

ESTABILIDAD DE TALUDES

INTRODUCCIÓN

Se conoce con el nombre genérico de taludes cualesquiera superficies inclinadas respecto a la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las masas de tierras.

Se puede definir taludes como:

Son las obra, normalmente de tierra, que se construyen a ambos lados de la vía (tanto en excavaciones con en terraplén) con una inclinación tal que garanticen la estabilidad de la obra.

Los taludes tienen zona de emplazamiento que comprende, además de la vía, una franja de terreno a ambos lados de la misma. Su objetivo es tener suficiente terreno en caso de ampliación futura de la carretera y atenuar en gran medida, los peligros de accidentes motivados por obstáculos dentro de dicha zona, los cuales deben ser eliminados.

Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural, en tanto que los taludes artificiales son los inclinados de los terraplenes. También se producen taludes en los bordes de una excavación que se realice a partir del nivel del terreno natural, a los cuales se suele denominar taludes de la excavación.

No hay duda de que el talud constituye la estructura más compleja de las vías terrestres; por eso es preciso analizar la necesidad de definir criterios de estabilidad de taludes entendiéndose, por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén. A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material térreo por mover y por lo tanto, diferentes costas.

Los problemas relacionados con la estabilidad de laderas naturales difieren radicalmente de los que se presentan en taludes construidos por el ingeniero. Dentro de éstos deben verse como esencialmente distintos los problemas de los cortes y los de los terraplenes. Las diferencias importantes radican, en primer lugar, en la naturaleza de los materiales involucrados y, en segundo, en todo un conjunto de circunstancias que dependen de cómo se formó el talud y de su historia geológica, de las condiciones climáticas que privaron a lo largo de tal historia y de la influencia que el hombre ejerce en la actualidad o haya ejercido en el pasado.

OBJETIVOS

- ◆ Conocer los factores que intervienen en la estabilidad de los taludes.
- ◆ Identificar las fallas más comunes de Estabilidad y deslizamiento.
- ◆ Conocer los métodos correctivos mecánicos para la corrección de las fallas de los taludes así como los métodos de cálculo.

GENERALIDADES:

Dentro de los taludes artificiales también existen en las vías terrestres diferencias esenciales entre los cortes y los terraplenes. Estos últimos constituyen una estructura que se construye con un material relativamente controlado o que, por lo menos en principio, se puede controlar; en los cortes.

Otro aspecto que genera confusión dentro de la concepción del problema “estabilidad de taludes” es, el que emana de la extraordinaria complejidad lo que ha dado en llamarse “falla de talud”.

Las fallas de talud se definen en términos de derrumbes o colapso de toda índole, que no dejan duda en pensar que ha ocurrido algo que pone en sino entredicho la función estructural; o en términos de movimientos excesivos, al grado de ser incompatibles con la concepción ingenieril del comportamiento del talud y con la función para la que fue constituido.

Esto radica, más bien, en la gran variedad de fenómenos que por lo general se involucran en el concepto; una falla rotacional, que afecte al grupo entero del talud y su terreno de cimentación, puede comprometer su función estructural tanto como un corrimiento trasnacional de una gran parte de la estructura o como el deslizamiento lento y superficial de una ladera natural.

Es urgente, pues, diferenciar los múltiples modos por los que un talud puede llegar a no cumplir la función que se la haya asignado o a un eventual colapso, viendo cada modo como un problema distinto, en génesis, planteamiento y solución.

El ingeniero, como es usual, analiza estos problemas tratando de extraer los suficientes conocimientos de carácter general como para poder establecer un modelo matemático en el que analiza la estabilidad sea una simple cuestión de lápiz y papel y aplicación de tal o cual procedimiento matemático o secuencia de cálculo algebraico.

Sin embargo, no existe un método general de análisis aplicable a todos los taludes; esto se puede enfocar en dos sentidos. En primer lugar, ha de reconocerse que el método tradicional y todavía más común de análisis estructural no es aplicable a taludes; por la simple razón que no existe ningún procedimiento manejable en la práctica para determinar el estado de esfuerzos internos en los puntos de la masa de suelo, a partir de las cargas exteriores que actúen.

Así pues, todos los métodos de cálculo en boga están ligados a un mecanismo cinemático de falla específica, por lo que sólo serán aplicables a aquellos problemas de estabilidad en que la falla sea del tipo que se considera.

Además de lo anterior, existe otra razón por la cual no puede contarse con un método general de análisis aplicable a todos los casos; de hecho, por esta razón habrá muchos casos prácticos de estabilidad de taludes a los que en buena ley no sea aplicable ningún método teórico de análisis. En efecto, la aplicación de cualquier método teórico de análisis implica que se puedan utilizar los parámetros de resistencia del suelo adecuados al caso.

