

que ayudan a identificar y reconocer áreas potenciales de fallas, lo cual permite el tratamiento del talud para así eliminar o reducir a un mínimo el riesgo de falla.

Una clasificación de fallas de taludes está dada en la Tabla 3.1, la cual a sido adaptada de Hunt (1984). Los principales factores que influyen en la clasificación del tipo de fallas son:

- a. forma del movimiento
- b. forma de la superficie de falla
- c. coherencia de la masa fallada
- d. causa de la falla
- e. desplazamiento de la masa
- f. tipo de material
- g. tasa de movimiento

Tabla 3.1. Clasificación de fallas

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

3.2.1- Caídas o desprendimientos

Son fallas repentinas de taludes verticales o casi verticales en las cuales se produce el desprendimiento de un bloque o múltiples bloques, los cuales descienden en caída libre (FIGURA 3.1). El volcamiento de bloques de rocas, generalmente desencadena un desprendimiento (FIGURA 3.2).

Figura 3.1 Desprendimiento de bloques

Figura 3.2 Volcamiento de bloques

En suelos, los desprendimientos son causados por socavaciones de taludes debido a la acción de la erosión de quebradas o del hombre. En macizos rocosos son causados por socavación debido a la erosión, un incremento de la presión debido a la presencia de agua en las diaclasas y/o meteorización a lo largo de las diaclasas en combinación con fuerzas de filtración. En algunos casos los desprendimientos son el resultado de meteorización diferencial.

Los desprendimientos o caídas son relevantes desde el punto de vista ingenieril debido a que se trata de la caída de un bloque o varios bloques, los cuales pueden ocasionar daños a estructuras o a otros taludes que se encuentren en la parte inferior pudiendo causar una destrucción masiva.

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

3.2.2.- Derrumbes

Los derrumbes se encuentran asociados a fallas que envuelven suelos y rocas, y en general se subdividen en rotacionales y planares basado en la forma de la superficie de falla.

3.2.2.1.- Derrumbes planares

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

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

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

Figura 3.3 Deslizamiento planar en macizo rocoso

Figura 3.4 Deslizamiento en forma de cuña Los deslizamientos planares son característicos en:

- Rocas sedimentarias que tengan un buzamiento similar o menor a la inclinación de la cara del talud;
- Discontinuidades tales como fallas, foliaciones, o diaclasas formando largos y continuos planos de debilidad que interceptan la superficie del talud;
- Intersección de diaclasas o discontinuidades que dan como resultado la falla de un bloque en forma de cuña.

Foto 3.1 Buzamiento desfavorable en esquisto micáceo meteorizado

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

3.2.2.2.- Derrumbes rotacionales

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

Figura 3.5. Derrumbe rotacional

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

En rocas, los deslizamientos rotacionales son comunes en lutitas marinas y otras rocas blandas, así como también en rocas sedimentarias altamente fracturadas con algunos planos de debilidad. En suelos, los deslizamientos rotacionales son comunes en depósitos de suelos cohesivos de espesores relativamente importantes, en los cuales no existan planos con marcadas debilidades que causen deslizamientos planares.

En general, la profundidad de la superficie de falla depende de la geología. En arcillas blandas a medias y depósitos de origen marino, la profundidad de la superficie de falla tiende a ser importante. En suelos residuales, la profundidad de la superficie de falla puede variar entre profunda a superficial, dependiendo del perfil de meteorización y el incremento de resistencia con la profundidad. En depósitos coluviales, la profundidad de la superficie de falla tiende a ser superficial.

En las etapas tempranas del deslizamiento se comienzan a formar grietas de tensión. Después de la falla parcial, se generan una serie de pequeños hundimientos y escarpes. Después de la falla total, en la superficie se pueden apreciar varios escarpes además de grietas de tensión concéntricas y profundas así como también una gran masa de material incoherente al pie del talud.

3.2.2.3.- Desparramamiento lateral y falla progresiva

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

Figura 3.6. Desparramamiento lateral

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

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

3.2.2.4.- Deslizamiento de escombros

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

3.2.3.- Avalanchas

Las avalanchas son el movimiento rápido de escombros de suelo y roca, el cual puede o no comenzar con la ruptura a lo largo de una superficie de falla. Toda la vegetación, y el suelo y la roca suelta puede ser arrastrado. Las principales causas de avalanchas son: las altas fuerzas de filtración, alta pluviosidad, derretimiento de nieve (Nevado del Ruiz), sismos y cedencia gradual de los estratos de roca. Las avalanchas ocurren de manera brusca sin previo aviso y generalmente son impredecibles. Los efectos pueden ser desastrosos pudiendo sepultar extensas áreas al pie del talud.

