eduardo Guillén Martínez

## **DEDICATORIA**

A DIOS

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A TODOS MIS SERES QUERIDOS

A LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

## **AGRADECIMIENTOS**

- A: Ingeniero Enrique Anckermann, quién fue parte importante de este trabajo de graduación, poniendo a mi alcance sus conocimientos y experiencias
- A: Mis compañeros de trabajo, por ayudarme a terminar este trabajo de graduación, al brindarme su apoyo técnico

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	X
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XIV
INTRODUCCIÓN	XV
1. MARCO TEÓRICO	
1.1 Estabilidad de los estratos de suelos en los taludes	1
1.2 Taludes en roca	8
1.3 Movimientos de masa	12
1.3.1 Flujos de barro	12
1.3.2 Flujo de derrubios	14
1.3.3 Flujo de bloques	15
1.3.4 Flujo de arena	16
1.3.5 Colada	18
1.3.6 Colada de barro	19
1.4 Deslizamientos	20
1.4.1 Deslizamiento de la cobertura superficial	20
1.4.2 Planar	21
1.4.3 Caída de lienzos rocosos	22
1.4.4 Deslizamiento de compartimientos	23
1.4.5 Deslizamiento rotacional	24
1.4.6 Deslizamiento de derrubios	25

1.5	Derrumbes	25
1.5.1	Volcamiento	26
1.5.2	Caídas de bloques	27
1.5.3	Desprendimientos periódicos	28
1.5.4	Desprendimientos en masa	28
1.5.5	Formación de escarpas y acantilados	29
1.5.6	Avalanchas de derrubios	30
2.	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	
2.1	Análisis de estabilidad en taludes	31
2.2	Métodos de cálculo para estabilidad de taludes	36
2.2.1	Análisis por tanteos	36
2.2.2	Método con un arco de circunferencia (método sueco)	37
2.2.3	Método de dovelas o rebanadas	38
2.2.4	Método del círculo de fricción	41
2.3	Datos necesarios en campo	43
3.	GEOLOGÍA Y CAUSAS DE FALLA	
3.1	Zonificación de riesgos geológicos	46
3.2	Causas de las fallas o deslizamientos	48
3.2.1	Fenómenos de inestabilidad de taludes	48
3.2.1.1	Desprendimientos	49
3.2.1.2	Corrimientos	51
3.2.1.3	Deslizamientos	51
3.2.1.4	Deslizamiento plano	52
3.2.1.5	Corrimientos provocados por licuefacción	54
3.2.1.6	Reptación	55



4.	CASOS REALES	
4.1	Casos reales diseñados e investigados para los diferentes tipos de taludes	56
4.1.1	Estudio de suelos y geotecnia preliminar para el diseño de la reconstrucción del talud fallado en la carretera Cobán-Alta Verapaz Km. 208	56
4.1.2	Estudio geotécnico preliminar para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes de la lotificación Avance de Serramonte, ubicado en el Km. 18, carretera a San Juan Sacatepéquez	62
4.2	Soluciones	70
4.2.1	Soluciones para diseño de la reconstrucción del talud fallado ubicado en la carretera Cobán-Alta Verapaz Km. 208	70
4.2.2	Soluciones para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes de la lotificación Avance de Serramonte, ubicado en el Km. 18 a San Juan Sacatepéquez	71
5.	LABORATORIOS	
5.1	Ensayos de laboratorio	73
5.1.1	Gráficas de ensayos de laboratorio del talud fallado ubicado en la carretera Cobán - Alta Verapaz Km. 208	73

5.1.2	Gráficas de ensayos de laboratorio para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes de la lotificación Avance de Serramonte, ubicado en el Km. 18 a San Juan Sacatepéquez	76
5.2	Análisis de resultados	81
5.2.1	Análisis de resultados del estudio de suelos y geotecnia preliminar para el diseño de la reconstrucción del talud fallado ubicado en la carretera Cobán – Alta Verapaz Km. 208	81
5.2.2	Análisis de resultados del estudio geotécnico preliminar para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes de la lotificación Avance de Serramonte ubicado en el Km. 18 carretera a San Juan Sacatepéquez	89
	<b>CONCLUSIONES</b>	94
	<b>RECOMENDACIONES</b>	96
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	97

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Comportamientos de taludes en roca	4
2.	Taludes con vegetación	6
3.	Análisis de estabilidad de taludes en roca	9
4.	Flujos de barro	13
5.	Flujo de derrubios	15
6.	Flujo de bloques	16
7.	Flujo de arena seca	17
8.	Flujo de arena húmeda	18
9.	Colada	19
10.	Colada de barro	20
11.	Falla plana y cuña	21
12.	Falla de cuña	22
13.	Caída de lienzos rocosos	23
14.	Deslizamiento de compartimientos	24
15.	Deslizamiento rotacional	24
16.	Deslizamiento de derrubios	25
17.	Volcamiento	27
18.	Caída de bloques	28
19.	Desprendimientos periódicos	28
20.	Desprendimientos de masa	29
21.	Escarpas y acantilados	30
22.	Avalancha de derrubios	30
23.	Cohesión	43

24.	Gráfica de perforación No.1 Cobán	73
25.	Gráfica de perforación No.2 Cobán	74
26.	Gráfica de perforación No.3 Cobán	75
27.	Gráfica de perforación No.1 Serramonte	76
28.	Gráfica de perforación No.2 Serramonte	77
29.	Gráfica de perforación No.3 Serramonte	78
30.	Gráfica de perforación No.4 Serramonte	79
31.	Gráfica de perforación No.5 Serramonte	80
32.	Talud No.1 Cobán	83
33.	Talud No.2 Cobán	84
34.	Talud No.3 Cobán	85
35.	Opción suelo-cemento	86
36.	Opción geotextil	87
37.	Opción tierra armada	88
38.	Cortes 1 y 2 Serramonte	90
39.	Cortes 3 y 4 Serramonte	91
40.	Cortes 5 y 6 Serramonte	92
41.	Cortes 7 y 8 Serramonte	93

## **TABLAS**

I	Talud original 1	61
II	Talud original 2	67
III	Talud original 3	67

## SIMBOLOGÍA

$f$	Coeficiente de fricción real suelo-armadura.
$f^*$	Coeficiente de fricción aparente suelo-armadura.
$K_0$	Coeficiente de presiones cero que caracteriza al suelo en estado de reposo.
$K$	Coeficiente de presiones del suelo en cualquier punto considerado.
$K_p$	Coeficiente de empuje pasivo.
$K_a$	Coeficiente de empuje activo.
$K_s$	Coeficientes de presiones del suelo debido al efecto de los sismos.
$E$	Coeficiente sísmico.
$C_u$	Coeficiente de uniformidad del suelo.
$D_{60}$	Tamaño de granos del suelo correspondiente al 60% en la curva granulométrica acumulativa.
$D_{10}$	Tamaño de granos del suelo correspondiente al 10% en la curva granulométrica acumulativa y denominado como el tamaño efectivo de los granos de un suelo.
$a$	Aceleración horizontal.

$g$	Aceleración de la gravedad.
$C$	Cohesión del suelo.
$C_e$	Cohesión efectiva del suelo.
$C_d$	Promedio del valor de la cohesión desarrollada del suelo.
$\phi$	(Phi) Ángulo de fricción interna del suelo.
$\phi_e$	(Phi) Ángulo de fricción efectiva del suelo.
$\phi_d$	(Phi) Ángulo promedio de fricción desarrollada del suelo.
$\Upsilon$	(Gamma) Peso específico del suelo.
$\Delta l$	Diferencial de desplazamiento.
$t$	Espesor del cimiento.
$B$	Longitud del macizo de tierra armada incluyendo el espesor del paramento.
$e$	Excentricidad resultante.
$S'$	Área del suelo que se supone comprimida por el macizo de tierra armada.
$N$	Número de armaduras por metro lineal de paramento.
$r$	Radio.
$\pi$	(Pi) Constante de valor 3.14159265.
$q_{ref}$	Esfuerzo llamado de referencia aplicado al suelo de cimentación.
$\vec{q}$	Capacidad soporte del suelo de cimentación.

$q_0$	Esfuerzo vertical inicial al nivel del cemento.
$T$	Esfuerzo de corte.
$M$	Momento resultante aplicado al macizo de tierra armada.
$M_0$	Momento de vuelco.
$M(h)$	Momento resultante en cualquier punto en función de la profundidad.
$F_1$ y $F_2$	Fuerzas cualesquiera de tensión.
$F_n$	Fuerza normal a una superficie.
$F_c$	Factor promedio de seguridad para el componente cohesional de resistencia.
$F_\phi$	Factor promedio de seguridad para el componente friccional de resistencia.
$F_v(h)$	Fuerza vertical en cualquier punto en función de la profundidad.
$F_h(h)$	Fuerza horizontal en cualquier punto en función de la profundidad.
$\alpha$	(Alfa) Ángulo cualquiera.
$\delta$	(Delta) Ángulo de inclinación del empuje resultante.
$N$	No. de golpes necesarios para penetrar 6 pulgadas.

## GLOSARIO

<b>Angularidad</b>	Medida de la agudeza de los vértices de las partículas. Tiene gran influencia en el comportamiento de éstas porque las hace resistir el deslizamiento.
<b>Ángulo de fricción</b>	Valor de convenio introducido para simplificar, se considera una constante aunque no lo es.
<b>Buzamiento</b>	Ángulo máximo de inclinación de roca anguloso, unido con lava u otros cementos naturales.
<b>Cohesión</b>	Fuerza que une las moléculas de un cuerpo.
<b>Compacidad</b>	Calidad de compactación de las arenas.
<b>Coluvial</b>	Depósito acumulado al pie de un talud y como consecuencia de la acción erosiva del agua.
<b>Consolidados</b>	Materiales que forman roca firme y coherente.
<b>Deposición</b>	Proceso por el cual los materiales al perder velocidad llegan a detenerse o depositarse.
<b>Detritos</b>	Suelo superficial y roca fragmentada que contiene una gran cantidad de material grueso (partículas mayores que 2mm.).



<b>Diaclasas</b>	Quiebre o fractura de origen geológico que rompe con la continuidad de una roca, a lo largo de la cuál no ha habido desplazamiento visible.
<b>Dunas</b>	Montañas de Arena.
<b>Esquitosidad</b>	Propiedad que presenta una roca cuando aparece constituida en capas u hojas paralelas.
<b>Estratigrafía</b>	Parte de la geología que estudia las rocas que forman estratos o capas sobrepuestas.
<b>Estiaje</b>	Nivel más bajo o caudal mínimo de un río u otra corriente en época de sequía.
<b>Extrusivas</b>	Acción de aflorar el magma a la superficie terrestre.
<b>Feldespató</b>	Silicato de aluminio, potasio, calcio, sodio y bario.
<b>In situ</b>	En el mismo sitio.
<b>Granito</b>	Roca granular, cristalina compuesta de feldespató, cuarzo y mica.
<b>Lixiviación</b>	Acción de separar por medio del agua dos capas de suelo.

<b>Macizo rocoso</b>	Constituido por bloques de forma irregular cuyas propiedades varían no solo de una clase de roca a otra, sino también de un punto a otro.
<b>Nivel freático</b>	Capa del subsuelo que contiene agua.
<b>Obsecuente</b>	Curso del agua que escarpa a su red de drenaje primitiva.
<b>Roca meteorizada</b>	Roca expuesta a la influencia de los fenómenos meteorizados.
<b>Ródanos</b>	Montañas de roca.
<b>Rumbo</b>	Es la dirección de la línea de intersección entre un punto horizontal y la superficie considerada.
<b>Socavones</b>	Galerías subterráneas que se hacen con el objeto de observar directamente las discontinuidades existentes.
<b>Soliflucción</b>	Corrimiento de material en una ladera, debido a que estas son blandas y poco coherentes, además saturadas de agua.
<b>Talud</b>	Superficie inclinada respecto a la horizontal, que es adoptada en forma permanente.

## RESUMEN

El siguiente trabajo consiste en una explicación teórica y práctica de las causas de fallas en los taludes en Guatemala, para lo cuál se presentan dos casos reales; uno en el Departamento de Guatemala y el otro en la ciudad de Cobán, Alta Verapaz.

En el capítulo número uno, se dan conceptos de estabilidad de los diferentes estratos de suelo en los taludes, así como también algunas fórmulas para determinar la inestabilidad de los mismos. También se muestran los taludes en roca, y los diferentes tipos de deslizamientos y derrumbes, para poder determinar en campo la clase de falla que ha ocurrido o que está por ocurrir.

En el capítulo número dos, enumeramos los diferentes tipos de análisis de estabilidad de taludes en laboratorio y en campo, los métodos de cálculo, así como también los datos necesarios que tenemos que obtener para poder calcular le estabilidad de los mismos.

El capítulo tres, podemos darnos cuenta de las causas de las fallas que pueden ocurrir y los lugares donde se originan, es por eso que nombramos una zonificación de riesgos geológicos.

En los capítulos cuatro y cinco, nos basamos en los casos reales nombrados anteriormente; el método usado para el estudio de estabilización; el equipo que se utilizó para las perforaciones de penetración estándar para sacar las muestras de suelo de dichos taludes para llevarlos a laboratorio, y las soluciones que se dieron para poder evitar los deslizamientos.

## OBJETIVOS

- **General**

La formación geológica del departamento de Guatemala, así como del resto de la república, tiene una formación montañosa, dentro de la cual ésta es dominante con respecto a las superficies planas; y el crecimiento demográfico en la zona central de Guatemala ha llegado a salirse de los límites planos para entrar en las zonas accidentadas, barrancos, quebradas, etc. Entonces el objetivo principal de este trabajo, es el estudio preliminar para la estabilización de taludes para evitar las fallas estructurales que podrían crearse por deslizamientos y hundimientos, considero que por los aspectos señalados es necesario crear y tener programas de estudio que cubren esta área de fallas para protección de los taludes.

- **Específico**

Realización de los estudios para la determinación de los deslizamientos y hundimientos por acción de las cargas estructurales, que se apoyan sobre los suelos que lo forman.

Beneficios y posibilidades de la utilización de los taludes para su posible uso en obras estructurales y tener una metodología adecuada y lo más ajustable posible a la realidad, técnica e in situ para obtener los mejores resultados en el establecimiento de las relaciones estructura y suelo.

## INTRODUCCIÓN

En cualquier terreno que no sea horizontal, existe una serie de fuerzas que tienden a nivelarlo: fuerzas de gravedad, filtración, presión del agua en las diaclasas, etc. Se oponen a ello la resistencia del terreno, raíces y otros elementos. Cuando el primer grupo de fuerzas predomina sobre el segundo, el talud se hace inestable.

Los daños anuales producidos por los deslizamientos en Guatemala, pueden cifrarse en millones de quetzales. No se conoce una estimación análoga, pero basta con leer los diarios, particularmente en época de lluvias, para darse cuenta de los trastornos ocasionados por la misma causa.

La mayoría de pendientes grandes que existen en Guatemala, han sido formadas por la acción de corrientes de aguas o desmontes de excavaciones sin control que se hacen para construir, urbanizar etc. La erosión en general, y sobre todo los fenómenos de inestabilidad de taludes, tienden a suavizar dichas pendientes.

Se muestran dos casos reales sucedidos en los departamentos de Guatemala y Alta Verapaz, en donde por las causas anteriormente descritas sucedieron desprendimientos de material, y esto ocasionó serios problemas en dichas localidades. Además se ampliará el tema con los conceptos básicos de estabilidad e inestabilidad de los taludes, sus causas, los tipos de taludes existentes, los análisis de estabilidad, métodos de cálculo etc.



# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1 Estabilidad de los estratos de suelos en los taludes**

La seguridad de una masa de tierra contra falla o movimiento es lo que se llama estabilidad, y debe considerarse no sólo en el proyecto de estructuras de tierra sino también en la reparación y corrección de las que han fracasado. Los proyectos de los taludes de los cortes abiertos y la sección transversal de los terraplenes, diques y presas de tierra, están basados principalmente en los estudios de estabilidad, a menos que el proyecto sea tan pequeño que se puedan tolerar las fallas ocasionales. Cuando ocurren los fracasos, ya sean deslizamientos o corrimientos, o hundimientos, es necesario hacer estudios de estabilidad para determinar la causa de la falla y poder indicar su corrección y el mejor método para prevenir dificultades futuras.

En todos aquellos lugares donde el terreno no está nivelado existen fuerzas actuando, las cuales tratan de ocasionar un movimiento del suelo, de los puntos altos a los puntos bajos. La más importante de estas fuerzas es la componente de la gravedad la que actúa en la dirección del movimiento probable.

Cerca de la superficie de la tierra la resistencia al cortante del suelo variará grandemente durante las diferentes estaciones del año. Algunas superficies del suelo se expanden durante la temporada de lluvias, y durante dicha temporada tendrán mucho menor resistencia que durante la temporada del nivel más bajo o caudal mínimo de un río u otra corriente en época de sequía; las cuales presentarían algunos tipos de grietas en los taludes.