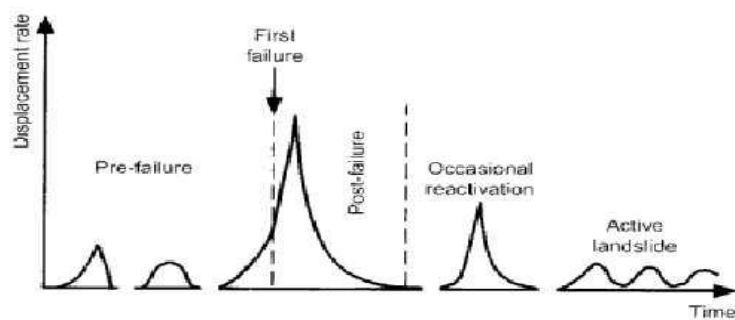
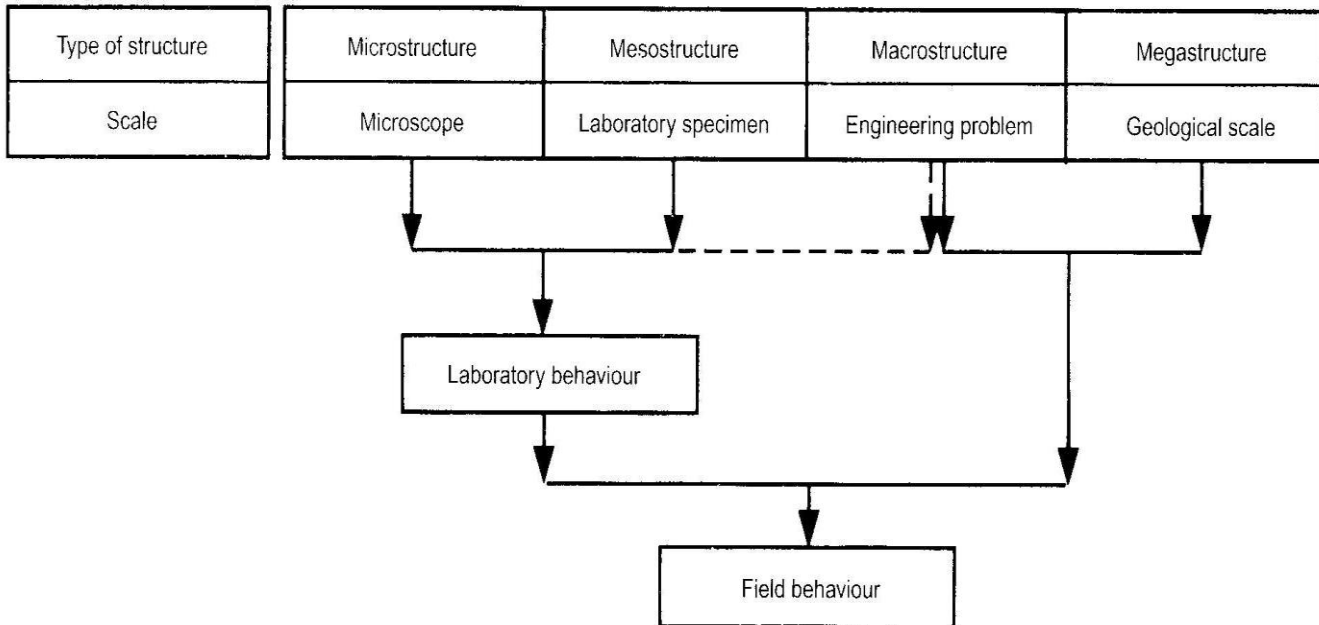
El poder hablar de parámetros de resistencia del suelo que forma el talud implica requisitos mínimos en lo que refiere a la naturaleza de los materiales constitutivos y su disposición, de manera que pueda hablarse de homogeneidad o de una estratificación bien conocida y bien definida, dependerá de un grupo de especialistas, con base en estudios exploratorios someros y en técnicas de laboratorios elementales, las recomendaciones de la inclinación de la mayor parte de los cortes y los terraplenes. Las recomendaciones se basan en la experiencia anterior, en el conocimiento de los materiales y necesariamente, en los lineamientos de una política general establecida por la institución que proyecta.

En resumen, no es factible la aplicación de los métodos matemáticos de análisis de estabilidad de taludes en las vías terrestres, sea por razones de falta de homogeneidad de los materiales constructivos, que harían poco representativos los resultados de cualquier muestreo y estudio de laboratorio, o bien por las razones que emanan del número de las estructuras que se estudien; pero se insiste en la necesidad de detectar desde la etapa de estudio previo aquellos casos por alguna razón especiales que sean merecedoras de estudios detallados; dentro de éstos quedan, como es natural, prácticamente todos los casos de reconstrucción de taludes fallados.

En general tenemos:

- Taludes naturales
- Cortes (o desmontes)
- Talud de terraplenes o presas artificiales.