Figura 3.7 Deslizamiento de escombros

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

3.2.4.- Flujo de escombros

Este tipo de falla es similar a las avalanchas a excepción de que la cantidad de agua es mayor, lo cual trae como consecuencia que la masa fluya como lodo. La principal causa es el aporte de grandes lluvias y material suelto en la superficie.

Figura 3.8 Flujo de escombros

3.2.5.- Repteo

El repteo consiste en un lento e imperceptible movimiento o deformación del material de un talud a bajos niveles de esfuerzos, lo cual generalmente sólo afecta a las porciones más superficiales del talud aunque también puede afectar a porciones profundas en aquellos casos donde exista la presencia de un estrato poco resistente. El repteo es el resultado de la acción de fuerzas de filtración o gravitacionales y es un indicativo de condiciones favorables para el deslizamiento.

El repteo es característico en materiales cohesivos y rocas blandas como: lutitas y sales, en taludes moderadamente empinados a empinados. Los rasgos característicos del repteo son: la presencia de crestas paralelas y transversales a la máxima pendiente del talud, postes de cerca inclinados, troncos de árboles inclinados y rectos indicativos de movimientos recientes y troncos de árboles inclinados doblados, indicando un movimiento viejo y continuo.

3.3.- Factores influyentes en la inestabilidad de taludes

3.3.1.- Antecedentes históricos

Los deslizamientos en taludes ocurren de muchas maneras y existe cierto grado de incertidumbre en la capacidad de predicción. Sin embargo, el conocimiento de la ocurrencia de deslizamientos en el pasado en el área de interés constituye un buen punto de partida para la detección y evaluación de potenciales deslizamientos en el futuro. En general, las áreas donde estos fenómenos ya han ocurrido en el pasado son altamente susceptibles a que los mismos se repitan.

Entre las fuentes de información para conocer sobre deslizamientos en el pasado, están: reseñas de deslizamientos publicados en periódicos locales, revistas nacionales o internacionales especializadas en el tema, mapas de zonificación de casos ocurridos de inestabilidad geológica, inventarios de riesgos geológicos, etc.

No es posible conseguir en todos los casos, documentación escrita de casos previos de deslizamientos, por lo que la información de los vecinos del sector -si los hay- constituye generalmente una valiosa fuente de información. El tipo de información solicitada a los vecinos sería la descripción de deslizamientos previos en el área, el comportamiento de los

taludes durante el período de lluvias, comportamiento durante eventos sísmicos, presencia de antiguas lagunas que se hayan secado, presencia de grietas en construcciones de la zona, grietas en el terreno, inclinación de postes, cercas o árboles con deformaciones, etc.

3.3.2.- Geología de la región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso de modificación es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen unos de los mecanismos de modificación (Schuster and Krizek, 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial de deslizamiento de taludes.

A nivel regional, la geología controla los aspectos genéticos del relieve y la topografía de un área lo cual permite estimar su susceptibilidad al movimiento. En general, los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas. Sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieves ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves y menos comunes en otros. Una breve descripción de las características de estos relieves se incluyen a continuación.

Taludes escarpados

En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico (ver Foto 3.2). Sin embargo, la causa más común de un gran número de derrumbes que ocurren en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca subyacente y por lo tanto se encuentran en un balance delicado. Es por esto que, factores como una fuerte lluvia o un corte al pie del talud, pueden disparar el deslizamiento de la masa suprayacente.

Foto 3.2. Deformación de una tubería de 60" de diámetro por deslizamiento producido por corte al pie del talud

Acantilados y bancos bajo la acción de corrientes de quebradas

En acantilados y bancos objeto de ataque por corrientes de quebradas los deslizamientos son comunes. Si el banco está constituido por suelos o materiales no consolidados, el punto de deslizamiento más débil está ubicado en el máximo punto de curvatura de la quebrada y es en este punto donde se recibe el mayor impacto del agua. En áreas de afloramiento de roca, el punto de máxima curvatura es generalmente roca dura y los puntos de roca débil se encuentran aguas arriba o aguas abajo de este punto.