El movimiento de un bloque a lo largo de una superficie de corte nueva o pre-existente, como en la figura 1c, puede abrir una o más grietas lineales o arqueadas como en (c). En el caso del granito con fracturamiento en capas o en formaciones de areniscas masivas, donde los llamados "arcos" se forman a medida que las capas descienden, nuevas grietas por tensión en arco preceden el rompimiento de una laja, como en (d) de la figura 1d. En ambos casos, la formación de las grietas por tensión implican que la fuerza resistente, previamente sostenida por esfuerzos de tensión, se ha perdido y ha sido reemplazada por una mayor resistencia al corte en las superficies de deslizamiento. En modelos de fricción es posible observar el deslizamiento y las deformaciones internas adicionales, que ocurren simultáneamente junto con la formación de grietas por tensión.

En masas rocosas que presentan mecanismo de volteo, las velocidades de volteo distintas entre dos capas adyacentes abren grietas en V amplias y profundas, como en (f) de la figura 1e. De la misma manera, el movimiento incipiente de un bloque deslizante limitado por discontinuidades abrirá estas estructuras que servirán como superficies de desprendimiento, como en (k) de la figura 1h; en este caso, la abertura de las discontinuidades reemplaza a la formación de nuevas grietas de tensión, que ocurren en los deslizamientos sin fracturas, pero los resultados difieren debido a que la abertura de estructuras no causa un incremento automático en los esfuerzos cortantes en la superficie de deslizamiento, debido a que las fracturas de desprendimiento nunca soportaron esfuerzos de tensión.

Una falla por volteo, como en la figura 1e, produce no solamente las aberturas profundas entre capas (f), sino que también expone hacia la parte superior del talud la cresta de las capas de deslizamiento (e). Estos declives fueron denominados "obsecuentes" por Goodman y Bray (1976).

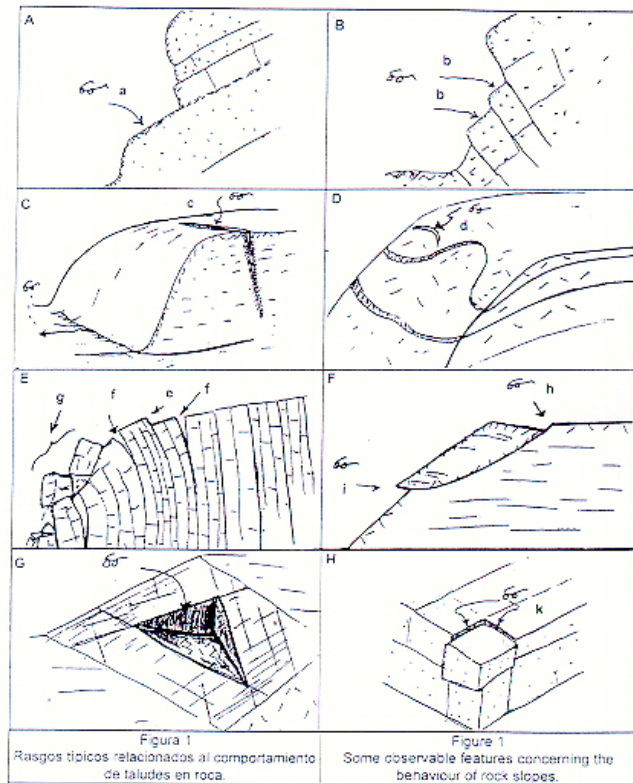


Las fallas por volteo también producen una zona de roca quebrada al pie del talud, así como en los taludes detríticos, como se muestra en (g) de la figura 1e. Los deslizamientos clásicos por hundimiento (*slump*), con rotación inversa, producen notables escarpes en la cresta como en (h) y una zona de corrimiento o sobrecorrimiento en el pie del talud, como en (i) de la figura 1f. Los movimientos de bloques individuales, delimitados por discontinuidades, dejan en los taludes en roca expresiones de cavidades de estos bloques, como en (j) de la figura 1g, las cuales han sido denominadas moldes por Hatzor y Goodman (1995). Estos últimos identifican combinaciones de superficies de discontinuidad que se interceptan en un punto en el espacio dentro de la masa rocosa y delimitan un bloque "removible". Si estos bloques se desplazaron bajo la acción de las mismas fuerzas naturales que aún actúan en el talud, los "moldes" identifican los "bloques clave"; debido a que existen varios sistemas de discontinuidades que pueden interceptarse y formar bloques importantes.

Los taludes en materiales granulares suelen ser estables y seguros si se exceptúa el fenómeno de la licuefacción. Los desmontes verticales en terrazas se mantienen perfectamente durante años, en especial si el clima es poco lluvioso. Hay que atribuir esta estabilidad al elevadísimo ángulo de rozamiento interno, algo de cohesión, impermeabilidad producida por la compacidad y resistencia a la erosión superficial producida por la existencia de tamaños gruesos. Existen taludes estables formando un ángulo de unos 47° con la horizontal en gravas.

Las arenas, por el contrario, son mucho más susceptibles a la erosión superficial. Por ello, los desmontes de arena, aunque sean más antiguas, forman con el tiempo un ángulo que coincide con el ángulo de rozamiento correspondiente al estado crítico.

Figura 1. Comportamientos de taludes en roca



Fuente: CONCYT, Conferencia de estabilidad de taludes y laderas, 2001

Las pendientes estables en grava suelta, arena, granito descompuesto o derrubios granulares, por encima del nivel freático, pueden oscilar en casos típicos entre 30° y 36°.

Sin embargo, si la arena tiene algo de cohesión, el desmonte se puede hacer mucho más vertical con tal de dejar una zona libre entre la obra que en ese momento sé este realizando, o se vaya a realizar, y el talud, pues los deslizamientos en estos casos suelen ser superficiales.

Cerca de la superficie de la tierra y cualquier pendiente de tierra, el suelo está sujeto a varios ciclos de expansión y contracción. Estos ciclos pueden ser causados por variaciones de temperatura, por mojarse y secarse alternadamente, y en climas fríos y por las heladas y deshielo subsecuentes. Durante la expansión el suelo se eleva en forma opuesta a la fuerza de gravedad, durante la contracción, el suelo se encoge, ayudado por la gravedad. El resultado neto es un movimiento lento en dirección de cuesta abajo.

La profundidad de la zona de deslizamiento puede variar desde unos cuantos centímetros hasta algunos metros, dependiendo de las propiedades del suelo y de las condiciones del tiempo. El deslizamiento será más pronunciado cuando se tengan mayores cambios de volumen en dicho suelo, y por esta razón será más notorio en suelos que sean altamente compresibles y que tengan también alta permeabilidad relativa.

El fenómeno conocido como deslizamiento o escurrimiento, por lo general, no involucra la ruptura o falla de la pendiente. Si el deslizamiento es considerado como una falta de estabilidad dependerá grandemente de la definición exacta que se le dé a la palabra estabilidad.

Sobre un talud cubierto con mucha vegetación el deslizamiento será resistido en cierta forma por la tensión de las raíces. La tensión aumentará gradualmente, en algunas veces por años, hasta que una raíz cualquiera falla a la tensión. Si las raíces que la rodean son incapaces de sobrellevar la carga adicional impuesta sobre ellas, un derrumbe puede ocurrir. Este tipo de derrumbe espontáneo es más común en los países tropicales donde el deslizamiento tiende siempre a ser grande y también donde casi siempre la vegetación es abundante como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Taludes con vegetación



**Fuente: CONCYT, Conferencia de estabilidad de taludes y laderas, 2001**

Se tienen también deslizamientos de flujo o fallas de flujo de numerosos tipos. Un suelo granular que sea más suelto que la densidad crítica por una cantidad apreciable podrá pasar a un estado de licuefacción si la falla se inicia, o podrá pasar a un estado francamente líquido por algún impacto tal y como es un temblor o movimiento de tierra. Un barro del tipo que muestra una gran pérdida de resistencia cuando se le remoldea podrá en forma similar pasar a un estado virtualmente fluido una vez que se inicia la falla. Deslizamientos de flujo de estos tipos ocurren rápidamente, y la masa que se mueve podrá continuar fluyendo hacia una parte baja del terreno aún cuando la distancia sea considerable. Los análisis para las consideraciones críticas de vacíos en arenas, y la investigación de las resistencias para pruebas no drenadas en barros, pueden ser usadas en algunos casos para los estudios cuantitativos de dichos deslizamientos, pero casi nunca se tendrá resultados exactos en dichos estudios.

Otras complicaciones casi siempre necesitan la ayuda de una gráfica de corte seccional que sea tan representativa como sea posible, pero que necesariamente deberá estar libre de irregularidades. Al mismo tiempo, es siempre importante adoptar simplificaciones, como son las características promedio del suelo, las cuales dan una buena representación de las características variables actuales tal y como son obtenidas.

Las condiciones simplificadas y las presunciones que se utilizarán en el análisis de estabilidad serán las siguientes:

1. Una sección transversal promedio o típica será usada. Se asumirá que ningún esfuerzo cortante actúa sobre el plano de la sección y, por lo tanto, que existe un caso de dos dimensiones o bidimensional. La masa que está siendo analizada es de dos dimensiones unitarias en la dirección normal a la sección, y la sección se asume que está compuesta por suelos uniformes, cada uno teniendo propiedades constantes. En la mayoría de los casos, la totalidad de la masa se asume que está compuesta por un solo tipo de suelo uniforme.
2. Será asumido que la resistencia al corte de cada suelo que se represente en la sección transversal podrá ser representada por una expresión en la forma de la Ley Empírica de Coulomb.

$$s = C_e + \sigma \tan \phi_e$$

en la cual  $C_e$  y  $\phi_e$  serán cohesión efectiva y el ángulo efectivo de fricción respectivamente, y que se aplican para cada suelo bajo las condiciones existentes. La presión normal que se considera en todos los casos, es la presión intergranular a la falla o la presión a la cual el suelo ha sido consolidado, dependiendo de si ocurre o no, drenaje bajo las condiciones existentes.

3. Se asumirá que las condiciones de agua superficial y las presiones son representadas por una red de flujo conocida. La presión intergranular usada en la expresión de la resistencia al corte, ha sido obtenida después de restarle la presión neutral, la cual es dada por la red de flujo en cualquier punto, partiendo de la presión total que existe en dicho punto. Todos los análisis de estabilidad serán basados en el concepto de que un talud fallará a menos que la resistencia resultante al corte sobre cada superficie perpendicular al talud sea mayor que la resultante de todas las fuerzas ejercidas sobre la superficie de la masa en la parte superior. La superficie que es la más profunda que falle, es llamada la superficie crítica.

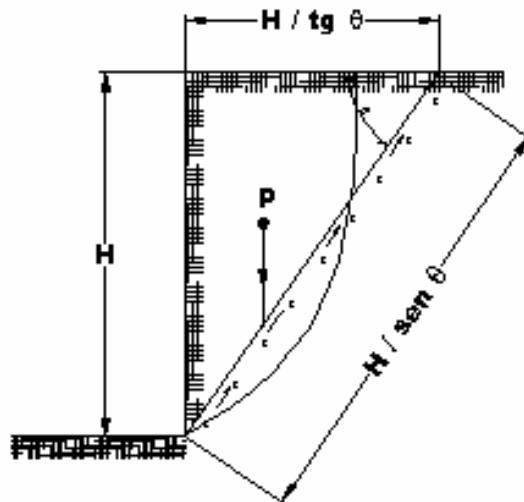
## **1.2 Taludes en roca**

Debido a que la estructura y la composición de las rocas pueden variar dentro de límites muy amplios, la variedad de tipos de comportamiento que se observan también es muy amplia. Este trabajo se enfoca principalmente a taludes en rocas, tanto blandas como duras, aunque mantener este enfoque puede ser difícil en algunos materiales, en los cuales la distinción entre suelo y roca es imprecisa, particularmente cerca de la superficie.

Es importante señalar que un talud en rocas en la superficie y una excavación en el subsuelo, son dos ambientes claramente distintos, siendo el talud en la superficie generalmente menos seguro. Aunque una persona puede sentirse más expuesta al peligro trabajando en el subsuelo, debido a los peligros que implican el trabajar en un ambiente cerrado, las excavaciones en la superficie tienden a ser menos estables debido a que se tienen esfuerzos bajos, materiales con grados de intemperismo más elevados y a la acción del agua.

La distribución de esfuerzos tangenciales alrededor de una abertura subterránea excavada con extremo cuidado, puede ayudar a mantener en su sitio los bloques del techo y las paredes; sin embargo, poca o ninguna tracción superficial actúa en las caras de los bloques en la superficie, en donde el esfuerzo tangencial es muy pequeño. Por otro lado, la teoría de bloques demuestra que los bloques clave que pueden caer hacia una excavación en la superficie, tienden a ser más grandes que aquellos que pueden caer hacia una excavación subterránea; por lo tanto, un derrumbe local comúnmente tiene mayores dimensiones en la superficie que en el subsuelo.

Figura 3. Análisis de estabilidad de los taludes en roca



Generalmente, una excavación abierta incluye rocas intemperizadas, cuyas resistencias son mucho menores que la de la roca intacta. Algunas rocas blandas continuarán degradándose debido a alteraciones durante la construcción y posteriormente debido a la acción del agua y del clima, particularmente en regiones con climas cálidos y húmedos.

No obstante que las vetas de agua pueden ser interceptadas tanto en la superficie como en el subsuelo, los materiales en la superficie pueden permitir un mayor flujo de agua debido a su mayor porosidad y grado de fracturamiento, a pesar de la menor carga de agua; además, las aguas superficiales forman parte de los problemas que pueden ser causados por las aguas subterráneas.

Tanto en la superficie como en el subsuelo, las presiones hidráulicas en discontinuidades y las presiones de poro en rocas fisuradas, estratos de rocas sedimentarias blandas o en el material poroso de relleno de las fallas (el cual se comporta como suelo) pueden con toda seguridad desestabilizar un macizo rocoso. Durante tormentas, las excavaciones en la superficie también tendrán que enfrentarse a problemas debidos a la pérdida de presión capilar o al ablandamiento de materiales arcillosos que inicialmente se encuentran en un estado no-saturado o disecado. Similarmente, la erosión, tanto interna como externa de materiales limosos derivados de la meteorización, típicos en suelos residuales, pueden llevar a una rápida destrucción del talud.

Los taludes artificiales en roca son el producto de excavaciones realizadas para abrir espacio para rutas de transporte, edificios, centrales eléctricas, presas y portales de túneles. Son taludes "permanentes" en los cuales es necesario prevenir, o al menos controlar los movimientos de roca. Sin embargo, incluso taludes de roca "temporales", como son los usados en canteras y en operaciones de construcción, pueden tener porciones que requieren la prevención de fallamientos o deslizamientos por un largo periodo. Además, algunos taludes diseñados sólo para uso temporal terminan cobrando vida propia como parte integral del paisaje, colindantes con desarrollos de viviendas o complejos industriales.



Debido a que una excavación no debe poner en riesgo la seguridad de instalaciones adyacentes durante un cierto periodo, el ingeniero tiene que estar capacitado para interpretar señales indicadoras de un problema inminente. Algunas de estas señales dependen de la forma de fallamiento que puede experimentar el material del talud. Afortunadamente, la gran mayoría de los problemas con la estabilidad de taludes se manifiestan durante el periodo de construcción y permiten su rectificación con medidas apropiadas, en especial si el modo de falla es identificado correctamente. Sin embargo, después de cierto tiempo se desarrollan otros movimientos, en el que etapas sucesivas dentro de una progresión de eventos, mueven el talud, lenta y ocultamente, hacia el peligro o eventualmente hacia una ruptura total.

Si un talud de roca es grande y contiene una variedad de estructuras y tipos de roca, no debe esperarse que una sola forma de falla cubra todos los sectores. Por el contrario, en una masa rocosa en deslizamiento sería razonable encontrar más de uno de los mecanismos de falla simple, actuando simultáneamente; una parte puede estar deslizándose, otra volcándose, otra experimentando erosión e incluso otra sufriendo fracturamiento y destrucción de lo que previamente era una masa de roca continua.

Algunos de los principios que gobiernan este comportamiento complejo son los siguientes:

1. Los bloques aislados se forman por la intersección de discontinuidades pre-existentes y la superficie de la excavación.
2. Los bloques orientados desfavorablemente se mueven primero, dejando en su lugar un nuevo espacio hacia el cual los bloques adyacentes pueden moverse; los primeros fueron denominados "bloques clave" por Goodman y Shi (1985).

3. El deslizamiento a lo largo de una cara o de un borde de bloque de roca que esté orientado desfavorablemente, ocurrirá si se cumplen las condiciones cinemáticas. La condición más importante es que el bloque sea "removible" en el espacio excavado, implicando que la dirección de movimiento incipiente aflora o tiene salida hacia la excavación.
4. Si se impide el movimiento por deslizamiento, se favorece al mismo tiempo el movimiento por rotación. Por lo tanto, cuando las posibilidades de deslizamiento son impedidas, debido a que los planos de deslizamiento no afloran hacia la excavación, pueden ocurrir mecanismos por volteo, pandeo (*buckling*), hundimiento de bloque (*block slumping*) y fallamiento por torsión o *torsional failure*.
5. Los bloques incompletos que no están totalmente cortados por el sistema de discontinuidades (implicando que no están completamente "aislados"), podrían fallar cuando la formación de nuevas fracturas en la roca los termine de aislar.

### **1.3 Movimientos de masa**

#### **1.3.1 Flujos de barro**

La fase principal de los flujos de barro consiste cuando la masa entra en movimiento totalmente dislocada y fluye como un cuerpo viscoso. El límite entre las masas móviles y el terreno en sitio está bien definido.