En taludes naturales y cortes:



El ángulo de talud estable máximo está directamente relacionado con el ángulo de fricción correspondiente a la resistencia máxima, sin embargo sabemos que ϕ es una función directa de la relación de vacíos de arena.

Siempre que la arena o grava se vierten, la arena queda generalmente en estado suelto. En este estado ϕ es prácticamente igual a cero por ello, el ángulo de reposo de una arena o grava vertida es aproximadamente igual al ángulo de fricción interna correspondiente al estado suelto.

FACTOR DE SEGURIDAD

El factor de seguridad de un talud infinito se suele definir por

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

La única incógnita es la estabilidad de un talud infinito es el valor apropiado del ángulo de fricción interna. Esta magnitud puede estimarse con precisión razonable y por otro lado, las consecuencias de la falla de un talud de este tipo son escasas de aquí que el factor de seguridad no necesita ser muy grande. En general el ingeniero será conservador al suponer $\phi = 0$ y tomará un $FS = 1$

TIPOS DE FALLAS MÁS COMUNES EN LOS TALUDES DE LAS VIAS TERRESTRES.

En primer lugar se distinguen las que afectan principalmente a las laderas naturales de las que ocurren sobre todo en los taludes artificiales:

a) Factores Geomorfológicos:

- 1) Topografía de los alrededores del talud.
- 2) Distribución de las discontinuidades y estratificaciones.

b) Factores internos:

- 1) Propiedades mecánicas de los suelos constituyentes.
- 2) Estados de esfuerzos actuantes.
- 3) Factores climáticos y concretamente el agua superficial y subterránea.

Se presentan a continuación las fallas más comunes de los taludes en las vía terrestres. En primer lugar, se distinguen las que afectan principalmente a las laderas naturales de las que ocurren sobre todo en los taludes artificiales.

1. Fallas ligadas a la estabilidad de las laderas naturales.

Se agrupan en esta división las fallas que ocurren típicamente en laderas naturales, aun cuando de un modo u otro también pudieran presentarse de manera ocasional en taludes artificiales.

La inclinación de este talud tiene que ser suficientemente suave y/o su altura suficientemente pequeña para que sea estable. La inclinación del talud una vez que ha cesado el vertido talud máximo para el cual el material estable se denomina ángulo de reposo.

El talud tendrá una inclinación media aproximadamente igual al ángulo de reposo que tendría si el material se vertiera directamente.

1.1-Deslizamiento superficial asociado a falta de resistencia por baja presión de confinamiento (Creep).

Se refiere esta falla al proceso más o menos continuo y por lo general lento de deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas naturales. En aras de la economía del lenguaje se utilizará en lo que sigue la palabra inglesa “creep” para referirse a ella, si bien eventualmente se podrá usar la expresión “deslizamiento superficial”.

El creep suele afectar a grandes áreas y el movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y las masas inmóviles mas profundas. El creep suele deberse a una combinación de las acciones de las fuerzas de gravedad y de otros varios agentes.

La velocidad de movimiento ladera debajo de un creep típico puede ser muy baja y rara vez excede de algunos centímetros por año.

En rigor debe hablarse de dos clases de creep, según ha señalado Terzaghi: el estacional, que afecta sólo a la corteza superficial de la ladera que sufre la influencia de los cambios climáticos en forma de expansiones y contracciones térmicas o por humedecimiento y secado, y el masivo, que afecta a capas de tierra más profundas, no interesadas por los efectos ambientales y que, en consecuencia, sólo se puede atribuir al efecto gravitacional. El primero, que en mayor o menor grado existe siempre, producirá movimientos que podrán variar con la época del año; el segundo se manifestará por movimientos prácticamente constantes. El espesor de la capa superficial a la que afecta el creep estacional es sumamente bajo y su dimensión máxima puede estimarse en un metro.

No están claras todavía las causas por las que una ladera natural particular pueda entrar en un creep másico, a causa del cual una consta superficial, cuyo espesor puede ser en este caso de varios metros, comienza a moverse lentamente ladera abajo. Se ha hablado de una “resistencia fundamental” que representaría un límite tal que, si los esfuerzos actuales quedan abajo de él, la parte superficial de la ladera permanecerá en reposo, y que si los esfuerzos actuales los sobrepasan, se producirá el creep masivo.

Aun cuando no están del todo definidos los conceptos de resistencia fundamental o las causas del creep, parece cierto que este movimiento se produce bajo niveles de esfuerzos actuales bajos, muy inferiores a los que corresponden a la máxima resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.

En una ladera natural se cumplen tanto la condición de la existencia de un estado de esfuerzos actuantes, como la de que dichos esfuerzos actúen durante muy largo tiempo; esto explicaría el abatimiento de la resistencia en el material de la ladera, aun por debajo de niveles de esfuerzos bajos, del tipo de los reportados por Griggs y Bishop.