Áreas de concentración de drenaje y filtración

Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Filtraciones con el subsecuente deslizamiento es probable que ocurra en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación ó depresiones con agua estancada. La importancia de reconocer el peligro potencial en áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas, necesita especial énfasis. Extensa experiencia de campo ha comprobado repetidamente que dentro de un área inestable

una de las secciones mas peligrosas es la parte baja de la línea divisoria de aguas a través de la cual el agua superficial se infiltra de los puntos altos a los bajos al pie de la quebrada. El reconocimiento de la filtración es ayudado por la identificación de canales cerca de la superficie, áreas húmedas, vegetación alta en el talud. El delineamiento del patrón de drenaje es especialmente importante en la planificación de una construcción nueva.

Areas de Terreno Ondulado

La presencia de terreno ondulado (pequeñas elevaciones ó montículos) cuyas características son inconsistentes con aquellas de los taludes generales del área y presentan escarpas en las elevaciones altas son generalmente indicadores de un deslizamiento antiguo. Una vez que se encuentra un deslizamiento antiguo, sirve como advertencia de que el área en general ha sido inestable en el pasado y por lo tanto nuevas perturbaciones pueden re activar el movimiento.

Areas de Concentración de Fracturas

El movimiento de taludes puede estar estructuralmente controlado por superficies o planos de debilidad tales como fallas, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales las cuales pueden actuar independientemente una de la otra. Por lo tanto, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo sino una serie de bloques individuales. Estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación lo cual debilita los bloques y además reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, debe hacerse una cuidadosa búsqueda para ubicar las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando estas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques lo cual lo hace mas inestable.

3.3.3.- Topografía y estabilidad

Los mapas de topografía representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos. Algunas veces, grandes áreas de deslizamiento se pueden identificar en mapas topográficos. La identificación de algunos deslizamientos se puede llevar a cabo mediante la identificación de las siguientes características en los mapas topográficos.

1. Expresiones topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y características de flujo en la parte baja;
1. Curvas de nivel onduladas, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas;
2. Movimientos menores o irregularidades en ubicaciones tales como: zonas de pendientes empinadas, acantilados o bancos, áreas de concentración de drenaje etc.

El potencial para la identificación de deslizamientos en mapas topográficos depende de la escala y del intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

Efecto de la resistencia del suelo y la pendiente del talud

Como ya se ha mencionado antes y se explica con más detalle en la Sección 3.5.3 de este trabajo, el suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra, por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera es también llamada condición drenada o a largo plazo, y la segunda, condición no drenada, o a corto plazo.

En esta sección se muestran los resultados del análisis de estabilidad utilizando el método simplificado de Bishop realizado para suelos homogéneos usando estos dos comportamientos del suelo para diferentes situaciones, tomando en cuenta la altura del talud, las acciones sísmicas (ó no) y la presencia de agua (ó no). La Tabla 3.3, muestra los diferentes casos estudiados en este trabajo.

Tabla 3.3. Casos estudiados en la evaluación de estabilidad

CASO	TIPO DE GRANULAR COHESIVO	SUELO	NF $r_u = 0.4$	accion sismica		ALTURA 5m 10m 20m		figura
				0.15g	0.30g			
1	4						4	3.9a
2	4		4				4	3.9a
3	4			4			4	3.9b
4	4		4	4			4	3.9b
5	4				4		4	3.9c
6	4		4		4		4	3.9c
7		4		4	4	4		3.10a
8		4		4	4		4	3.10b
9		4		4	4		4	3.10c

Los casos estudiados anotados en la tabla anterior, generaron 6 figuras simplificadas que brindan información preliminar, acerca de la estabilidad de taludes con comportamiento granular y con comportamiento cohesivo.