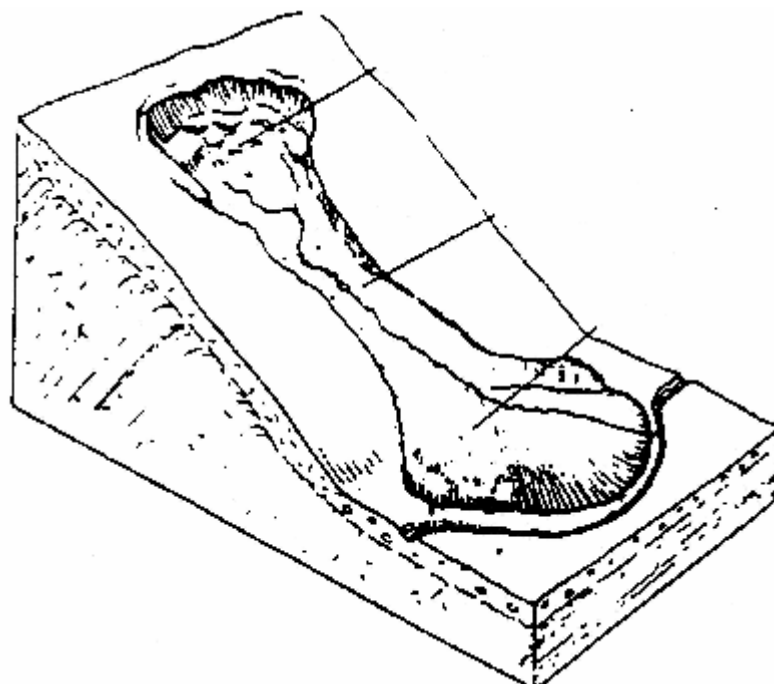
La velocidad con que ocurre el movimiento varía en función de la naturaleza del material transportado y de la topografía y pendientes del terreno. El rango de velocidad va desde un flujo plástico extremadamente lento hasta una colada catastrófica de materiales sueltos compuestos por una mezcla de rocas, árboles y suelos con humedades variables.

La gran energía cinética desarrollada permite largos recorridos sobre superficies poco inclinadas con formación de conos de eyección que cubren grandes áreas. Ocasionalmente se presentan pequeñas coladas secundarias sobre el cono inicial, con mucho agua proveniente de la masa deslizada se registran asentamientos en el cono principal.

Las causas principales de los flujos de barro son:

- Volcanismo: erupciones, calentamiento,
- Sismicidad: sismos, terremotos, vibraciones, etc.
- Fuertes precipitaciones durante períodos prolongados anormalmente.
- Fenómenos meteorológicos.

Figura 4. Flujos de barro



Existen algunos signos premonitorios de los flujos de barro, los cuales se describen a continuación:

- Hay abertura de fisuras y formación de protuberancias, grietas en las construcciones adyacentes y en muros de contención.
- Inclinación de árboles y postes, en una etapa más avanzada ocurren pequeños deslizamientos superficiales que pueden llegar a algunos metros.
- Formación de montículos y lenguas de deslizamiento que son más significativos cuando están ubicados al frente.
- Se secan unos manantiales y aparecen otros.

Los tipos de flujos de barro existentes pueden ser:

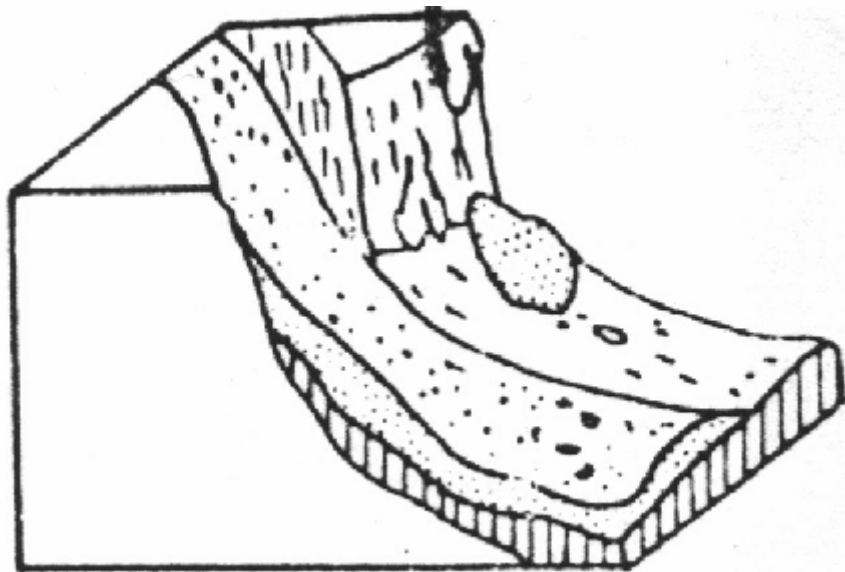
1. Flujo de derrubios
2. Flujo de bloques
3. Flujo de arena o limo
4. Colada
5. Colada de barro
6. Colada rápida de tierra
7. Deslizamiento de la cobertura superficial

### **1.3.2 Flujo de derrubios**

El flujo de derrubios se puede presentar con dos velocidades posibles, un movimiento muy rápido; mecanismo catastrófico, reducción de la fricción interna en pendientes fuertes y disminución de la resistencia al deslizamiento de los materiales sobre el sustrato rocoso. Al llegar a una superficie menos inclinada, horizontal o en contra pendiente, hay un aumento repentino de la fricción interna y disipación rápida de la energía cinética y en consecuencia una acumulación de la masa al pie de la ladera.

También existe un movimiento lento, el movimiento se origina debido a la caída de rocas y las masas de derrubios se desplazan lentamente

Figura 5. Flujo de derrubios

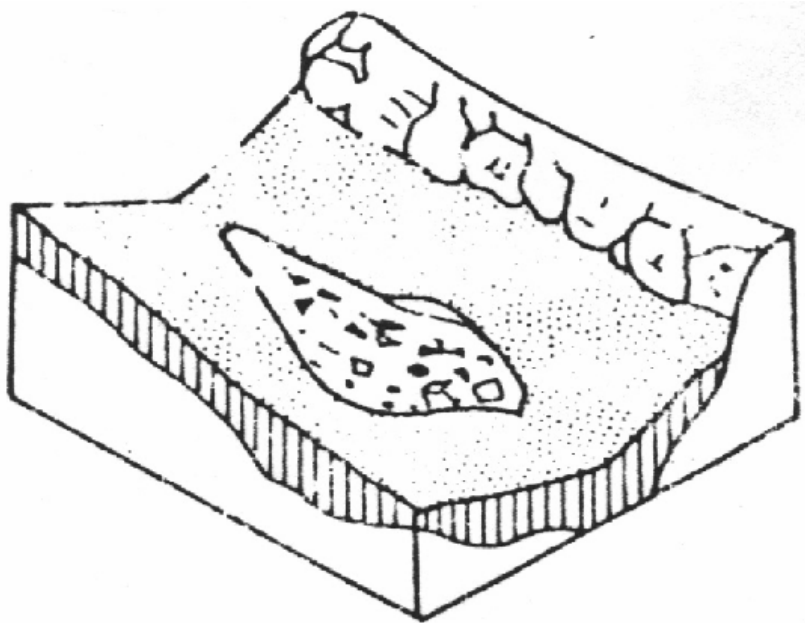


### 1.3.3 Flujo de bloques

Aglomeración considerable de bloques, a veces mezclados con material fino, la cual se desplaza lentamente. La morfología se asemeja exteriormente a la de un glaciar, limitado a las regiones de nieves permanentes. La gravedad es el principal motor de este movimiento.

Estos bloques también pueden contener material grueso, pero es poco probable que se de en estos casos de movimiento lento, ya que el material grueso no presenta deslizamiento de movimiento rápido al poder desprenderse de su lugar de origen.

Figura 6. Flujo de bloques

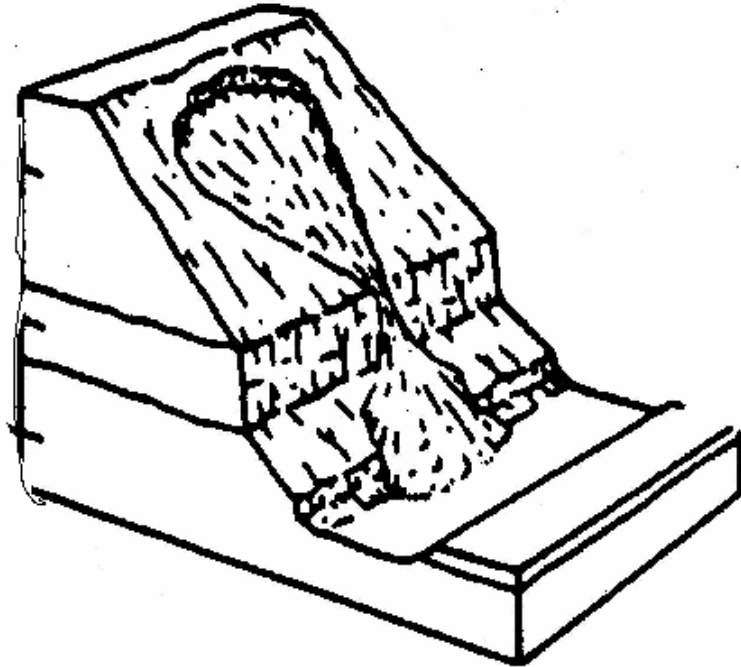


#### 1.3.4 Flujo de arena

Movimiento rápido o muy rápido, dependiendo del contenido de humedad, de dichos flujos; existen varios tipos de flujos de arena, los cuáles se describen a continuación:

Flujos secos muy rápidos, los materiales se acumulan en forma de conos y ocurre únicamente en períodos secos. Los bordes del movimiento no están definidos. El material es arena suelta sin finos. Las causas principales son: vibraciones debido a explosivos, sismos, etc. pérdida de cohesión aparente debido a desecación.

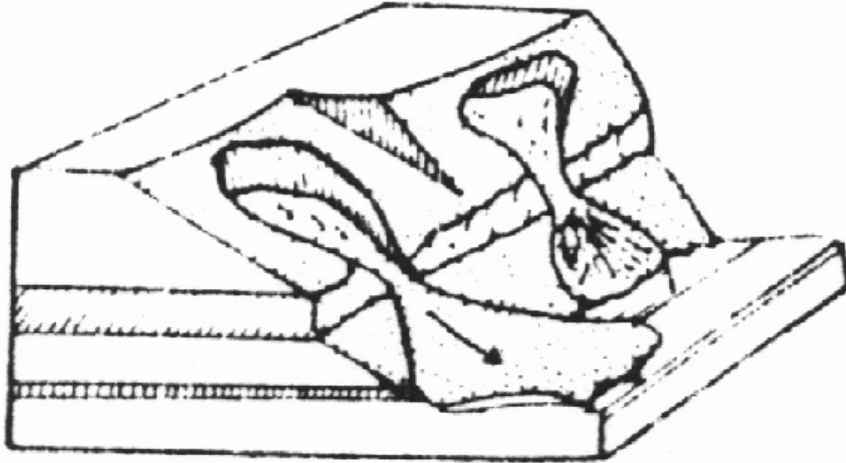
Figura 7. Flujo de arena seca



Los flujos de arena húmedos tienen lixiviación y movimiento lento de masas en terrenos de superficies poco inclinadas, fluyendo como un líquido viscoso debido a efectos de la saturación.

Los bordes están bien definidos y hay nichos de desprendimiento más profundo que en los secos. Las causas más comunes son sobrecarga por saturación proveniente de precipitaciones o derretimiento de nieves.

Figura 8. Flujo de arena húmeda



### 1.3.5 Colada

Movimiento originado por una sobrecarga debido a una absorción considerable de agua trayendo como consecuencia una disminución de la fricción interna y un aumento en la presión de agua intersticial.

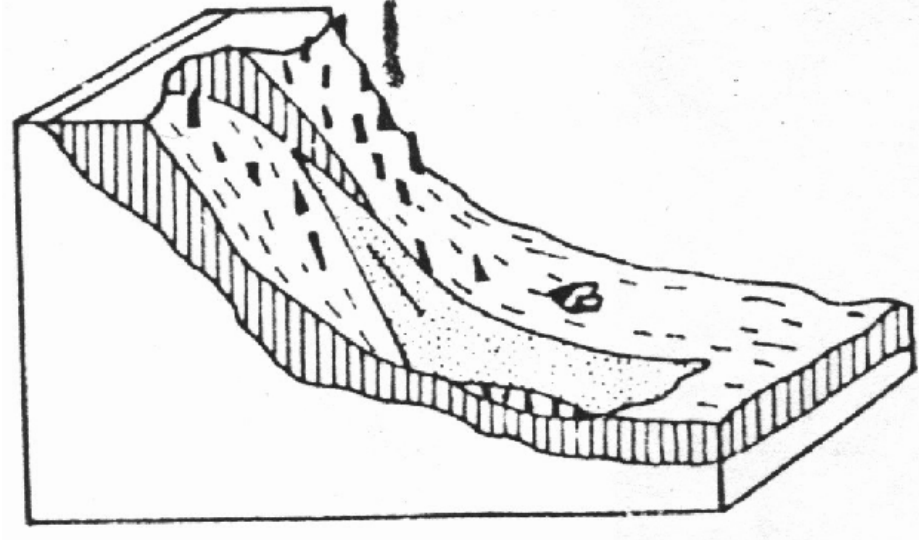
Por las fuertes pendientes y topografía abrupta la masa puede desarrollar grandes velocidades y altos niveles de energía cinética. Se considera como una evolución de la solifluxión.

Materiales de alta porosidad son susceptibles de entrar en este movimiento. La masa está compuesta por finos mezclados con guijarros y bloques. La ruptura deja en el suelo nichos en forma de "V".

La causa principal es absorción de agua proveniente de fuertes y extraordinarias precipitaciones considerables de agua, trayendo como consecuencia una disminución de la fricción interna y un aumento en la presión de agua intersticial.



Figura 9. Colada



### 1.3.6 Colada de barro

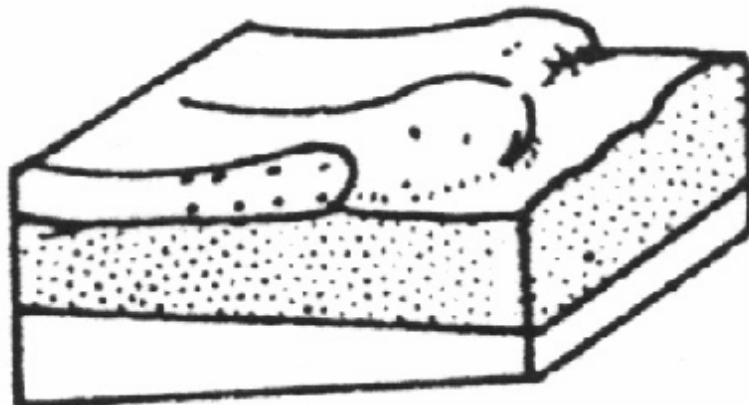
Los productos de la meteorización son arrastrados aguas abajo en formas de coladas.

Las velocidades de flujo pueden ser elevadas y el espesor de la masa en movimiento también puede ser considerable.

La humedad natural de los materiales finos sobrepasa el límite líquido con lo que cambian su estado de consistencia.

La masa puede transportar bloques grandes en suspensión sin redondearlos, la roca queda descubierta al perder su cobertura.

Figura 10. Colada de barro



## 1.4 Deslizamientos

### 1.4.1 Deslizamiento de la cobertura superficial

Pérdida de la cobertura de suelos en vertientes donde la pendiente es ligeramente superior al ángulo de fricción del material sobre la roca.

La fase principal de los deslizamientos se expresan en lo siguiente:

- La superficie de falla sigue una dirección preferencial.
- Movimiento de masas de suelo roca y fragmentos.
- La superficie puede ser plana o circular.
- El movimiento puede ser lento o catastrófico.
- Al pie del talud se observan deformaciones.
- Los desplazamientos son más pequeños que el ancho y largo del bloque en movimiento.
- Se forman grietas de tracción en la cresta.

Las causas de los deslizamientos pueden ser:

- Absorción de agua proveniente de lluvias.
- Rotura de tuberías.
- Disminución de la fricción.

- Aumento de sobrecarga en la cresta de los taludes.
- Vibración por sismos, voladuras, etc.
- Cortes al pie de los taludes y laderas.