Como ya se ha dicho, con frecuencia el creep afecta a grandes extensiones de terreno en declive. Como quiera que no se conozca un método seguro para detenerlo una vez que se inicia, se comprende la importancia que para el ingeniero tiene su localización oportuna, desde los primeros estudios de campo que se hagan para iniciar el proyecto o en la etapa del anteproyecto. Por eso es de fundamental importancia considerar cuales son los signos exteriores del fenómeno que el ingeniero puede advertir.

Es lógico pensar que la velocidad de movimiento de la ladera se máxima en la superficie y vaya disminuyendo hacia el interior, donde aumentan las restricciones al movimiento. Este hecho, del que existe amplia evidencia experimental, se refleja por una inclinación de los árboles, postes y otros elementos similares, los que adoptan una posición perpendicular a la ladera, en vez de la natural, vertical.

Es obvio que han de reflejarse en el movimiento todas las heterogeneidades que existan en la zona superficial de la ladera, las cuales crearán diferencias en la velocidad del movimiento que, a su vez, serán causa de agrietamientos, escalonamientos, rotura de muros, de bardas y de cualesquiera estructuras longitudinales que puedan existir.

Todos estos signos exteriores a localizar creeps al ingeniero experimentado que los busque con acuciosidad, pero el auxilio más importante en este aspecto proviene, una vez más, del uso sistemático y cuidadoso de los pares de aerofotografías y de su fotointerpretación.

Localizado el creep, no se debe vacilar en cambiar el trazo de la vía terrestre, evitando sus problemas, pues no existe por el momento, ya se dijo, ningún remedio confiable contra este tipo de falla. De no evitarse el problema, los cortes y terraplenes de la vía terrestre estarán en continuo movimiento, con todos los inconvenientes de capacidad de servicio y conservación y con el riesgo, siempre inminente, de se produzcan fallas de todo tipo, originadas por el propio deslizamiento superficial.

1.2-Fallas asociadas a procesos de deformación acumulativa, generalmente relacionada con perfiles geológicos desfavorables.

Se refiere este título al tipo de fallas que se producen en las laderas naturales como consecuencia de procesos de deformación acumulativa, por la tendencia de grandes masas a moverse ladera abajo. Este tipo de fallas quizá es típico de laderas naturales en depósitos de talud o en otras formaciones análogas en cuanto a génesis geológica, formada por materiales bastante heterogéneos, no consolidada y bajo la acción casi exclusiva de las fuerzas gravitacionales.

Dado el largo tiempo que tales esfuerzos gravitacionales actúan en los materiales del interior de la ladera, la resistencia al esfuerzo cortante podrá degradarse por procesos de deformación acumulativa y en ciertas zonas dentro de la ladera se desarrollarán estados de creep profundo, en el sentido utilizado por Goldstein y Ter-Stepanian. Según estos autores, se desarrollan estados de deformación continua muy lenta en aquellas zonas del interior de la ladera en que existan concentraciones locales de esfuerzos cortantes.

En tales condiciones, la ladera puede deformarse durante largo tiempo, hasta que, eventualmente, tal acumulación de deformación produzca la ruptura del suelo y la formación de una superficie de falla generalizada en el interior de la propia ladera.

Una vez producida la superficie de falla podrá ocurrir un deslizamiento rápido de las masas afectadas, o la tierra sobre la superficie de falla podrá permanecer en su posición, desde luego en un estado no muy alejado del equilibrio límite o crítico. Ello dependerá, primordialmente, de la inclinación de la superficie de falla formada y, en menor grado, de las restricciones que creen al deslizamiento las heterogeneidades e irregularidades de forma y materiales que puedan existir a lo largo de la superficie de falla.

La superficie de falla típica de un proceso de deformación acumulativa es de forma casi plana. A ello pueden contribuir varios factores, de los que el primero y más importante quizá se la geología de la zona, pues en una ladera natural las estratificaciones tienden a seguir la forma de la frontera exterior de la ladera. Además, los procesos de deformación lenta anteriores a la falla estimulan más bien la generación de mecanismos de resistencia del tipo friccionante puro, lo que también contribuirá a la generación de planos de deslizamientos. Si la inclinación del plano es superior al ángulo de fricción que pueda tribuirse a la masa deslizante respecto a las masas fijas, que será algún valor en el orden del ángulo de resistencia residual del suelo.

La masa deslizará, pero si la inclinación de la superficie de falla es de orden del ángulo de resistencia residual (o algo mayor, contando con las restricciones locales al deslizamiento que se desarrollen en la propia superficie de falla), la masa “desprendida” podrá permanecer en su posición o moverse muy lentamente ladera abajo a lo largo de la línea de ruptura.

La inclinación media de la superficie de falla es de unos 15° , siendo quizá 13° el valor que se pueda atribuir al ángulo de resistencia residual de los depósitos de talud.