Suelos con comportamiento granular

Cada una de las primeras tres figuras consiste de 4 curvas que definen sectores de estabilidad para los casos seco (trazo continuo) y de alto grado de saturación (trazo punteado). Estos sectores de estabilidad fueron basados en el criterio del factor de seguridad (FS). El primer sector, ubicado debajo de las curvas de $FS = 1.2$ generadas, corresponde a aquellas combinaciones de la resistencia del suelo con la pendiente del talud, que puedan originar situaciones de inestabilidad. La resistencia del suelo en este caso, viene dada por el ángulo de fricción del suelo, f . El segundo sector, ubicado entre las curvas de $FS = 1.2$ y 1.5 , corresponde a aquellas situaciones en las que se debe realizar un estudio

más detallado, incorporando toda la información que se tenga del suelo. El tercer y último sector de estas figuras, corresponde a aquellos casos que se consideran con un peligro de inestabilidad bajo. La a toma en cuenta el caso estático y las y los casos dinámicos con aceleraciones máximas, $A_0 = 0.15g$ y $0.30g$ respectivamente. Para todos los casos anteriores, se utilizó un talud con una altura de 20 metros.

Suelos con comportamiento cohesivo

La muestra los análisis simplificados para suelos con comportamiento cohesivo. Dado que en este tipo de suelos, la altura del talud es un parámetro de relevancia, éste fue incorporado en el análisis, generándose así, las tres gráficas mencionadas arriba. Al ser el suelo puramente cohesivo, la variación del parámetro de resistencia no drenada, S_u , es directamente proporcional al factor de seguridad y por lo tanto se decidió realizar el análisis para una resistencia de 1 kg/cm^2 . El factor de seguridad obtenido podrá entonces ser modificado multiplicándolo por un factor igual al que haya entre la resistencia del suelo en estudio y el utilizado para realizar las figuras de este trabajo.

Ejemplo: Dado un corte reciente con inclinación de 30^0 de un talud arcilloso de 5 metros de altura y resistencia no drenada estimada de 0.2 kg/cm^2 , evaluar su estabilidad. La figura a utilizar deberá ser la de la altura de 5 metros, es decir, la a. De ésta solución se obtiene el valor de $FS = 6.35$, pero como la resistencia es 5 veces menor a la utilizada en la generación de las curvas, el FS realmente estimado para este caso será de $6.35/5 = 1.27$. Siguiendo el criterio utilizado en el caso de suelo con comportamiento granular, sería recomendable la realización de un estudio más detallado para este caso, ya que el FS hallado, se encuentra entre los valores frontera impuestos anteriormente en este trabajo.

Es importante destacar que el valor de la resistencia no drenada del suelo, S_u , se puede determinar mediante diferentes procedimientos, tales como: el penetrómetro de bolsillo, la veleta de campo, ensayos de compresión sin confinamiento y los ensayos triaxiales. Cada uno de estos ensayos impone una condición de esfuerzos en el suelo distinta y por lo tanto, la resistencia obtenida también debería serlo. Este parámetro también es afectado por el tamaño de la muestra ensayada, por lo que es recomendable realizar los ensayos que envuelvan la mayor cantidad de material posible, sobre todo cuando se trate de arcillas preconsolidadas, las cuales tienen tendencias a desarrollar discontinuidades dentro de su estructura.

Los resultados mostrados en las, están enfocados a guiar al ingeniero en la toma de decisiones acerca del riesgo de inestabilidad de taludes y de ningún modo representan un análisis riguroso de los mismos, ya que no se incorporan en el análisis, factores como: las grietas de tensión y las superficies de falla preexistentes que pueden existir en la estructura de éstos, las cuales deben ser investigadas si se quiere un análisis más detallado.

3.3.4.- Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de taludes ya que influencia la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, los cuales generalmente se encuentran no saturados, la pluviosidad tiene un efecto muy importante ya

que el efecto acumulativo puede llegar a causar la saturación del terreno disparando así un deslizamiento. Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a. El ciclo climático sobre un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual vs baja precipitación anual;
- b. La acumulación de pluviosidad en un año dado en relación a la acumulación normal;
- c. Intensidades de una tormenta dada.

Guidicini and Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación a la pluviosidad. Se estableció el coeficiente de ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente de ciclo, C_c , fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual medida. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil la cual presenta un clima tropical caracterizado por: una estación seca de junio hasta agosto y una estación húmeda desde enero hasta marzo.