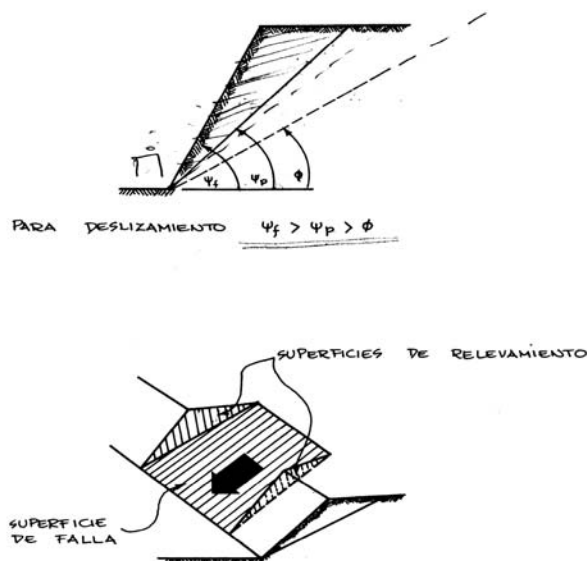
Existen varios tipos de deslizamientos:

- Planar
- Cuña
- Hundimiento
- Caída de lienzos rocosos
- De compartimentos
- Rotacional
- Deslizamiento de derrubios

### 1.4.2 Planar

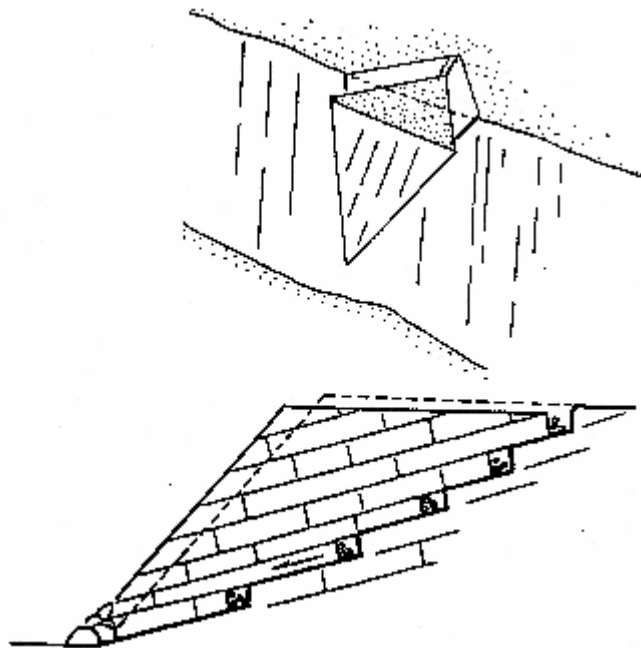
El rumbo de la discontinuidad es paralelo al rumbo del talud. La discontinuidad buza con un ángulo menor a la pendiente del talud. El ángulo de fricción interna es menor que el buzamiento de la discontinuidad

Figura 11. Falla plana y de cuña



Las discontinuidades se interceptan según una línea la cual se inclina en la misma dirección que la pendiente del talud. El ángulo de inclinación de esta línea es menor que la pendiente del talud en esa dirección, y la fricción en las discontinuidades es menor que la inclinación de la línea de intersección.

Figura 12. Falla de cuña

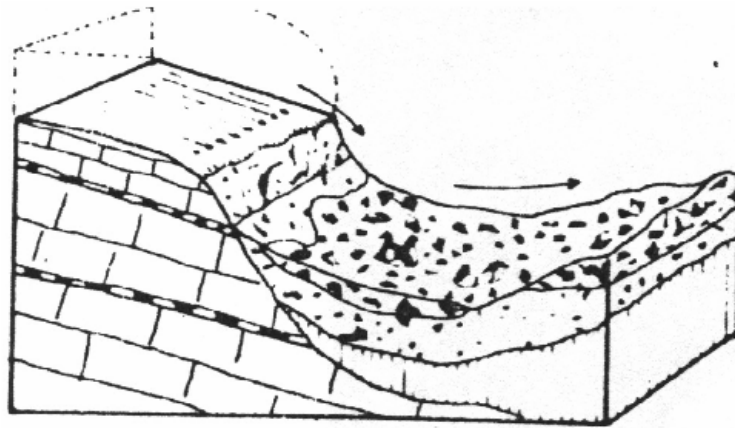


### 1.4.3 Caída de lienzos rocosos

Los planos de deslizamientos están constituidos por uno o varios estratos cuyos buzamientos son ligeramente menor a la pendiente del talud. El agua de lluvia lubrica el contacto. La masa desarrolla grandes niveles de energía y velocidad, fluye como un torrente de derrubios.

Los fragmentos se remontan sobre la ladera opuesta donde se depositan. Hay un aumento de la fricción debido a la disminución de la velocidad

Figura 13. Caída de lienzos rocosos



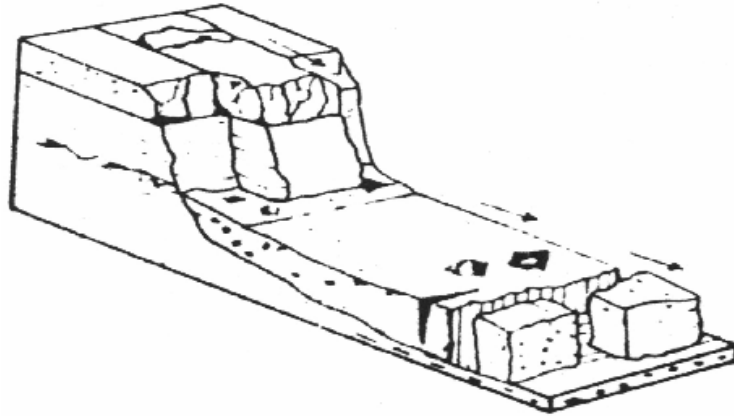
#### 1.4.4 Deslizamiento de compartimentos

Deslizamiento lento de grandes bloques compactos sin perturbación de la pendiente original sobre planos poco inclinados. Es posible una fragmentación en elementos más pequeños según planos de deslizamientos secundarios.

El deslizamiento de los fragmentos es menor que el de los bloques principales. En el pie ocurre una dislocación en forma de colada de derrubio que se desplaza lentamente, y esto está limitado lateralmente y detrás por grietas y fisuras. Se desarrolla siguiendo la dirección de la foliación y/o estratificación.

Entre las causas principales esta la absorción de agua proveniente de lluvia, deshielo, derretimiento de nieve, rotura de tuberías, etc.

Figura 14. Deslizamiento de compartimientos

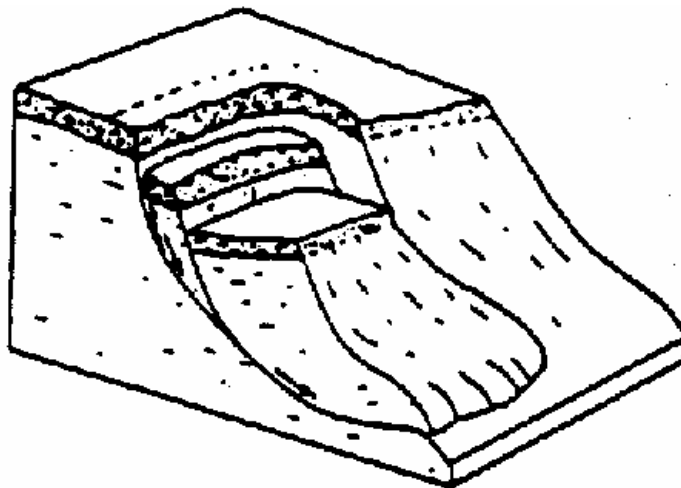


#### 1.4.5 Deslizamiento rotacional

La parte superior de la ladera colapsa según una superficie curva con la convexidad hacia adentro. El desequilibrio provocado por el primer deslizamiento origina otros movimientos sucesivos hacia arriba.

En la parte inferior la lengua del desplazamiento toma la forma colada de una colada de derrubio.

Figura 15. Deslizamiento rotacional

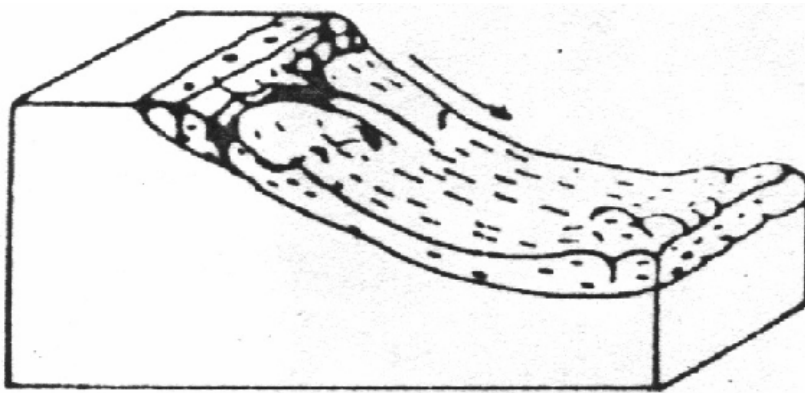


#### 1.4.6 Deslizamiento de derrubio

La masa en movimiento forma un bloque uniforme de grandes dimensiones. El conjunto presenta una superficie de rotura única. Cada roca se desplaza individualmente pero sujeta al movimiento de la masa.

La superficie de deslizamiento presionada por las rocas deslizadas, corta las capas inferiores y en ocasiones las pliega. Involucra materiales sueltos de orígenes diversos.

Figura 16. Deslizamiento de derrubios



#### 1.5 Derrumbes

La fase principal ocurre el derrumbe súbito de la masa mediante caída libre o deslizamiento a gran velocidad. La masa en movimiento se dispersa completamente y no se origina una superficie de deslizamiento definida. La superficie de falla no sigue una dirección preferencial.

Se producen caídas de bloques a gran velocidad los cuales giran sobre sí mismos y rebotan con proyección y poco rozamiento entre ellos.

Hay nubes de polvo y se escuchan ruidos estruendosos. Se generan corrientes de aire turbulento y destructivo.

En terrenos planos la energía cinética de la masa en movimiento disminuye totalmente con el consiguiente detenimiento de la masa. A los lados y delante de la masa en movimiento ocurren lluvias de fragmentos. La forma del movimiento está gobernada por la morfología del terreno.

Los obstáculos y accidentes topográficos pueden producir variaciones y cambios bruscos en el curso o dirección de la masa derrumbada. En terrenos planos la pérdida rápida de energía cinética la formación de un frente abrupto delante de la masa. El flujo de detritos suele detener su marcha en la ladera opuesta.

Las causas de los derrumbes pueden ser:

- Meteorización de materiales expuestos.
- Cambios en la temperatura.
- Aumento de presión de agua en las fisuras y grietas.
- Vibraciones por sismo, explosivos, tráfico de vehículos pesados, maquinarias, etc.
- Erosión en surco y cárcavas.

Los tipos de derrumbes son:

- Volcamiento
- Caída de bloques
- Desprendimientos periódicos
- Desprendimientos en masa
- Formación de escarpes y acantilados
- Avalanchas de derrubios.

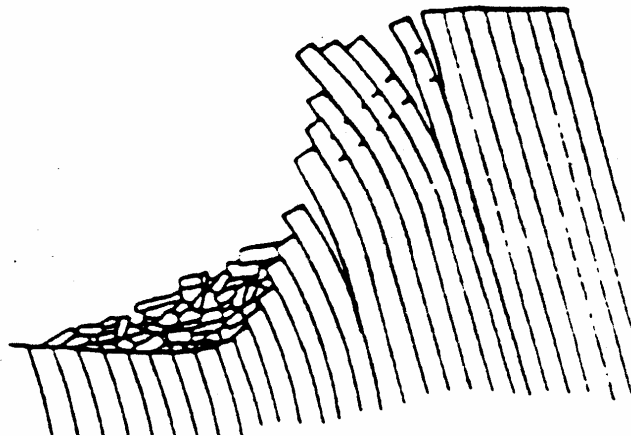


### 1.5.1 Volcamiento

El rumbo de la discontinuidad es paralelo al rumbo de la cara libre del talud. El buzamiento de la discontinuidad es en sentido contrario a la exposición del talud.

El ángulo de buzamiento es muy alto superior a  $70^\circ$ . La falla se produce por fatiga.

Figura 17. Volcamiento

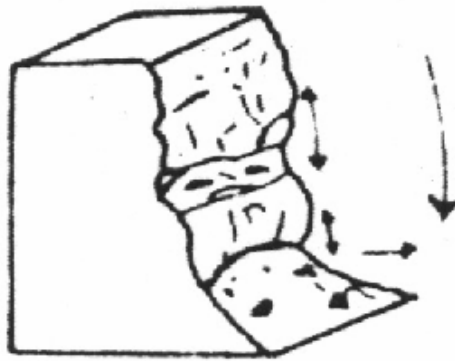


### 1.5.2 Caída de bloques

Caída de uno o más bloques en intervalos breves. Los bloques resbalan en caída libre o rebotan contra las paredes hasta llegar a una superficie poco inclinada donde pierden energía cinética.

Se genera un talud de escombros o conos de derrubios secos. Los bloques son de tamaño variable.

Figura 18. Caída de bloques

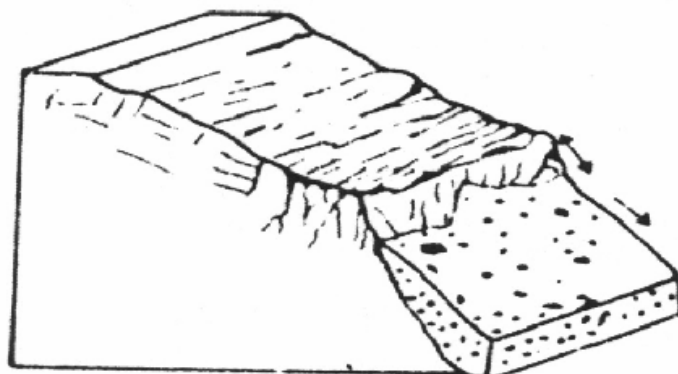


### 1.5.3 Desprendimientos periódicos

Este tipo de derrumbes se pueden resumir con las siguientes características:

- Caída de bloques aislados con grandes intervalos de tiempo.
- Acompañados de pequeños derrumbes.
- Hay formación de numerosas grietas de tracción.
- Se generan grandes taludes de derrubios.
- Pueden ser un signo premonitorio de grandes derrumbes catastróficos.

Figura 19. Desprendimientos periódicos

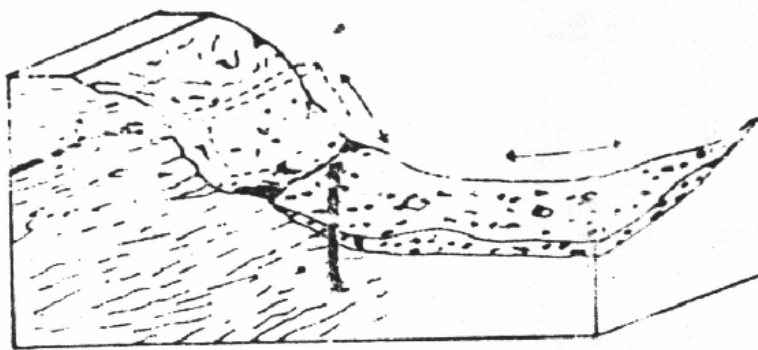


#### 1.5.4 Desprendimientos en masa

Se caracteriza por el paso brusco de la masa de la condición de reposo a la condición de movimiento y caída libre. La masa se fragmenta y forma un flujo de derrubio que se comporta como una cascada.

Los fragmentos cubren grandes zonas aguas abajo en el valle. Se forman conos de deyección. Se observan grandes nubes de polvo. Las dimensiones de los bloques son variables.

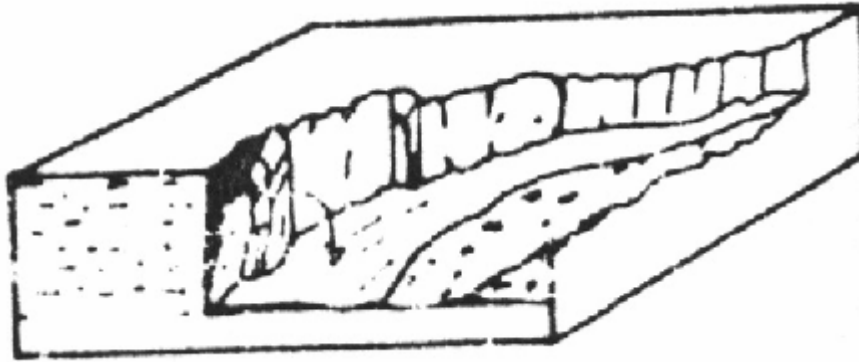
Figura 20. Desprendimientos de masa



#### 1.5.5 Formación de escarpas y acantilados

Socavamiento de las orillas por corrientes de agua o choque de olas. Se produce ruptura brusca y caída de las rocas que quedaron en voladizo. En regiones kársticas se producen procesos de disolución interna y lixiviación subterránea que dan origen a caídas bruscas de bloques.

Figura 21. Escarpas y acantilados

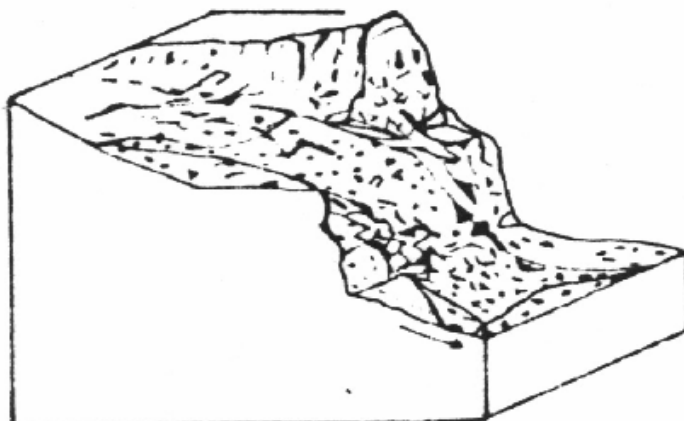


### 1.5.6 Avalanchas de derrubios

La trayectoria de la masa en movimiento es cortada por un acantilado. La masa deslizante se desplaza en caída libre y vuelve a formar un flujo al pie del acantilado.