El nivel freático y en general la presencia de agua en los materiales en la proximidad de la superficie de falla desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y, de hecho, hacen algo más complejo en mecanismo que se ha descrito para la generación de estas fallas.

1. Falla por deslizamiento superficial:

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones del suelo próximas a su frontera deslicen hacia abajo; el fenómeno es más intenso cerca de la superficie inclinada del talud a causa de la falta de presión normal confinante que allí existe.

El fenómeno se pone de manifiesto a los ojos del ingeniero por una serie de efectos notables, tales como inclinación de los árboles, por efecto del arrastre producido por las capas superiores del terreno en que enraízan, movimientos relativos y rupturas de bardas, muros etc.; acumulación de suelos en las depresiones y valles y falta de los mismos en las zonas altas.

2. Deslizamiento en laderas naturales sobre superficies de falla preexistentes:

En muchas laderas naturales se encuentra en movimiento hacia abajo una costa importante del material; producido por un proceso de deformación bajo esfuerzo cortante en partes más profundas, que llega muchas veces a producir una verdadera superficie de falla. Estos movimientos, a veces son tan lentos que pasan inadvertidos.

3. Falla por movimiento del cuerpo del talud:

En contraste con los movimientos superficiales lentos, pueden ocurrir en los taludes movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo.

Estos fenómenos reciben comúnmente el nombre de deslizamiento de tierras. Dentro de estos existen dos tipos claramente diferenciados. En primer lugar, un caso en el cual se define una superficie de falla curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud; estas son las fallas llamadas por rotación. En segundo lugar, se tienen las fallas que ocurren a lo largo de superficies débiles, asimilables a un plano en el cuerpo de talud o en su terreno de cimentación. Las fallas por rotación pueden presentarse pasando la superficie de falla por el pie del talud, sin interesar el terreno de cimentación o pasando adelante del pie.

4. Flujos

Se refiere este tipo de falla a movimientos más o menos rápidos de una parte de la ladera natural, de tal manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de velocidades y desplazamientos recuerda el comportamiento de un líquido viscoso. La superficie de deslizamiento o no es distinguible o se desarrolla durante un lapso relativamente breve; es también frecuente que la zona de contacto entre la parte móvil y las masas fijas de la ladera sea una zona de flujo plástico.

El material susceptible de fluir puede ser cualquier formación no consolidada, y así el fenómeno puede presentarse en fragmentos de roca, depósitos de talud, suelos granulares finos o arcillas francas; son frecuentes los flujos en lodo.

5.1-Flujo en materiales relativamente secos

En este grupo quedan comprendidos, en primer lugar, los flujos de fragmentos de roca, desde los muy rápidos (avalanchas) hasta los que ocurren lentamente. Estos movimientos pueden explicarse en términos de la falla plástica de los contactos profundos entre los fragmentos de roca y, consecuentemente, afectan siempre grandes masas de fragmentos y suelen ser de catastróficas consecuencias.

En segundo lugar, los flujos en suelos, relativamente secos ha ocurrido en “loess”, asociadas muchas veces a temblores. En este caso, aparentemente, el efecto del temblor fue causar una muy rápida destrucción de la estructura del material, produciendo una verdadera licuación, pero con el aire jugando el papel que en estos fenómenos por lo común corresponde al agua.

Fenómenos similares se han registrado en arenas secas.

5.2-Flujos en materiales húmedos. Flujos de lodos

Se trata ahora de flujos que requieren una proporción apreciable de agua contenida en el suelo, la cual desempeña un papel en la génesis y naturaleza de la falla; existe amplia graduación en la cantidad de agua que pueden contener los materiales, así como en el papel que ésta llega a tener en el desarrollo de la falla.

Los flujos en materiales húmedos se denominan flujos de lodo cuando es muy elevado el contenido de agua de los materiales, por lo menos en la zona de fluencia, pero naturalmente no hay una distinción clara entre los “flujos de tierra” y los “flujos de lodo”. A veces se habla también de “flujo de detritus”, cuando el material que fluye contiene porcentaje, apreciable del orden un 50%, por lo menos de graves, boleos o fragmentos de rocas, embebidos en la matriz, de suelo más fino, tal como es común que suceda en los depósitos de talud o en muchas laderas de suelos residual.

Los flujos de tierra en materiales terrenos no demasiado húmedo se desarrollan típicamente en el pie de los deslizamientos de tipo rotacional en el cuerpo del talud, que se describen más adelante y a veces ocurren en forma extraordinariamente rápida, como movimiento secundario del deslizamiento que tuvo lugar primeramente.

Estos flujos de tierra por lo común retienen mucha de la vegetación original, así como la estratigrafía y aspecto general de la formación en la que ocurrió el deslizamiento primario.