Los resultados de estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno lo cual eleva el nivel freático. Una tormenta que ocurra durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda, tendrá un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad que ocurra hacia el final de la estación húmeda. La FIGURA 3.9 ilustra el mes de la ocurrencia de la falla como función del coeficiente de ciclo C_c . Se puede ver en la FIGURA 3.9 que los eventos catastróficos ocurren hacia el final de la estación húmeda cuando la precipitación acumulada es mayor que el promedio anual.

La FIGURA 3.10 la cual es una gráfica de grado de peligro, fue preparada por Guidicini and Iwasa (1977) por cada área de estudio con la intención de que sirva como una guía para evaluar el peligro de falla en términos del promedio de precipitación acumulada en un año dado.

Figura 3.9. Deslizamientos ocurridos vs. coeficiente de ciclo (de Guidicini and Iwasa, 1977)

FIGURA 3.10. Correlación entre lluvia y deslizamientos (de Guidicini and Iwasa, 1977)

3.3.5.- Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir: el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento (ver Foto 3.3). La erosión causada por agentes humanos incluye cualquier actividad que permita un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección; entre los principales están la tala de árboles y otro tipo de vegetación que ayudan a mantener el suelo en sitio y así mejorar la estabilidad al talud.

La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, la erosión incrementa la incidencia en la inestabilidad de taludes pudiendo resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

Foto 3.3. Erosión producida por una ventosa tipo chorro ubicada en el extremo superior de la zona erosionada

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión. Estos se presentan como el resultado de flujo de sedimentos en cuerpos de agua tales como lagos o embalses lo cual incrementa la turbidez de las aguas creando un peligro para la vida acuática, contaminando el agua potable y reduciendo la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y ripraps. En taludes, la protección consiste en: a) la siembra de vegetación de la zona de rápido crecimiento además de la instalación de un sistema de control del drenaje superficial, b) instalar fajas en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas, c) sellar las grietas superficiales con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración lo cual se reduce la erosión.

3.3.6.- Licuefacción debido a las acciones sísmicas

General

La falla de taludes constituye uno de los principales efectos causados por los sismos, que puede afectar de modo desfavorable obras hechas por el hombre generando grandes pérdidas materiales y hasta humanas. La gran mayoría de las fallas de taludes durante sismos se deben al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos. Sin embargo, fallas en suelos cohesivos también han sido observadas durante eventos sísmicos.

Causas u origen

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas. La licuefacción puede ser disparada por la repetida aplicación de pequeños incrementos/decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La caída de resistencia es de tal magnitud que, momentáneamente, el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado originando grandes deformaciones.

Los depósitos de suelos no cohesivos son susceptibles a la licuefacción si ellos se encuentran en un estado suficientemente suelto y tienen una permeabilidad suficientemente baja durante el período de las vibraciones del terreno. Los fenómenos de licuefacción han sido observados generalmente en depósitos aluviales recientes de materiales granulares tales como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos. Es importante destacar que en la mayoría de los casos de licuefacción observados, los depósitos son de una edad reciente comprendida entre el pleistoceno y el presente.

Parámetros relevantes

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son: (1) la granulometría (tamaño, gradación y forma de granos) y (2) la densidad relativa del depósito. Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no-plásticas que contienen menos del 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tienen la tendencia a ser depositadas en una condición suelta y además presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno. En general, los materiales con un coeficiente de uniformidad C_u (definido como el tamaño del 60% de los granos más finos del depósito) entre 2 y 5 y un tamaño promedio dado por el D_{50} que varía entre 0.02 mm y 2.0 mm son los más propensos a la licuefacción. En base a los resultados de análisis granulométricos en suelos que licuefactaron o no licuefactaron durante sismos, Tsuchida (1970) propuso las granulometrías de frontera mostradas en la FIGURA 3.11.

Figura 3.11. Granulometrías límites de los suelos potencialmente licuables

Los depósitos granulares con densidades relativas mayores al 80 % son poco susceptibles a la licuefacción ya que estos tienden a generar presiones de poros negativas al ser sometidos a esfuerzos de corte no drenados. Por otra parte la licuefacción es posible en depósitos granulares con densidades relativas menores al 65 % puesto que en la mayoría de los casos generan presiones de poros positivas cuando son sometidos a esfuerzos de corte no drenados. La evaluación de la densidad relativa debe hacerse mediante ensayos in-situ ya que resulta extremadamente difícil, por no decir imposible, obtener muestras imperturbadas de suelos granulares. Existen diferentes procedimientos para evaluar la densidad relativa de depósitos granulares in-situ. Sin embargo, los más representativos y comúnmente aceptados son la prueba de penetración standard (SPT) y la prueba de penetración de cono (CPT) (véase la Sección 3.4).