Los bloques son fuertemente triturados por la caída y el roce entre ellos. Hay proyección de fragmentos alrededor de la zona de avalancha. Se producen nubes de polvo y ruidos estruendosos.

Figura 22. Avalancha de derrubios



## **2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD**

### **2.1 Análisis de estabilidad de taludes**

Entre las más corrientes fallas de masas de tierra están las que se producen por taludes inestables. La gravedad en la forma del peso de la masa del suelo y del agua que pudiera estar sobre ella, es la fuerza principal que tiende a producir la falla, mientras que la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es la principal fuerza resistente. La superficie de falla tiene la forma de la concavidad de una cucharita de café o de la mitad de un huevo que se haya cortado longitudinalmente, con el extremo menor en la parte superior del talud y el más ancho en la parte inferior.

La falla de la base o profunda se produce en arcillas blandas o que tengan numerosas vetas blandas. La parte superior del talud se cae dejando un escarpe vertical mientras que el terreno a nivel situado más allá del pie del talud se levanta en comba. La falla de pie de talud, se produce en taludes de gran pendiente de suelos que tienen un ángulo de fricción interna apreciable. La parte superior del talud cae formado frecuentemente una serie de escalones, mientras que el terreno situado cerca del extremo inferior del talud se comba hacia fuera cubriendo el pie del talud. La falla del talud o de frente es un caso especial de la falla de pie de talud en el que la presencia de un estrato duro limita la extensión de la superficie de falla.

Las fallas localizadas en un sólo punto de la masa de tierra no indican, necesariamente, que la masa sea inestable. La inestabilidad sólo se produce como resultado de la falla por esfuerzo cortante en una serie de puntos que definen una superficie, a lo largo de la cual se produce el movimiento.

Es difícil determinar la causa de muchos movimientos de masas de tierra. Realmente cualquier cosa que produzca una disminución de la resistencia del suelo o un aumento de los esfuerzos en el suelo, contribuye a la inestabilidad y deben tomarse en consideración, tanto en el proyecto de las estructuras de tierra como en la corrección de las fallas.

Mucha crítica se ha generado en el pasado por el uso impropio de los factores de seguridad y de las definiciones incompletas que han sido dadas en varias ocasiones para dichos factores. Sin embargo, cualquier análisis cuantitativo de estabilidad deberá hacer uso de algún grado de seguridad. Se deberá entender que muchos tipos de falla son posibles con respecto a un sistema completo y también, el que muchos tipos son posibles con respecto a puntos individuales de un sistema. Por lo tanto aparecerá que no hay tal cosa como el factor de seguridad y que cuando un factor de seguridad es usado, su significado debe ser claramente definido.

En algunas ocasiones, el coeficiente de seguridad se aplica a la resistencia al esfuerzo cortante, y se define como “la cifra por la que hay que dividir la resistencia a esfuerzo cortante para que la masa de terreno considerada llegue estrictamente a la situación de rotura”.

En problemas de deslizamiento de taludes o de la base de cimentaciones, el valor mínimo de coeficiente de seguridad definido de este modo suele hacerse variar entre 1.1 y 1.5, según especificaremos en cada caso. El valor más bajo se emplea, en ocasiones, cuando se coloca instrumentación para observar la obra durante la construcción. En algunos casos obtendremos el mismo valor de los dos coeficientes de seguridad definidos. Como los componentes de la resistencia del terreno y las cargas aplicadas son hasta cierto punto independientes.

Como un ejemplo se ha asumido que un talud deberá ser diseñado de un suelo que bajo las condiciones dadas tiene las características de resistencia siguientes:

$$C_e = 600 \text{ lb/pie}^2; \quad \phi_e = 15^\circ$$

En orden para obtener un margen de seguridad es especificado que los valores de trabajo deberán ser menores que aquellos dados arriba. Los valores de trabajo pueden ser definidos como aquellos valores más grandes que pueden desarrollarse o movilizarse; para usos prácticos se deberá suponer que el suelo no podrá soportar mayores esfuerzos cortantes que aquellos representados por los valores de trabajo. Con objeto de presentar un valor caso tan general como sea posible, se deberá asumir primeramente que diferentes márgenes de seguridad son deseables para los dos componentes de la resistencia al corte y los valores de trabajo para este ejemplo serán tomados:

$$C_d = 400 \text{ lb/pie}^2; \quad \phi_d = 12^\circ$$

Cuando el talud haya sido construido de acuerdo a estas especificaciones, los esfuerzos cortantes sobre la superficie crítica se escribirán:

$$r = C_d + \sigma \tan \phi_d$$

en la cual  $C_d$  es el promedio del valor de la cohesión desarrollada y  $\phi_d$  es el valor promedio del ángulo fricción desarrollado. En realidad las resistencias cortantes no se desarrollarán hasta un grado igual en todos los puntos de una superficie incipiente de falla. Las deformaciones al corte varían considerablemente, y los esfuerzos cortantes podrán ser distantes de una constante, de acuerdo a la acción progresiva.

Los factores de seguridad que han sido usados en las consideraciones tratadas arriba podrán expresarse:

$$F_c = C_e / C_d \quad \text{y} \quad F_\phi = \tan\phi_e / \tan\phi_d$$

en la cual  $F_c$  es el promedio del factor de seguridad para el componente cohesional de resistencia y  $F_\phi$  es el promedio del factor de seguridad para la componente friccional de la resistencia. En este ejemplo:

$$F_c = 600 / 400 = 1.5 \quad \text{y} \quad F_\phi = 0.268 / 0.212 = 1.26$$

Se ha asumido ahora que un talud ha sido diseñado sobre estas bases y que el valor promedio de la presión intergranular directa sobre la superficie crítica a través del talud es de 2,300 lb/pie<sup>2</sup>. Basado en esto, la resistencia al corte promedio sobre la superficie crítica será:

$$600 + 2,300 \times 0.268 = 1,216 \text{ lb/pie}^2$$

y el valor promedio de los esfuerzos cortantes sobre la superficie crítica es:

$$400 + 2,300 \times 0.212 = 889 \text{ lb/pie}^2$$

Ahora se podrá notar que los valores de  $F_c$  y  $F_\phi$  que fueron usados para el diseño no son la única combinación posible de estos factores para este talud. Una combinación de los valores de  $F_c$  y  $F_\phi$  que puede ser preferible a la considerada arriba, es la cual en la que los dos factores tienen el mismo valor. Esta combinación podrá definirse como sigue. Para el caso en el cual se desean valores iguales para  $F_c$  y  $F_\phi$ , entonces son definidos por  $F_s$ .

$$F_s = C_e / C_d = \tan\phi_e / \tan\phi_d = s / r$$

en la cual  $F_s$  es el factor de seguridad con respecto a la resistencia al corte. Su valor por ejemplo será:

$$F_s = 1216 / 889 = 1.37$$



Existen un número ilimitado de combinaciones posibles de  $F_c$  y  $F_\phi$ , se deberá mencionar que la localización de la superficie crítica a través de un talud conocido no será exactamente la misma para diferentes combinaciones, por ejemplo en la combinación de  $F_c$  igual a 1.5, y  $F_\phi$  igual a 1.26, el valor 1.5 puede ser definido como la relación entre la cohesión real y la cohesión requerida por la estabilidad con toda la fricción movilizada; esta relación es en algunas ocasiones denominada el factor de seguridad con respecto a la cohesión. De acuerdo a una importante relación, la cual será demostrada en los capítulos siguientes, la cohesión requerida por la estabilidad es directamente proporcional a la altura de la pendiente. De esto se puede obtener la conclusión de que el factor de seguridad con respecto a la cohesión, es igual a una cantidad más significativa llamada, el factor de seguridad con respecto a la altura.

En los proyectos de taludes, muros de contención y cimentaciones, suele haber más aproximaciones e incertidumbres que con otras estructuras, debido a la complejidad del comportamiento del terreno y al conocimiento incompleto de las condiciones del subsuelo. Los coeficientes de seguridad que figuran en las normas, deberían basarse en la concepción, proyecto, construcción y funcionamiento de las estructuras se lleven a cabo de acuerdo con la buena práctica, con conocimientos, inteligencia y experiencia razonables.

En terrenos de rotura más o menos dúctil, por el contrario, suelen producirse deformaciones importantes antes de llegar a la rotura. Es evidente que en el futuro habrá que llegar a calcular dichas deformaciones y a definir deformaciones admisibles que resulten dividir por un coeficiente de seguridad las que se consideren dañinas por la estructura. Dado que las deformaciones angulares dependen en gran parte del coeficiente de seguridad respecto a la rotura, uno de los objetos de dicho coeficiente es mantener dichas deformaciones dentro de los límites razonables.

Cuando se estudia la carga de rotura de una cimentación, el coeficiente de seguridad se define del siguiente modo:

$$F = Q_r / Q$$

Siendo  $Q_r$  la carga de rotura, y  $Q$  la que realmente actúa. En edificaciones de varios pisos, para calcular las cargas que actúan sobre la cimentación, se considera una reducción de sobrecargas.

El valor mínimo del coeficiente de seguridad definido de este modo, suele hacerse variar entre 1.5 y 6, dependiendo del grado de confianza del valor obtenido de la carga de rotura entre otras cosas.

## **2.2 Métodos de cálculo para estabilidad de taludes**

### **2.2.1 Análisis por tanteos**

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de equilibrio plástico. Cuando la masa está a punto de fallar, las fuerzas que producen el movimiento han llegado a ser iguales a la resistencia que opone la masa a ser movida. Un ligero aumento en las fuerzas es suficiente para producir una continua deformación.

Debido a la geometría irregular de la masa y al complejo sistema de fuerzas que hay en cualquier problema real, los métodos de análisis directo, como los que se usan para el empuje de tierras, rara vez son aplicables. En vez de métodos naturales, como sembrar raíces de izote, seto, etc., es mucho más provechoso emplear un sistema de tanteo para determinar el factor de seguridad en un proyecto tentativo o la falla potencial en un talud existente.

Primero se supone una superficie de falla potencial y se calcula la resistencia al esfuerzo cortante que actúa a lo largo de esa superficie; después se determinan las fuerzas que actúan en el segmento de suelo limitado por la superficie de falla y posteriormente se calcula el factor de seguridad de ese segmento en la forma siguiente:

Seguridad contra rotación:

$F_m S = \text{momento resistente} / \text{momento que produce la falla.}$

Seguridad contra traslación (movimiento en la línea):

$F_t S = \text{fuerzas que se oponen al movimiento} / \text{fuerzas que producen movimiento.}$

Si se pueden numerosos segmentos, aquel en que el factor de seguridad hallado sea menor, será teóricamente el verdadero factor de seguridad de la masa del suelo. Sin embargo, en la práctica, el menor factor de seguridad se halla analizando unos cuantos segmentos bien seleccionados de posible falla y esto es suficientemente exacto.

Generalmente se considera que las fuerzas que producen el movimiento incluyen la inercia, la gravedad y todas las cargas externas. Las que se oponen o resisten el movimiento incluyen la resistencia del suelo y otras fuerzas a lo largo de la superficie potencial de movimiento.

### **2.2.2 Método con un arco de circunferencia (método sueco)**

El ingeniero sueco K. E. Petterson fue el primero que sugirió un método general de análisis de estabilidad de taludes, como resultado de los estudios de los deslizamientos en el puerto de Gotemburgo. La superficie de los deslizamientos se representa por un segmento de la superficie de un cilindro, que en sección transversal es un arco de circunferencia.

El momento de vuelco  $M_o$  por metro de ancho de talud, con respecto al centro de la circunferencia es la suma algebraica de los momentos debidos al peso de la masa  $W$ , las componentes horizontal y vertical de la presión del agua (si el talud está inundado) actuando en la superficie del talud,  $W_{wh}$  y  $W_{wv}$  y cualquier otra fuerza externa que actúe sobre la masa,  $V$ . (momento motor).

$$M_o = Wd - W_{wh}b - W_{wv}d' + V_f + (W_{aeb}' / g)$$

En esta expresión,  $b$ ,  $b'$ ,  $d$ ,  $d'$  y  $f$  son las distancias respectivas de los centroides de los pesos o de las líneas de acción de las fuerzas con respecto al centro de la circunferencia. El momento resistente lo proporciona la resistencia del suelo. Si la resistencia a esfuerzo cortante es  $s$ , en cada segmento de arco  $\Delta L$ , cuyo radio es  $R$ , el momento resistente por cada metro de ancho de talud es:

$$M_r = R(\sum s\Delta L) = R (s_1\Delta L_1 + s_2\Delta L_2 + \dots)$$

El factor de seguridad del segmento circular se halla así:

$$SF = M_r / M_o$$

El análisis por el arco de circunferencia se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas, siempre que la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos sea independiente de los esfuerzos normales al plano de falla; tales son las arcillas saturadas.

### 2.2.3 Método de las dovelas o rebanadas

Para calcular la estabilidad de los taludes en suelos cuya resistencia depende del esfuerzo normal, es necesario calcular el esfuerzo normal efectivo a lo largo de la superficie de falla.

No se dispone de una solución rigurosa para los esfuerzos normales, pero el método de las dovelas, desarrollado por Fellenius, ha comprobado que es suficientemente aproximado para estos cálculos.

La zona de falla se divide en rebanadas verticales, no es necesario que todas tengan el mismo ancho y para facilitar los cálculos se hace que sus límites coincidan con las intersecciones de la circunferencia con los estratos de suelo por abajo y con paramento del talud por arriba. Al hacer el análisis se considera que cada rebanada actúa independientemente de las colindantes: no se desarrolla esfuerzo cortante entre ellas y las presiones normales en cada lado de la dovela producidas por las colindantes son iguales.

La fuerza vertical que actúa en cada rebanada,  $W$ , incluye el peso del suelo más el del agua directamente arriba de ella; también incluye el peso de cualquier carga externa, como una estructura. La fuerza neta o efectiva que actúa hacia abajo en la parte curva de la rebanada, es el peso total menos la fuerza hacia arriba debida al esfuerzo neutro,  $W' = W - U$ . La fuerza hacia arriba  $U$ , se halla multiplicando el esfuerzo neutro  $u$  por el ancho de la dovela.

Si la rebanada es suficientemente estrecha, la curva inferior se puede substituir por una línea recta que forme el ángulo  $\psi$  con el eje horizontal. La componente de la fuerza vertical normal plano,  $W'N$  se calcula por la expresión  $W'n = W' \cos \psi$ . La resistencia a esfuerzo cortante en ese segmento de arco se puede expresar en la forma siguiente:

$$P' \tan \psi',$$

$$S = c' + (W'n / \Delta L) \tan \psi'$$

El momento de las fuerzas verticales es la suma algebraica de los momentos del peso total  $W$  de cada una de las dovelas con respecto al centro de la circunferencia,  $Wd$ . A este momento hay que añadir, algebraicamente, los momentos totales de la componente horizontal de la presión del agua sobre el talud y de la presión del agua sobre las grietas.

Se han hecho muchas variaciones y refinamientos de este método básico. Aunque ninguno es riguroso, se ha comprobado que son suficientemente exactos para el análisis y proyecto.

Para hacer el análisis es necesario tantear un gran número de posibles superficies de falla; la que tenga el factor de seguridad menor, será la superficie más crítica, esto es, la superficie en la cual es más probable que ocurra la falla.

La forma tabular o la computadora digital, son las indicadas para resolver los problemas cuando se emplea esta forma de análisis, a las cuales se adapta bien. Se fija una cuadrícula donde se sitúan los centros de las posibles circunferencias de falla y se establece un rango de valores para los radios de las circunferencias correspondientes a cada centro.

Una computadora puede dejar impreso directamente, todos los factores de seguridad, o solamente el mínimo y su radio, para cada centro de circunferencia. Si se dibujan curvas uniendo los centros de las circunferencias que tienen iguales factores de seguridad mínimo, como si fueran curvas de nivel, se puede determinar la ubicación de la circunferencia más crítica y el factor de seguridad mínimo.

Los análisis de estabilidad para cualquier arco de prueba, utilizando el método de rebanadas y asumiendo que las fuerzas laterales combinadas sobre ambos lados de la rebanada son iguales, pueden ser ahora sumariados.

La selección de la escala vertical y de numerosos otros detalles es arbitraria, y con respecto a dichos detalles esta explicación es sólo dada como una conveniencia para llevar a cabo el análisis.

Primeramente se tiene que asumir que una sección dada está siendo analizada para determinar factores de seguridad. Para la masa de suelo analizada, se asume que el círculo pasa a través de la base de la pendiente y que la cohesión es efectiva sobre todo el arco de ruptura. Las presiones de agua en esta sección sólo ocurren a lo largo del arco. Las posibles variaciones a partir de estas condiciones asumidas son de considerable importancia en muchos casos.

#### **2.2.4 Método del círculo de fricción**

Un arco de ruptura circular es el modelo que se usa en este método, su radio designado por  $R$ . Un círculo concéntrico de radio  $R \sin \phi$  es también otro parámetro. Cualquier línea tangente al círculo interior, deberá de interceptar al círculo principal a una oblicuidad  $\phi$ . Por lo tanto, cualquier vector representado a una presión intergranular a la oblicuidad  $\phi$  a un elemento de arco de ruptura, deberá ser tangente al círculo interior. Este círculo interior es llamado, círculo de fricción o el círculo  $\phi$ . El método del círculo de fricción para análisis de pendientes o taludes, es una aproximación muy conveniente para las soluciones tanto matemáticas como gráficas. Se le ha dado este nombre debido a la característica de asumir que el método se refiere al círculo  $\phi$ .