Los flujos de tierra en suelos granulares finos son típicos de formaciones costeras y se asocian generalmente a la erosión marina y fluctuaciones respectivas de la presión de poro debidas a la ascensión el descenso del nivel del agua con las mareas, se originan con procesos análogos a la licuación.

En los flujos con muy alto contenido de agua. La falla produce una completa perturbación estructural. La forma típica del deslizamiento es análoga al avance de un glaciar y la velocidad de desplazamiento puede variar desde unos pocos centímetros por año (casos reportados en la referencia no: 9), hasta la correspondiente a deslizamiento catastróficos. En flujos lentos es común que en la velocidad del movimiento influyan mucho las variaciones estacionales del clima, en tanto que los flujos rápidos suelen seguir a épocas de violenta precipitación pluvial.

Los flujos de lodo muy rápidos se presentan muchas veces en laderas de las que se ha removido la cobertura vegetal por alguna razón y suelen comenzar en muy modestas proporciones, creciendo rápidamente con un poder de transporte del suelo sobre el que pasa que parece fuera de proporción con su importancia inicial; de esta manera se pueden desencadenar auténticos ríos de lodos, capaces de acusar verdaderas catástrofes sin duda su génesis debe incluir fenómenos de licuación de suelos.

Los flujos de detritus se producen pro disminución de resistencia al esfuerzo cortante de la matriz fina de tales formaciones; la masa móvil se rompe en fragmentos cada vez menores a medida que avanza ladera abajo.

5. Fallas por erosión:

Estas también son fallas de tipo superficial provocadas por arrastres de viento, agua, etc., en los taludes. El fenómeno es tanto más notorio cuando más empinadas sean las laderas de los taludes. Una manifestación típica del fenómeno suele ser la aparición de irregularidades en el talud, originalmente uniforme. Desde el punto de vista teórico esta falla suele ser imposible de cuantificar detalladamente, pero la experiencia ha proporcionado normas que la atenúan grandemente si se las aplica con cuidado.

6. Fallas por licuación:

Estas fallan ocurren cuando en la zona del deslizamiento el suelo pasa rápidamente de una condición mas o menos firme a la correspondiente a una suspensión, con pérdida casi total de resistencia al esfuerzo cortante.

Estas fallas ocurren en arcillas extrasensitivas y arenas poco compactas, las cuales, al ser perturbadas, pasan rápidamente de una condición más o menos estable o una suspensión, con la pérdida casi-total de la resistencia al esfuerzo cortante. Las dos causas que puede atribuirse esa pérdida de resistencia son: incremento de los esfuerzos cortantes actuantes y desarrollo de la presión de poros correspondiente, y por el desarrollo de presiones elevadas en el agua intersticial, quizás como consecuencia de un sismo, una explosión, etc. En Venezuela existen arenas con estas características al sur del Lago de Valencia, en Guigue.

7. Fallo por falta de capacidad de carga en el terreno de cimentación

Este tipo de fallo se produce cuando el terreno tiene una capacidad de carga inferior o las cargas impuestas. Este tipo de fallos sucede a menudo en el área metropolitana, debido a que se construye sobre rellenos no compactados o con un bajo nivel de compactación. En el caso de las fundaciones, se colocan fundaciones superficiales en un terreno de baja capacidad de soporte o pilotes cuya profundidad no alcanzó el terreno firme. También ocurre el caso de construcciones muy pesadas para el terreno en el que están situadas. Como éstos existen infinidad de casos adicionales, los cuales ocuparían una publicación completa.

8. Fallas relacionadas a la estabilidad de taludes artificiales:

-Falla rotacional

Se describe ahora los movimientos rápidos o prácticamente instantáneos que ocurren en los taludes y que afectan a masas profundas de los mismos con deslizamiento a lo largo de una superficie de falla curva que se desarrolla en el interior del cuerpo de talud, interesando o no al terreno de cimentación. Se considera que la superficie de falla se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan materiales. La resistencia que se debe considerar en cada caso particular es una cuestión importante que se tratará por separado en páginas subsiguientes de este capítulo; por el momento, basta decir que la resistencia que se supone superada al producirse falla rotacional es generalmente la resistencia máxima.

Así pues, en el interior del talud existe un estado de esfuerzos cortantes que vence en forma más o menos rápida la resistencia al esfuerzo cortante del suelo; a consecuencia de ello sobreviene la ruptura del mismo, con la formación de una superficie de deslizamiento, a lo largo de la cual se produce la falla. Estos movimientos son típicos de los cortes y los terraplenes de una vía terrestre.

Las fallas del tipo rotacional pueden producirse a lo largo de superficies de fallas identificables con superficies cilíndricas o conoidales cuya traza con el plano del papel sea un arco de circunferencia por lo menos con razonable aproximación; la cual, como se verá, resulta muy conveniente en el momento en que se desee establecer algún modelo matemático de falla que permita un cálculo numérico, o pueden adoptar formas algo diferentes, en la que por lo general influyen la secuencia geológica local, el perfil estratégico y la naturaleza de los materiales.