El **Anexo A** presenta una metodología para evaluar el potencial de licuefacción en depósitos granulares. Dicho procedimiento está basado en el comportamiento observado de depósitos granulares durante eventos sísmicos, además de los ensayos de penetración standard (SPT), prueba de penetración de cono (CPT) y ensayos granulométricos. El Anexo A también incluye un ejemplo para ilustrar la aplicación del método.

3.4.- Caracterización del talud. ensayos

En aquellos lugares que se identifiquen como más propensos a la inestabilidad, según lo descrito en la Sección 3.3, deberá procederse a obtener información adicional para lograr una mejor caracterización del subsuelo, para conocer así los parámetros que sirvan de base para el análisis y solución del problema.

La obtención de información consta de tres fases. En la primera fase se debe recopilar toda la información disponible (oral y escrita) acerca del sitio en estudio; esto puede incluir desde relatos de eventos pasados por parte de los lugareños, hasta estudios geológicos y geotécnicos realizados previamente, pasando por planos topográficos, pluviosidad y sismicidad de la zona. La segunda fase es el trabajo de campo en el cual se ejecutan ensayos in situ y además se obtienen muestras de suelo. La tercera fase consiste del trabajo de laboratorio, en el cual se determinan las propiedades y características del material mediante ensayos de caracterización y resistencia.

3.4.1.- Perforaciones

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

El número y la ubicación de las perforaciones a realizar en un estudio determinado, está ligado al tamaño y forma del área considerada en el problema. Los criterios que se utilizan para determinar estas dos características básicas del estudio, varían grandemente, sobre todo cuando el estudio se refiere a áreas planas. En el caso de los taludes, es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones pudiendo este número ser incrementado dependiendo del tamaño del talud. Una en la cresta con una profundidad aproximada de 1.5 veces la altura del talud, una hacia la mitad del talud con una profundidad comparable con la altura de este talud, y una última al pie del mismo con una profundidad aproximada de 1/3 de la altura antes mencionada (FIGURA 3.12). Con esto se quiere obtener la mayor información posible del material que esté dentro de la falla para así poder determinar los parámetros necesarios para la caracterización del suelo y su comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas.

Figura 3.12. Ubicación de perforaciones

3.4.2.- Calicatas

Mediante las calicatas (FOTO 3.4 **CALICATAS**), que constituyen un método de exploración más superficial que el anterior, es posible tomar muestras más voluminosas de material, al mismo tiempo que ofrecen una vista "interna" del suelo y permiten la detección de posibles planos de falla (sobre todo en materiales arcillosos). Estas calicatas generalmente son excavadas a mano teniendo dimensiones típicas de 1.5 x 1.5 x 2.0 metros de profundidad, aunque también pueden realizarse utilizando procedimientos mecánicos.

Las visitas a las calicatas tienen un cierto nivel de peligrosidad, al ser posible la ocurrencia de derrumbes en las paredes de las mismas. Para evitar esto, es recomendable reforzarlas mediante estacas horizontales e inclinadas.

3.4.3.- Ensayos de campo

En campo, se busca obtener la mayor cantidad de información posible. Para lograr este objetivo, es necesario realizar los ensayos que mejor se relacionen con el suelo en cuestión, ya que a partir de estos ensayos y mediante correlaciones que han sido desarrolladas a lo largo del tiempo, se pueden inferir ciertas propiedades de los materiales en estudio. Estas correlaciones, en la mayoría de los casos se ajustan bastante bien a la realidad con un margen de error tolerable (~30%). Algunos de estos ensayos se exponen a continuación:

FOTO 3.4 Calicatas

3.4.3.1.- Prueba de penetración estandar - SPT (ASTM-1586)

El ensayo SPT consiste en hincar en el subsuelo un tomamuestras del tipo cuchara partida de dos pulgadas (5 cm) de diámetro, mediante golpes de un martillo de rosca de 140 lbs (63,5 kgs) de peso en caída libre de 30 pulgadas (76,2 cm). El número de golpes (N) del