Las fuerzas actuantes pueden ser consideradas como que son el peso total  $W$  y la fuerza neutral límite resultante  $U$ . El vector de peso y su línea de acción puede determinarse por métodos gráficos partiendo del diagrama de la carga de presión; existe un vector  $B$ , que es la resultante de la fuerza actuante.

En la figura 23 se muestran las fuerzas cohesivas resistentes actuando tangencialmente sobre cada elemento del arco. La longitud del arco  $AB$  es designada por  $L_a$ , la longitud de la cuerda  $AB$  por  $L_c$ . La suma algebraica de todas las fuerzas de cohesión a lo largo del arco es  $cdL_a$ . Sin embargo, si dos pequeñas fuerzas de cohesión tales como  $C_2$  y  $C_5$  son divididas en componentes paralelas y normales a la cuerda  $AB$ , las componentes paralelas darán sólo un momento de rotación contraria a las manecillas del reloj. Por lo tanto, la suma vectorial de todas las fuerzas de cohesión será  $cdL_c$ , debido a que las componentes normales al vector se cancelan, y el vector  $C$ , el cual es de una magnitud  $cdL_c$  y representa la cohesión total, es una fuerza, la cual actúa paralela a la cuerda  $AB$ . Su línea de acción se podrá determinar por consideraciones de los momentos. El momento de la cohesión total es dado por la expresión:

$$cdLaR = cdLca$$

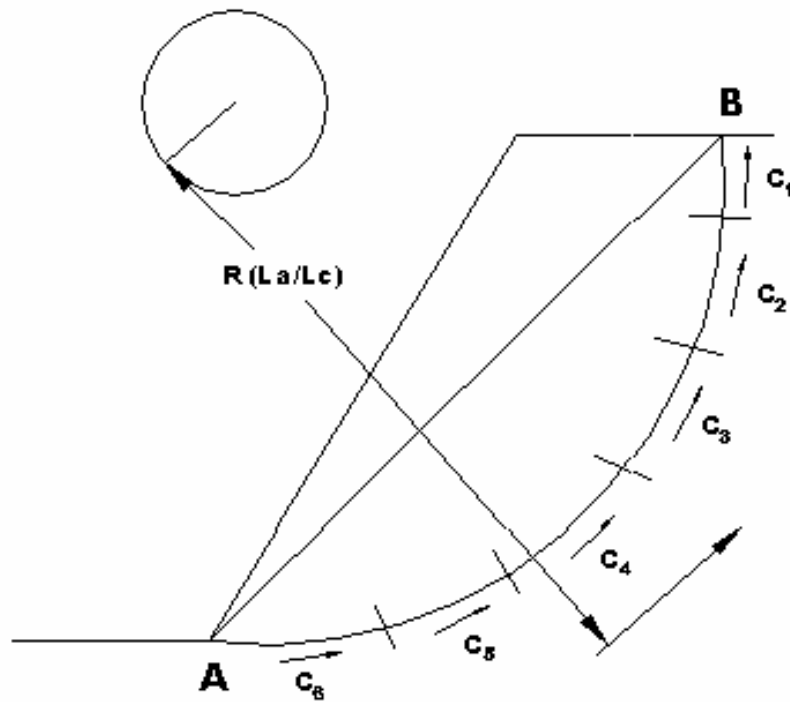
en la cual  $a$ , el momento del brazo de vector  $C$ , será:

$$a = R \times (L_a / L_c)$$



Tres pasos gráficos son necesarios para la solución gráfica por el método del círculo de fricción. Estos tres pasos o etapas son la determinación del peso del vector  $W$ , la determinación de la fuerza neutral del vector  $U$ , y un procedimiento de prueba final, el cual se requiere debido a que el ángulo  $\phi_d$  no es normalmente conocido directamente. El vector del peso puede determinarse, si así se desea, por medio de planimetrar la superficie. Su línea de acción es verticalmente a través del centro de gravedad de la superficie o área. El centro de gravedad puede determinarse por medio de cortar un pedazo de cartón en forma de la masa de falla y balanceando el cartón sobre un punto agudo.

Figura 23. Cohesión



### **2.3 Datos necesarios en campo**

Para los datos necesarios en campo se toman las siguientes consideraciones:

Un ensayo de penetración estándar. Que consiste en sondeos mecánicos para medir la compacidad del suelo, en donde el mismo se opone a la penetración de una sonda que es hincada por medio de un martinete de 140 libras de peso y dejada caer a una altura de 30 pulgadas, y al mismo tiempo obtener muestras del tipo de suelo en cuestión, hasta una profundidad de 30 pies.

Fotografía aérea. Ésta proporciona información sobre posibles deslizamientos anteriores y la geometría de estabilidad a nivel macro del accidente geográfico en estudio.

Descripción del lugar. Consiste en determinar la forma del terreno, con todas sus características geográficas, sus colindancias, y toda la información que ayude al estudio a realizar.

Exploración del subsuelo. Fue llevada a cabo por medio de perforaciones mecánicas, a profundidades que fueron determinadas de acuerdo a las características del proyecto y al tipo de subsuelo encontrado durante el proceso de exploración.

Con el objeto de definir la secuencia, espesor y extensión de los diferentes estratos constituyentes del subsuelo y de obtener muestras representativas de los materiales componentes de los mismos, de tamaño y condiciones adecuadas para identificación y cuantificación de sus propiedades mecánicas, se lleva a cabo un programa de exploración que incluye, ubicación y profundidad de los mismos.

Estratigrafía. En base a una inspección de cada una de las muestras, y a los resultados de las pruebas IN SITU efectuadas durante el proceso de exploración y al de los ensayos estandarizados por ASTM, efectuados a las muestras, se elaborara un perfil estratigráfico detallado de cada una de las perforaciones, identificando debidamente los materiales constitutivos del subsuelo.

Los estratos limosos arenosos bien cementados le dan estabilidad al talud y son bastante resistentes a la erosión, pero son debilitados por los estratos de arena pómez de compacidad suelta y que no ofrecen una adecuada resistencia a la erosión eólica e hídrica, lo que hace que el sistema pierda su estabilidad, si no se protege a los estratos de compacidad suelta a media, contra la erosión. Como el asunto que nos ocupa es la estabilidad del talud, todos los ensayos serán dirigidos a conseguir la mayor cantidad de información sobre el lindero de los taludes.

### 3. GEOLOGÍA Y CAUSAS DE FALLA

#### 3.1 Zonificación de riesgos geológicos

Para la definición de estas zonas se puede tomar lo siguiente:

- Metodología de análisis que permite diferenciar zonas con distintos niveles de riesgo a partir de las características geológicas y geotécnicas de un sector determinado.
- Uso: Esta metodología se puede usar con fines de planificación urbana.
- Vulnerabilidad de zonas pobladas

Objetivos

General:

- Obtener un *Mapa de Riesgo Geológico* que sirva de base a las propuestas de desarrollo urbanístico.

Específicos:

- Diferenciar zonas con distintos niveles de riesgo y vulnerabilidad.
- Caracterizar las zonas de distinto riesgo y establecer las restricciones para su desarrollo urbanístico.
- Proveer un criterio confiable para la toma de decisiones en cuanto a cómo y qué zonas intervenir.

Metodología

- Identificación de las variables principales que inciden en la estabilidad de los terrenos
- Tratamiento individualizado y estudio del comportamiento de la variable.
- Ponderación de la incidencia del comportamiento de la variable estudiada en la estabilidad.

- Producción de un mapa temático para cada una de ellas, en una escala apropiada.
- Integración de las variables por superposición de todos los mapas temáticos.
- Generación del mapa de riesgo geológico.

#### Variables

- Geología: litología - estructura.
- Geomorfología y geodinámica externa: procesos, tipos, inventario de procesos, densidad, ubicación areal.
- Clinometría y pendientes: longitudinales y transversales
- Geotecnia: caracterización geomecánica de los materiales que afloran en la zona.
- Estabilidad geoestructural de laderas y taludes de corte.
- Hidrología - hidráulica: análisis de cuencas, caudal, pluviometría, etc.
- Sísmicidad.
- Otras.

#### Criterios de zonificación

- Zonas estables: 100% de las variables positivas
- Zonas parcialmente estables: 75% de las variables positivas
- Zonas de estabilidad media: 50% de las variables positivas
- Zonas inestables: 75% de las variables negativas
- Zonas muy inestables: 100% de las variables negativas.

## Estrategia operativa

- Crear grupo central de coordinación y subgrupos de trabajo por cada variable estudiada.
- Cada grupo debe tener un responsable y establecer sus necesidades en cuanto a personal, equipos, recursos.
- Grupo central de coordinación integrado por los responsables de cada subgrupo.
- Determinar la extensión de la zona de estudio y las prioridades.
- Tiempo disponible.
- Costos.

## Procesamiento de datos

- Herramientas informáticas: MAP INFO:
- Sistemas de información geográfica.
- Otros

## **3.2 Causas de las fallas o deslizamientos**

### **3.2.1 Fenómenos de inestabilidad de taludes**

En cualquier terreno que no sea horizontal, existen una serie de fuerzas que tienden a nivelarlo: fuerzas de gravedad, filtración, presión del agua en las diaclasas, etc. Se oponen a ello la resistencia del terreno, raíces y otras. Cuando el primer grupo de fuerzas predomina sobre el segundo, el talud se hace inestable. Las diaclasas son fisuras en las rocas, en los que no existen desplazamientos en los dos bloques de las mismas.

La mayoría de las pendientes abruptas que existen en la naturaleza han sido formadas por la acción de corrientes de agua, olas, glaciares o desmontes de excavaciones. La erosión en general, y sobre todo los fenómenos de inestabilidad de taludes tienden a suavizar dichas pendientes. Existen muchas clasificaciones, que establecen las divisiones en lo que son realmente series continuas en fenómenos de inestabilidad, lo que diferencia a los primeros es que en ellos la masa inestable cae.

### **3.2.1.1 Desprendimientos**

Se producen desprendimientos en los farallones rocosos, en cuya parte superior suelen aparecer diaclasas verticales de tracción producidas por la erosión. El fenómeno es particularmente intenso en las rocas extrusivas, en la que existe con frecuencia una red de diaclasas verticales resultantes de la retracción de la lava al enfriarse. La importancia de los desprendimientos puede depender de la naturaleza de la red de diaclasas subperpendiculares a la anterior que se presenta en ocasiones.

Si esta red de diaclasas cae aunque sea ligeramente, hacia el interior del macizo, dicho macizo está relativamente estable; si la pared alta de roca que sale del mar es erosionada en su base por una corriente de agua, o por las olas, se producirán de tiempo en tiempo, “desplomes” de grandes paquetes de columnas, que caerán en vertical al romper por tracción a través de una diaclasa. Si por el contrario, la red de diaclasas hacia el exterior del macizo, la ladera será inestable, produciéndose la inclinación de las columnas por flexión y su consiguiente “desplome”. El término “desplome” se va a reservar por estos dos tipos de desprendimiento en los que la rotura se produce por tracción.

La presión del agua en las diaclasas y el efecto de cuña producido por la helada, son causa importante de desprendimientos, como lo demuestra el aumento de estos fenómenos durante los meses de lluvia o deshielo o de helada. Esta última causa puede ser importante, sobre todo en desprendimientos pequeños.

Indica Terzaghi que la roca próxima a la pared alta de roca, puede estar mucho más diaclasada que el resto. Ello hace que el agua que corre por la superficie en las zonas más alejadas penetre en grandes cantidades en dichas diaclasas. Un sistema de diaclasas subverticales y aproximadamente paralelas a un farallón, puede dar lugar a fuertes empujes de agua y al desplome de lajas rocosas que en un caso descrito por Terzaghi alcanzaron un volumen de un millón de metros cúbicos. El agua puede proceder de un embalse, cuyo caso se pueden producir desprendimientos en la zona situada aguas debajo de la presa.

Si se trata de una presa bóveda, lo más probable es que un eventual desprendimiento afecte a los estribos, por lo cual sería peligrosísimo. Son especialmente desfavorables las diaclasas que crucen la presa desde la zona de aguas arriba del embalse y los escapes en la zona de aguas debajo de las tuberías de fondo. Un desprendimiento de 15,000 m<sup>3</sup> en el estribo izquierdo de la presa del Fraile (Perú) estuvo a punto de destruir dicha presa. Los granitos exfoliados pueden ser muy peligrosos en este sentido. En las zonas en que hay desprendimientos rocosos suelen existir abundantes derrumbes en el pie, a no ser que el talud sea vertical y que una corriente de agua los transporte. Según Jaeger (1972), no ocurren desprendimientos en pendientes en roca de menos de 35°.



### **3.2.1.2 Corrimientos**

Dentro de los corrimientos se distinguen cuatro grupos: deslizamientos, flujos de arcilla, corrimientos provocados por la licuefacción y análogos, y reptación. En zonas donde hay superficies de deslizamiento preexistentes, pequeñas operaciones de construcción pueden desencadenar nuevos movimientos.

Los corrimientos de terraplenes situados sobre turba se caracterizan por importantes asientos, levantamientos en el pie y desplazamientos laterales, sin que sea fácil decir si se trata más bien de corrimientos o de movimientos de reptación. Al igual que sucede con los desprendimientos, los corrimientos se suelen activar en épocas de lluvia o deshielo. Por otras presiones intersticiales de una masa de roca crecen fuertemente si las diaclasas se taponan en su zona exterior debido a la formación del hielo.

### **3.2.1.3 Deslizamientos**

En este caso, una masa de suelo desliza con relación a otra, al excederse la resistencia al corte a lo largo de la zona de separación. En ellos la masa inestable se mueve con cierta rapidez, manteniéndose prácticamente como uno o varios bloques, al menos durante la fase inicial del movimiento. Se pueden distinguir tres tipos de deslizamientos según que la forma de dicha superficie sea plana, curva o quebrada, o se trate de cuñas que deslizan. Los deslizamientos en arcilla o suelo residual rara vez exceden los 18 m/h.

En los deslizamientos en roca, es frecuente que la masa deslizada alcance grandes velocidades (hasta 90 km/hora), y recorra grandes distancias (hasta 1,600 m.), lo cual puede dar lugar a su desmenuzamiento.

Por ello, en ocasiones es difícil separar los desprendimientos de los deslizamientos. En los primeros los fenómenos de tracción deben tener importancia predominante y, además, suelen ser de menor volumen.

#### **3.2.1.4 Deslizamiento plano**

Este tipo de deslizamiento se produce a través de superficies de discontinuidad que salen hacia el exterior del macizo o son paralelas al talud. La masa deslizante sufre aproximadamente una translación. La superficie de discontinuidad puede ser un plano de estratificación, de esquistosidad, diaclasa, sobre todo si está rellena de arcilla, etc. Cuando la roca que desliza está muy meteorizada, el terreno que cae, se transforma en una masa pulvurenta. En ocasiones pueden aparecer taludes de fallas de tracción en la zona superior del deslizamiento; ello hace que el bloque que se va a deslizar, quede sujeto sólo por su base, la presión del agua en estos taludes es una causa importante de la ruptura.

En arcillas sobre consolidadas, margas y lutitas, es frecuente que exista una capa alterada superficial, debido en parte a las variaciones estacionales de humedad y temperatura; ello hace que los deslizamientos en taludes naturales, por producirse en el interior de esta capa, menos resistente, sean aproximadamente paralelos al talud. La superficie de deslizamiento suele ser pulimentada y estriada, y en ella se ha producido una orientación de las partículas de arcilla. Medidas realizadas con inclinómetro han demostrado que el movimiento suele consistir en un deslizamiento concentrado en una capa delgada. Deslizamientos de este tipo se pueden producir en pendientes inclinadas tan solo 7 u 8° con la horizontal. Los taludes naturales estables en arcillas sobre consolidadas plásticas, en climas húmedos, suelen formar con la horizontal ángulos inferiores a unos 10°.

En zonas de arcillas expansivas es frecuente que la zona superficial esté debilitada por grietas de retracción. En todos estos casos existe una zona superficial mucho más permeable que el terreno inferior. Ello hace que se forme una capa freática colgada en esta zona, en la que el nivel piezométrico suele ser aproximadamente paralelo a la superficie del terreno y puede coincidir con dicha superficie en épocas de lluvia en climas húmedos. Las líneas de corriente suelen ser paralelas al talud y las fuerzas de filtración contribuyen grandemente a la inestabilidad.

En climas tropicales es frecuente que exista sobre los taludes una capa de suelo residual u coluvial, que puede estar expuesta a deslizamientos a veces hasta de muchos miles de metros cúbicos. Estos deslizamientos suelen estar relacionados con los diversos horizontes originados con el perfil del suelo por la meteorización de la roca. Debajo de la tierra vegetal merece citarse un horizonte con elevada proporción de arcilla que, por esta causa, suele ser impermeable y poco resistente.

La circulación de agua a través de la roca meteorizada puede dar lugar a presiones intersticiales de importancia en el suelo situado encima y, por tanto a deslizamientos. Asimismo, es frecuente el deslizamiento de cuñas de suelo residual a través de taludes fósiles; deslizamientos semejantes se producen en rocas meteorizadas y/o diaclasadas.