Desde luego las fallas rotacionales de formas circular ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo comportamiento mecánico esté regido básicamente por su fracción arcillosa. En general afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor (hablando sólo lo mismo, sin considerar el terreno de cimentación), cuanto más escarpado sea aquél.

Las fallas rotacionales circulares pueden ser de cuerpo de talud o de base; las primeras se desarrollan sin interesar al terreno de cimentación en tanto que las segundas redesarrollan parcialmente en él.

Al ocurrir las fallas circulares pueden afectar a masas muy anchas, en comparación con las dimensiones generales superficies cilíndricas, o pueden ocurrir en forma conoidal, con un ancho pequeño comparado. Con su longitud.

Las fallas rotacionales de forma distintas a la circular típica parecen estar asociadas sobre todo a arcillas sobre consolidadas, que se presentan en taludes no homogéneos, por diferencias en la meteorización, por influencia de la estratificación o por otras causas que se reflejan en discontinuidades o en desorden estructural en el talud. Son, por lo tanto, típicas de cortes. Ocurren siempre acompañadas de gran fragmentación de los materiales involucrados.

La forma de la superficie de falla, que es siempre curva en estos casos, solo idealizadamente se puede considerar circular o formada por lo menos en parte por arcos de circunferencias. En realidad esta influida por fallas, juntas, contactos y otras discontinuidades de los materiales. Este hecho es especialmente notable en suelos residuales.

9.2-Falla traslacional

Estas fallas por lo general consisten en movimientos trasnacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficies de fallas básicamente planas, asociadas a la presencia de estratos pocos resistentes localizados a poca profundidad bajo el talud.

La superficie de falla se desarrolla en forma paralela al estrato débil y se remata en sus extremos por dos cantiles, por lo general formados por agrietamientos.

Los estratos débiles que fomentan estas fallas son por lo común de arcillas blandas o de arenas finas o limos no plásticos sueltos. Con mucha frecuencia, la debilidad del estrato esta ligada a elevadas presiones de poros en el agua contenidas en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua en estratos de arena (Acuíferos). En este sentido las fallas pueden estar ligadas también al calendario de las temporadas de lluvias en la región.

Las fallas de una franja superficial son típicas de laderas naturales formadas por materiales arcillosos productos de meteorización de las formaciones originales. Se suelen provocar por el efecto de la sobre carga impuesta por un terraplén construido sobre la ladera. En esta falla el movimiento ocurre casi sin distorsión.

Este tipo de fallas abarca movimientos en que se combinan la rotación y la traslación dando lugar a superficies de fallas compuestas en que se desarrollan zonas planas a la vez que tramos curvos, asimilables a arcos circulares.

9. Fallas con superficies compuestas

En general, estas superficies están predeterminadas por la presencia de heterogeneidades dentro del talud.

En general es el predominio de las partes circulares o planas el que sirve para clasificar la falla como rotacional o traslacional, quedando la categoría de fallas compuestas para los casos en que ambas curvas se reparten más o menos por igual.

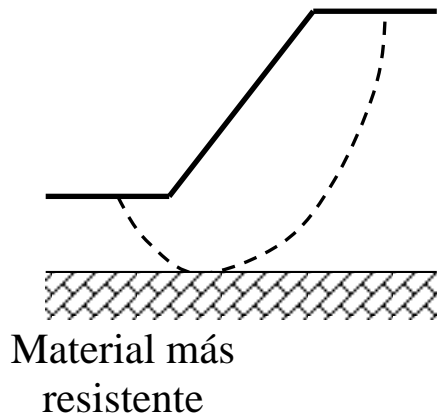
Las fallas compuestas suelen producir la distorsión de los materiales, que es típicas de las fallas circulares.

10. Fallas Múltiples

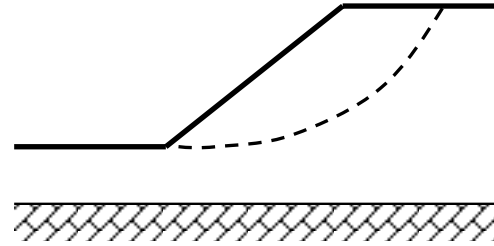
Se trata ahora de estudiar aquellas fallas que se producen con varias superficies de deslizamientos, sean simultaneas o en rápida sucesión. Conviene distinguir las fallas sucesivas y las regresivas. Ambas son comunes en laderas naturales en las que se practicas un corte.

Tipología de fallas.