Las alternativas de arenas y margas, o de arenas y arcillas, frecuentemente en formaciones de los taludes, son, con frecuencia, inestables por motivos semejantes a los descritos en el párrafo anterior, para los suelos residuales; las capas permeables actúan como canales para el agua y las presiones intersticiales dan lugar a deslizamientos a lo largo del lubricado contacto con la arcilla o marga, por tener éstas menor resistencia al corte. En algunos casos las arenas pueden dar lugar a presiones artesianas en derrumbes arcillosos que las recubren.

En otros casos, la erosión interna en las capas arenosas da lugar a deslizamientos en la arcilla subyacente. En la parte superior de la superficie de deslizamiento, suelen aparecer grietas de tracción en terrenos cohesivos, tanto más profundas cuanto más rígida sea la parte superior en relación con el terreno inferior. Típicamente pueden oscilar entre 0.5 y 3.5 m. En arcilla, pero en rocas, su profundidad puede ser enorme. La aparición de grietas de tracción es, con frecuencia, un aviso de que va a ocurrir un deslizamiento. En grietas suelen venir precedidas de importantes deformaciones tangenciales en el pie del talud; como consecuencia del deslizamiento, se suele producir un hundimiento de la zona superior del talud inestable, y un levantamiento de su pie.

Existen flujos de arcilla de hasta 1,800 metros de longitud, la resistencia de la arcilla en el plano de deslizamiento, suele estar próxima al valor residual. La solifluxión, es un flujo de arcilla típico de climas fríos, la masa puede deslizar por pendientes hasta de 2°.

### **3.2.1.5 Corrimientos provocados por licuefacción**

Las arenas finas y limos, aluviales o procedentes de cenizas o residuos de mineral, pueden formar depósitos, francamente flojos e inestables, especialmente si están formados por granos redondeados y son uniformes. Si están saturados, cualquier perturbación puede provocar unas presiones intersticiales muy elevadas, ya que por ser poco permeables, puede no dar tiempo a que haya drenaje, y conducir a la licuefacción o anulación de las presiones efectivas. En tal caso, la masa se mueve como un fluido viscoso, que puede alcanzar velocidades hasta de 50 km/hr sobre taludes muy llanos.

La causa principal de la licuefacción son los terremotos; sin embargo, la perturbación puede ser ocasionada por otros motivos, un descenso rápido del nivel de agua o simplemente la deformación de la cimentación arcillosa, puede ocasionar la licuefacción de un relleno hidráulico de arena. Los volúmenes movidos sin intervención de terremotos, pueden llegar hasta millones de metros cúbicos, y la pendiente final, puede llegar a ser prácticamente horizontal tras recorrer distancias hasta de 400 metros, pendientes de 15°, pueden verse afectadas por estos fenómenos.

#### **3.2.1.6 Reptación**

Se trata de movimientos lentos a veces tanto como 8 mm/año, que no suponen en muchas ocasiones, rotura del terreno. Algunos de estos movimientos son estacionales. Los deslizamientos suelen venir precedidos de movimientos de reptación, tanto más rápidos cuanto más cerca se está de la rotura. Estos movimientos han oscilado entre 2 cm/año y 46 cm/día.

Merecen citarse los deslizamientos regresivos, que comienzan con un deslizamiento en el pie escarpado de un talud a veces erosionado por una corriente de agua, y se van propagando hacia atrás. Este tipo de deslizamientos se producen en casos como en que encima de una arcilla sobre consolidada existe un estrato de material más duro.

Cuando no existe corriente de agua, el proceso es mucho más lento. Las laderas con fuerte escarpado y pendiente más tendida originada por las margas al pie de este, constituyen una zona muy inestable propensa a los deslizamientos, en los cuales grandes masas se desploman y son transportadas por los materiales deslizantes.

## **4. CASOS REALES**

### **4.1 Casos reales diseñados e investigados por los diferentes tipos de taludes**

#### **4.1.1 Estudio de suelos y geotecnia preliminar para el diseño de la reconstrucción del talud fallado en la carretera Cobán-Alta Verapaz Km. 208**

Se solicitó el estudio de suelos y geotecnia para la determinación de opciones para la reestructuración del talud fallado y dentro del cual se encuentra la carretera Cobán-Alta Verapaz en el Km. 208.

Los datos de éste estudio servirán para efectuar el diseño de la reconstrucción de la carretera.

Por tal motivo, se ha elaborado el presente estudio e informe a la mecánica de suelos del terreno para conocer las características de los suelos, obtener la capacidad portante de los mismos, factor de seguridad y estabilidad del talud, y así poder efectuar los diseños estructurales respectivos.

El estudio tiene los objetivos principales siguientes:

- Determinar la estratigrafía del terreno, así como las características físicas y mecánicas de los estratos respectivos.
- Determinar desplante más seguro y fijar cota de cimentación para obras estructurales auxiliares.
- Determinar posibles asentamientos, deslizamientos, y la capacidad portante de los suelos.
- Estabilidad de taludes y factor de seguridad.

La exploración del subsuelo fue llevada a cabo por medio de perforaciones mecánicas, a profundidades que fueron determinadas de acuerdo a las características del proyecto y al tipo de subsuelo encontrado durante el proceso de exploración.

Con el objeto de definir la secuencia, espesor y extensión de los diferentes estratos constituyentes del subsuelo y de obtener muestras representativas de los materiales componentes de los mismos, de tamaño y condiciones adecuadas para identificación y cuantificación de sus propiedades mecánicas, para lo cual se llevó a cabo un programa de exploración que incluye, ubicación y profundidad de los mismos:

- Ejecución de tres (3), perforaciones, en los puntos estimados más críticos de talud y con una profundidad de dos perforaciones de 40 pies (12.2 metros) y una perforación de 60 pies (18.3 metro). Levantamiento topográfico de 3 perfiles en el área de falla del talud.
- Las muestras obtenidas después de un minucioso examen visual fueron sometidas a ensayos estandarizados que nos permitieron conocer las características mecánicas de los diferentes estratos, así como su debida identificación. Se adjunta al informe un plano de localización de cada una de las perforaciones.
- Durante la operación de muestreo se llevó a cabo en el campo el ensayo de penetración estándar en cada una de las perforaciones, utilizando para el efecto muestreadores de pared divisible tipo "Raymond" de 2 pulgadas de diámetro externo, 1 5/8 pulgadas de diámetro interno, 2 pies de longitud y martinete de 140 libras de peso con caída de 30 pulgadas, accionado por medio de una perforadora mecánica, y con registros estándar para la penetración dinámica según las normas de A.S.T.M. 1586-64T (Standard Penetration test)

- El ensayo fue llevado también en forma continua, aumentando el número de golpes necesarios para la penetración de cada 6 pulgadas, con el objeto de poder determinar con mayor exactitud el espesor y firmeza de cada uno de los estratos.

En los perfiles estratigráficos, en base a una inspección minuciosa de cada una de las muestras, y a los resultados de las pruebas In situ, efectuadas durante el proceso de exploración y al de los ensayos estandarizados por ASTM efectuados a las muestras, se elaboró un perfil estratigráfico detallado, de cada una de las perforaciones, identificando debidamente los materiales constitutivos del subsuelo.

Por medio de los perfiles estratigráficos se puede estimar las características de cada uno de los estratos del subsuelo.

En el terreno donde se efectuaron las perforaciones, se encontraron varios estratos bien identificados de espesor variable dependiendo del área de exploración.

Un primer estrato de arcilla con muy poca grava (café) de un espesor mayor de los 18.29 m. perforados, con un promedio estándar  $N = (19)$ .

La capacidad de carga y desplante mínimo, en el área de la carretera puede considerarse que los suelos de los diferentes estratos están saturados y formados por sedimentación y transporte por medio de viento; la estructura interna de los suelos ha sido rota por la constante sobre saturación debido al régimen constante de las lluvias del lugar y que ha dado lugar a la falla superficial del talud.



## Cimentación

- Para los muros:
  1. Carga admisible 10 Ton/m<sup>2</sup>
  2. Desplante a partir de la superficie del terreno 2.00 metros.
- Presión Activa en muros de contención en voladizo:

$$P_{AE} = 1/2 \sigma H^2 (K_a + 3/4 K_h)$$

Donde:

$P_{AE}$  = Presión activa máxima (Ton/pie<sup>2</sup>)

$\sigma$  = Peso unitario del suelo (115.0 lbs/pie<sup>3</sup>)

$H$  = Altura de la estructura en pies

$K_a$  = Coeficiente de presión activa (0.4059 adimensional)

$K_h$  = Aceleración horizontal del suelo (0.20 g)

Se estima:

$\phi$  = 25 grados

Cohesión = 0 (Ton/pie<sup>2</sup>)

- Para muros que no son en voladizo como en los cambios de plataforma.

La presión dinámica activa máxima para éste caso, se obtendrá aumentando el peso unitario en un 25%.

Para que los asentamientos no sucedan, se recomienda que el valor de la carga obtenido del laboratorio no exceda a la carga indicada de 10T/m<sup>2</sup>, para un factor de seguridad de 3, se espera un asentamiento máximo de 2 cm., y para que los asentamientos diferenciales no sean mayores y no tengan que tomarse en cuenta en el diseño, deberá no sobrepasarse el valor soporte del suelo antes mencionados.

Estabilidad de taludes, en cualquier terreno que no sea horizontal existen una serie de fuerzas que tienden a nivelarlo: fuerzas de gravedad, filtración, presión del agua en la estructura de los suelos, etc. Se oponen a ello la resistencia del terreno, raíces y otras. Cuando en el primer grupo de Fuerzas predomina sobre el segundo, el talud se hace Inestable.

En el talud del terreno, las fallas superficiales ocurrirán por el deslizamiento producido por los esfuerzos de corte, las cargas verticales, repetición de cargas vehiculares las cargas verticales, peso de los suelos y el peso del agua que actúan sobre la zona de falla y que producen los deslizamientos y asentamiento de las arcillas constitutivas del subsuelo.

La filtración del agua es retenida en la estructura de los suelos en los diferentes estratos arcillosos y debido a su baja permeabilidad; la filtración del agua puede en los suelos producir la pérdida de, su consolidación, ocasionando en combinación con las cargas verticales las fallas del talud representado por deslizamientos continuos en todo el talud.

Para este tipo de suelos debe realizarse un estudio técnico de drenajes para poder tener seguridad de que el agua no llegara a los taludes.

Se realizó el estudio de suelos por medio de muestreo de perforaciones mecánicas y laboratorio de materiales y suelos, para la estabilización de taludes se empleó el método de superficie de sección transversal casi circular y a través del cual se originarán los esfuerzos de corte el deslizamiento, así mismo se siguió el método analítico de dovelas para el peso de la masa deslizante.

Las condiciones de estabilidad están dadas por le factor de seguridad que es la relación entre la suma de las fuerzas resistentes dentro de las fuerzas actuantes, o sea:

$$F.S = \frac{\text{Suma de fuerzas resistentes}}{\text{Suma de fuerzas actuantes}} = 1 \text{ condición mínima de estabilidad}$$

Del estudio y por medio del método analítico y gráfico de los taludes se obtuvo los siguientes datos para la sección del perfil 1, 2 y 3 mostradas en el plano que aparece en las figuras.

Tabla I. Talud original 1

Corte	Talud No.	F.S	Estabilidad	Información
1	1	1.10	Estable	Por tratarse de arcillas se toma la siguiente condición: Cohesión = $c = 5,000 \text{ Kg./ m}^2$ Ángulo de fricción $\phi = 0^\circ$ El análisis de seguridad se hizo trazando cuatro círculos para cada talud
2	2	0.80	Inestable	
3	3	0.72	Inestable	

El talud esta formado geológicamente por arcillas; arcillas con bajo contenido de grava y arcillas con bajos porcentajes de limo, el talud presenta características de inestabilidad en el momento actual al deslizamiento y a sus condiciones físico-mecánicas.

#### **4.1.2 Estudio geotécnico preliminar para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes**

Se solicitó el estudio de Suelos para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes a construirse en el terreno ubicado en la lotificación Avance de Serramonte, Km. 18 a San Juan Sacatepéquez.

Los datos de éste estudio servirán para averiguar el factor de seguridad del estudio de los taludes.

Por tal motivo, se ha elaborado el presente estudio e informe a la mecánica de suelos del terreno para conocer las características e los suelos, obtener la capacidad portante de los mismos y así poder efectuar los diseños estructurales respectivos.

El estudio tiene los objetivos principales siguientes:

- Determinar la estratigrafía del terreno, así como las características físicas y mecánicas de los estratos respectivos.
- Determinar desplante más seguro y fijar cota de cimentación.
- Determinar el factor de seguridad de los taludes.
- Determinar posibles asentamientos, deslizamientos, y la capacidad portante de los suelos.
- Dar recomendaciones de orden general.

La exploración del subsuelo fue llevada a cabo por medio de perforaciones mecánicas, a profundidades que fueron determinadas de acuerdo a las características del proyecto y al tipo de subsuelo encontrado durante el proceso de exploración.

Con el objeto de definir la secuencia, espesor y extensión de los diferentes estratos constituyentes del subsuelo y de obtener muestras representativas de los materiales componentes de los mismos, de tamaño y condiciones adecuadas para identificación y cuantificación de sus propiedades mecánicas, para lo cual se llevó a cabo un programa de exploración que incluye, ubicación y profundidad de los mismos:

- Ejecución de tres (5), perforaciones, en los puntos estimados más críticos de talud y con una profundidad de 30 pies (10 metros).
- Las muestras obtenidas después de un minucioso examen visual, fueron sometidas a ensayos estandarizados que nos permitieron conocer las características mecánicas de los diferentes estratos, así como su debida identificación. Se adjunta al informe un plano de localización de cada una de las perforaciones.
- Durante la operación de muestreo se llevó a cabo en el campo el ensayo de penetración estándar en cada una de las perforaciones, utilizando para el efecto muestreadores de pared divisible tipo "Raymond" de 2 pulgadas de diámetro externo, 1 5/8 pulgadas de diámetro interno, 2 pies de longitud y martinete de 140 libras de peso con caída de 30 pulgadas, accionado por medio de una perforadora mecánica, y con registros estándar para la penetración dinámica según las normas de A.S.T.M. 1586-64T (Standard Penetration test)
- El ensayo fue llevado también en forma continua, aumentando el número de golpes necesarios para la penetración de cada 6 pulgadas, con el objeto de poder determinar con mayor exactitud el espesor y firmeza de cada uno de los estratos.

En base a una inspección minuciosa de cada una de las muestras, y a los resultados de las pruebas In situ efectuadas durante el proceso de exploración y al de los ensayos estandarizados por ASTM, efectuados a las muestras, se elaboró un perfil estratigráfico detallado, de cada una de las perforaciones, identificando debidamente los materiales constitutivos del subsuelo.

La capacidad de carga, considerando las condiciones del subsuelo en relación con las características estructurales de la obra proyectada y ensayos efectuados, se calcula para los diferentes estratos, su capacidad de carga máxima por falla por deslizamiento de acuerdo a los distintos anchos de cimientos estimados y a sus distintas profundidades.

Al valor de carga máxima por falla total por deslizamiento se les aplicó un factor de seguridad de 3 para obtener el valor de capacidad de carga admisible para poder cimentar en forma estable la estructura.

1. Capacidad de carga máxima:  $q_c = 15 \text{ Ton/m}^2$

Para cimiento cuadrado

Usar ecuación:  $q_c = 15 \times B + D \mu \text{ (ton/m}^2\text{)}$

Para cimiento corrido

Usar ecuación:  $q_c = 11 \times B + D \mu \text{ (ton/m}^2\text{)}$

Donde:

B = Ancho de cimiento en metros

D = Peso unitario del suelo (115.0 lbs/pie<sup>3</sup>)

$\mu$  = Densidad de la compactación sobre el cimiento

(Rango de  $\mu = 0.98 - 1.4 \text{ Ton/m}^2$ )

Desplante : 2.50 metros.

Asentamientos. Considerando las características de los suelos y el resultado del análisis a los estratos, se recomienda cimentar a una profundidad de 2.50 m. bajo la rasante natural y utilizando como valor soporte del suelo una capacidad máxima de 15.0 Ton/m<sup>2</sup>, y se espera un asentamiento máximo de 2 cm. Asentamientos que podrían ocurrir durante la construcción y serán detestados inmediatamente, y su solución será inmediata.

Estabilidad de taludes. Los daños producidos por deslizamiento de los taludes, sobre todo en tiempo de lluvia y producidas por las fuerzas de filtración suelen ser críticos en la conformación geológica de un talud; la erosión en general, en arenas, limos, y sobre todo los fenómenos de inestabilidad de taludes tienden a suavizar dichas pendientes por el acomodamiento de los suelos desplazados y depositados conformando el perfil del talud; en nuestro caso la inestabilidad será producida por deslizamientos de la masa de los suelos en el talud cuando se exceda la resistencia al corte a lo largo de la zona de falla (superficie del tercer estrato). La erosión superficial causa inestabilidad en los taludes, sin embargo, en arenas, limos forman con el tiempo un ángulo que coincide con el ángulo de rozamiento; se estima que pendientes estables para arenas puede oscilar en casos típicos entre 30° y 36°.

Para el caso de los taludes de los suelos originales de la urbanización los deslizamientos pueden originarse por la masa de los suelos de los estratos I y II a través de la superficie de falla que lo constituiría el III estrato ocasionado por las fuerzas de filtración producidas por el agua de lluvia debido a la alta permeabilidad de los estratos I y II y a la posible erosión a la que están expuestos éstos estratos.

Al cortarse los taludes ya no existe la masa de los suelos deslizante y quedaría solamente el macizo sujeto a las cargas verticales que actúan sobre él y que pueden ocasionar fallas por desprendimiento de la cresta del talud, por lo que se tendrá que determinar la distancia crítica a partir del borde del talud hasta donde puedan empezar a construir las edificaciones para que éstas fallas no se produzcan.

Los factores de seguridad fueron calculados para el talud original y para el talud cortado.

La deforestación del área de la urbanización donde será mayor la evaporación, y la estabilización de los taludes estructurales con cemento Portland reducirá la humedad en los vacíos de los suelos lo que dará seguridad a la estabilidad de los taludes actuales.

Se realizó el estudio de suelos por medio de muestreo de perforaciones mecánicas y laboratorio de materiales y suelos, para la estabilización de taludes se empleó el método de superficie de sección transversal casi circular y a través del cual se originarán los esfuerzos de corte el deslizamiento, así mismo se siguió el método analítico de dovelas para el peso de la masa deslizante.

Las condiciones de estabilidad están dadas por el factor de seguridad que es la relación entre la suma de las fuerzas resistentes dentro de las fuerzas actuantes, o sea:

$$F.S = \frac{\text{Suma de fuerzas resistentes}}{\text{Suma de fuerzas actuantes}} = 1 \text{ condición mínima de estabilidad}$$

Del estudio y por medio del método analítico y gráfico de los taludes se obtuvo los siguientes datos:



Tabla II. Talud original 2

Corte	Talud No.	F.S	Estabilidad	Información
1	1	1.3	Estable	Por tratarse de arenas, limos se toma la siguiente condición: Cohesión = $c = 0$ Ángulo de fricción $\phi = 34^\circ$ El análisis de seguridad se hizo trazando cuatro círculos para cada talud
6	6	0.7	Inestable	
9	9	0.5	Inestable	
13	13	1.0	Estable	
3	21B-88	1.0	Estable	

El talud No.1 es un talud formado geológicamente estable de acuerdo a sus condiciones físico-mecánicas. Los taludes No.6 y 9 han surgido deslizamientos y erosión; el talud No. 8 está casi formado sufriendo erosión en su estrato inferior (arena suelta).

El talud de sección 21B-88 ha sufrido erosión y deslizamiento o no se formó geológicamente.

Tabla III. Talud original 3

Corte	Talud No.	F.S	Estabilidad	Información
1	1	1.5	Estable	Por tratarse de arenas, limos se toma la siguiente condición: Cohesión = $c = 0$ Ángulo de fricción $\phi = 34^\circ$ El análisis de seguridad se hizo trazando cuatro círculos para cada talud
6	6	1.0	Estable	

Y los siguientes datos gráficos:

Plano	H	DH	Radio	$\beta(0)$	$\phi(0)$
1	15.4	17.1	23	39	34
6	14	16	24.4	73	34
9	24.5	24.5	28.6	72	34
13	24.3	26.4	27	32	34

La distancia mínima del borde del talud a la construcción será de 10 metros.

1. - El terreno natural y original está formado por el macizo plano y el talud con suelos orgánicos, arenas de compacidad media, limos de compacidad elevada y con altos valores de consolidación, producida por el tiempo y que le da capacidades de carga promedio de 15.0 T/m, en los estratos inferiores se repite la formación de los estratos con suelos arenosos, limos, etc.

Los dos estratos superiores tienen alta permeabilidad; el tercer estrato es impermeable, lo que hace que el agua infiltrada corra por el plano de unión del segundo y tercer estrato. El debilitamiento de la consolidación, por erosión y las fuerzas del agua infiltrada pueden producir la inestabilidad del talud por deslizamiento de los suelos sobre el plano del tercer talud; en el tipo de los suelos naturales como el de la urbanización la filtración se reduce en alto porcentaje por la forestación natural de los suelos evitando también la erosión; para los taludes expuestos los trabajos estructurales se estabilizarán con cemento Portland o betunes asfálticas que evitan las fuerzas de filtración y erosión que provocan la inestabilidad del talud; por procesos de tiempo en la consolidación de los suelos un talud formado por arenas, limos llega a tener un ángulo de inclinación igual al ángulo de fricción interna del talud.

Para los taludes cortados mecánicamente a 90° las cargas de deslizamiento que provocan la inestabilidad del talud desaparecen y solo queda el macizo cuya falla sólo se puede producir por las cargas verticales que actúan sobre él, y también la erosión puede producir falla; se evita la inestabilidad del talud determinando la distancia del borde del talud a la estructura a construirse y estabilizando con cemento Portland, o betún asfáltico las superficies expuestas.

En páginas anteriores se dan los factores de seguridad determinados para los diferentes taludes, así como la distancia mínima a que debe construirse las edificaciones, a partir del borde del talud.

De lo anterior podemos indicar lo siguiente:

- Se podrán construir en el plano del macizo conservando una distancia mínima de 10 metros entre la cresta del talud y la construcción sin que se perturbe el factor de seguridad con deslizamientos y esfuerzo de corte.
- Para construcciones mayores es necesario hacer estudios complementarios.
- Los taludes han tenido pequeñas fallas por deslizamiento y esfuerzo de corte, pero no han causado perturbaciones al talud del macizo en general, esto en parte por su consolidación y por la protección que la naturaleza les ha proporcionado.
- Los taludes los cuales fueron cortados y ya no existe la masa de los suelos deslizante quedando solamente el macizo sujeto a las cargas verticales que actúan sobre él y que pueden ocasionar fallas por desprendimiento de la cresta del talud.

## 4.2 Soluciones

### 4.2.1 Soluciones para el diseño de la reconstrucción del talud fallado, ubicado en la carretera Cobán-Alta Verapaz Km. 208

1. Se puede cimentar sobre el terreno estudiado siempre y cuando se utilice lo aquí indicado:
  - Capacidad de carga máxima del suelo para los muros  $q_c = 10.0 \text{ T/m}^2$ .
  - Desplante mínimo para cimentación a partir de la superficie del suelo original: 2.00 metros.
  - Para condición de sismo, considerar la Zona II y el valor de  $Z = 0.35$  de la aceleración de la gravedad.
  - El coeficiente del lugar  $S = 1.20$
  - El factor de seguridad es de 3
  - Factor de seguridad del talud: 1.25
  
6. En toda construcción deberá removerse y compactarse controladamente la subrasante como mínimo 30 cm. de espesor de suelo. Esto con el objeto de eliminar la capa de material orgánico, piedras, materiales A-7 y A-8, etc.
  
7. De requerirse, los rellenos deberán efectuarse preferentemente con selecto y/o grava con arena de río y limo de índice plástico  $\leq 6$ , y con un valor soporte de ABR.  $\geq 30$  y con una compactación de 100.0% determinado por medio del proctor estándar (AASHO T-99) a la humedad óptima. La compactación en el caso de las terrazas o plataformas de construcción deberán efectuarse por medio de una compactación mecánica adecuada.

8. La subrasante deberá reacondicionarse totalmente 0.30 metros de espesor y controlarse con supervisión.
9. Se deberá hacer un estudio completo de drenaje con el fin de evitar que el agua llegue al área de la carretera donde existe la falla del talud.
10. Todos los pasos para la reestructuración de la falla deben tener continuidad.

#### **4.2.2 Soluciones para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes de la lotificación**

1. De acuerdo a las características de los suelos antes descritos, se puede determinar que la cota de cimentación recomendable se puede fijar debajo de 2.50 metros de la cota actual de superficie del suelo y la capacidad portante promedio del suelo es de 15 Ton/m<sup>2</sup> a la cota de cimentación dada, para un factor de seguridad de 3.
2. Se puede cimentar sobre el terreno estudiado siempre y cuando se utilice lo aquí indicado:

Capacidad de carga máxima:  $q_c = 15 \text{ Ton/m}^2$

- Para cimiento cuadrado

Usar ecuación:  $q_c = 15 \times B + D \mu \text{ (ton/ m}^2\text{)}$

- Para cimiento corrido

Usar ecuación:  $q_c = 11 \times B + D \mu \text{ (ton/ m}^2\text{)}$

Desplante mínimo para cimentación = 2.50 m. por debajo de la cota natural nivelada.

Para condición de sismo, considerar la Zona II y el valor  $Z = 0.35$  de la aceleración de la gravedad.

El coeficiente del lugar  $S = 1.20$

El factor de seguridad es de 3

3. En toda construcción deberá removerse y compactarse controladamente la subrasante como mínimo 30 cm. de espesor del suelo. Esto con el objeto de eliminar la capa de material orgánico, piedras, materiales A-7 y A-8, etc.
  
4. De requerirse, los rellenos deberán efectuarse preferentemente con selecto y/o grava con arena de río y limo de índice plástico  $\leq 6$ , y con un valor soporte de C.B.R.  $\geq 30$  y con una compactación de 100.0% determinado por medio del proctor estándar (AASHO T-99) a la humedad óptima. La compactación en el caso de las terrazas o plataformas de construcción deberán efectuarse por medio de una compactación mecánica adecuada.

## **5. LABORATORIOS**

### **5.1 Ensayos de laboratorio**

#### **5.1.1 Gráficas de ensayos de laboratorio del talud fallado**







**5.1.2 Gráficas de ensayos de laboratorio para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes**









## **5.2 Análisis de resultados**

### **5.2.1 Análisis de resultados del estudio de suelos y geotecnia preliminar para el diseño de la reconstrucción del talud fallado**

1. Considerando todos los datos obtenidos, se puede determinar que el terreno está ubicado sobre una zona de depósitos meteorizados e intemperizados seguidos de un relleno de materiales varios predominando arcillas, arcillas con porcentajes bajos de grava (2%); arcillas con porcentajes bajos de limo (4%).
2. Se debe considerar que la zona estudiada se encuentra sobre una región sísmica denominada tipo Zona III y las edificaciones son de primer orden.
3. Se deberá considerar una aceleración sísmica de 0.35 de la gravedad para las condiciones de diseño imperantes.
- 4.- Reconocimiento técnico

La falla en la carretera es debido al deslizamiento superficial del talud del cerro que corta la carretera hacia Cobán y el que se ha originado por el aumento del peso volumétrico de los suelos que forman su estructura, arcillas, que se encuentran totalmente saturadas por la precipitación pluvial continua en el área, la deforestación, la baja permeabilidad que hace que el agua se retenga en la estructura de los suelos, una evaporación baja. Es probable también que la humedad llegue a los diferentes estratos por capilaridad procedente del nivel freático que debe estar en plano horizontal contenido entre los siguanes, se debe considerar al agua como el factor principal de la falla del talud.

## 5. - Reestructuración de la falla

Deberá volverse al reconstruir el talud con una obra estructural de gaviones y contra gaviones para evitar el deslizamiento de los primeros, rellenos de suelo cemento compactado con supervisión. Deberá ponerse un muro armado de contención en la parte superior dónde terminen los gaviones, de acuerdo al diseño, y que confine el tablero horizontal de la carretera; otro muro armado al pie del talud de los gaviones; los dos muros deberán tener drenaje francés y un estudio auxiliar de drenaje que contenga lavaderos que conduzcan la escorrentía al fondo de la quebrada. El drenaje auxiliar deberá considerar tubería perforada de 6" de diámetro metida dentro de los suelos del área del talud, arriba y debajo de la carretera que capten un porcentaje del agua que existe en la estructura de los suelos y depositarla en las cunetas, cajas, lavaderos de un drenaje auxiliar diseñado; todas las áreas deforestadas dentro del área de derrumbe, deberán ser de nuevo reforestadas o cubiertas con suelo cemento.

## 6. - Segunda opción

Se podrá usar también, sustituyendo a los gaviones, una estructuración de tierra armada en terrazas de 80 centímetros y cuya metodología dentro de muchas variantes técnicas, es la de restituir las fallas de los taludes derrumbados; también podrá utilizarse malla geotextil en lugar de suelo cemento como elemento estructural para control de la humedad de los suelos constitutivos del talud.















### **5.2.2 Análisis de resultados del estudio geotécnico preliminar para la determinación del valor soporte y estabilidad de taludes**

1. Las construcciones se podrán construir en el plano del macizo a partir de una distancia mínima de 10 metros entre la cresta del talud y la construcción, condiciones que no alteran el factor de seguridad de la estabilidad de los taludes.
2. Los taludes deben protegerse con vegetación, o procesos de impermeabilización evitando que el agua se filtre en el subsuelo.
3. Debido al alto coeficiente de permeabilidad de las arenas, limos, debe evitarse que el agua se infiltre en ella, tanto en el plano del macizo como en el talud mismo para que no aumenten los esfuerzos a deslizamiento y al corte y puedan producir fallas.
4. Si los taludes tuvieran que perturbarse mecánicamente deberán ponerse gaviones opuestos a la pendiente del talud para evitar los deslizamientos.
5. Deberá evitarse la escorrentía sobre los taludes desprovistas de protección, así las filtraciones provenientes de la red de agua de la urbanización debido, y a la alta permeabilidad de las arenas, no forman las cargas adicionales que podrían originar deslizamientos.
6. Todo el drenaje, para evitar escorrentías extras y filtraciones, debe estar interconectado al drenaje general de la urbanización.
7. Evaporación, que será mayor por la deforestación.











## CONCLUSIONES

1. Las características de una ladera o talud son las que determinan las condiciones geológicas propicias para la generación de deslizamientos. Pero hay que tomar en cuenta que estos deslizamientos pueden ocurrir por otros factores, los cuales pueden ser naturales como la lluvia, las heladas, sismos etc. Existen causas artificiales como producto de la actividad humana que de una u otra modifica la estabilidad de las laderas.
2. La filtración del agua es retenida en la estructura de los suelos en los diferentes estratos arcillosos y debido a su baja permeabilidad, puede producir en los suelos la pérdida de su consolidación, ocasionando en combinación con las cargas verticales, las fallas del talud representado por deslizamientos continuos en todo el talud.
3. Los taludes fueron cortados y ya no existe la masa de los suelos deslizante. Queda solamente el macizo sujeto a las cargas verticales que actúan sobre él, y que pueden ocasionar fallas por desprendimiento de la cresta del talud.
4. Debido a que la República de Guatemala se encuentra localizada en una zona tectónicamente activa, se define como una zona potencialmente vulnerable a los deslizamientos masivos, así también a la reactivación de las redes secundarias de fallas y fracturas, por lo que bajo estas condiciones pueden esperarse deslizamientos de importancia.

5. Para poder estabilizar un talud que tenga mucha altura, pendiente muy pronunciada y aparte de esto, está expuesto a las condiciones ambientales y geológicas, se hace imperativa la necesidad de hacer un diseño de plataformas, utilizando para ello datos topográficos, los cuales permitirán dejar taludes en mejores condiciones.

## RECOMENDACIONES

1. Para evitar los asentamientos, se recomienda que el valor de la carga obtenido del laboratorio no exceda la carga indicada en el diseño de la estructura a construir.
2. En toda construcción deberá removerse y compactarse como mínimo 20 cm. de espesor del suelo, esto con el objeto de eliminar la capa vegetal, piedras, materiales A-7 y A-8, etc.
3. En Guatemala, para la condición de sismicidad, se debe considerar 0.35 como factor de la aceleración de la gravedad.
4. De requerirse, los rellenos deberán efectuarse preferentemente con selecto y/o grava con arena de río y limo de índice plástico  $< 6$ , y con un valor soporte de C.B.R.  $> 30$  y con una compactación del 100% determinado por medio del proctor estándar (ASTHO T-99) a la humedad óptima. La compactación en el caso de las terrazas o plataformas de construcción, deberán efectuarse por medio de una compactación mecánica adecuada.
5. Considerando que en un estudio basado en inspecciones oculares y superficiales, constituyen estudios preliminares, por lo que se requiere de investigaciones más científicas como algunos estudios geotécnicos para poder tener resultados más precisos.

## BIBLIOGRAFÍA

ANCKERMANN ÁLVAREZ, Enrique. Manual para laboratoristas de suelos en construcción de carreteras. Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1969, 232 pág.

CONCYT, **Conferencia del Programa de estabilidad de taludes y laderas**. Colegio de Ingenieros de Guatemala, 2001.

CRESPO VILLALAZ, Carlos. **Mecánica de suelos y cimentaciones** 4da. Ed. México D.F.: Editorial Limusa. 1995.

ESTRADA, G. Inestabilidad de taludes en el valle de Guatemala. Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1989.

FREDERICK S., Merritt. *et.al.* **Manual del ingeniero civil** 4ta. Ed. México D.F.: Editorial Ofgloma. s.f.

PRADO MONTENEGRO, Enrique. Principios Básicos en la Estabilidad de Taludes. Tesis de graduación de Ingeniero Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 1971.

SOWERS, George F. **Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones** 2da. Ed. México D.F.: Editorial Limusa. s.f. 677 pág.

TAYLOR, Donald W. **Principios fundamentales de la mecánica de suelos** 2da. Ed. México D.F.: Compañía Editorial Continental. s.f. 203-220.