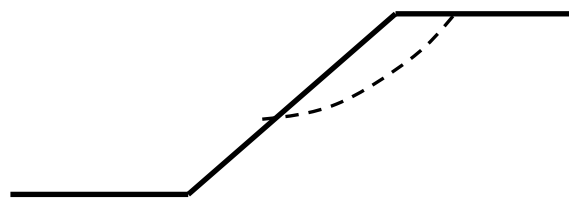
En general se toma superficie de falla circular – A partir de observaciones



Falla profunda

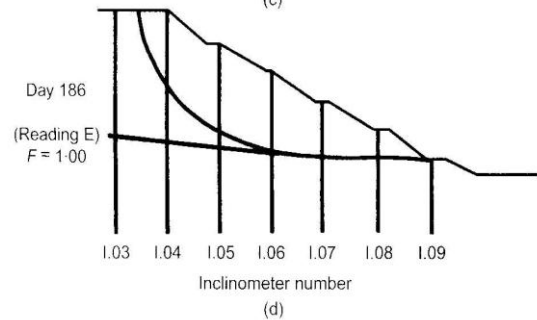
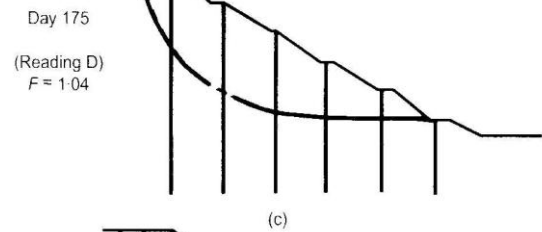
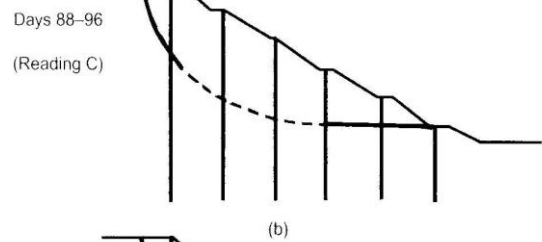
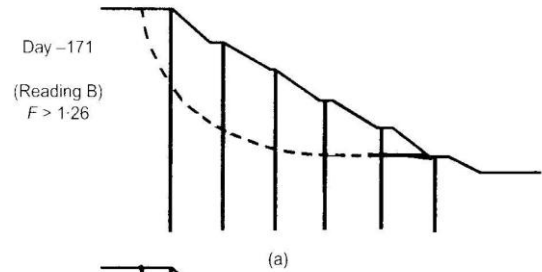
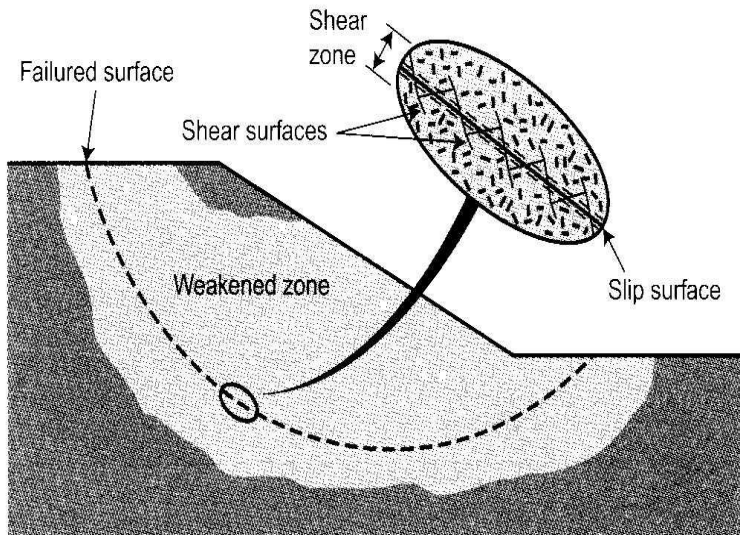


Falla de Pie



Falla de Talud (localizada)

FORMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE FALLA Y FALLA PROGRESIVA.



--- Final slip surface (failure on day 196)
— Localization

PROBLEMAS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS RESIDUALES

Los suelos residuales presentan, en lo que se refiere a la estabilidad de sus taludes (naturales y aun artificiales), algunas particularidades.

En conexión con la estabilidad de los taludes en los suelos residuales existen tres conceptos que desempeñan un papel muy importante; estos son el perfil de meteorización, las estructuras heredadas y, naturalmente, el efecto del agua subterránea.

El perfil de meteorización es la secuencia de capas de materiales con diferentes propiedades que se ha formado en el lugar donde se le encuentra y que sobreyace a la roca no meteorizada. En realidad será preciso considerar también ciertos perfiles de suelos no propiamente formados "in situ", sino con mayor o menor grado de transporte, tales como los perfiles en depósitos de talud, de piemonte, coluviales, etc.; la razón es que estos perfiles y sus condiciones de estabilidad son tan similares a los de los suelos residuales que no resulta conveniente su separación.

El perfil de meteorización se forma tanto por ataque mecánico como por descomposición química. Puede variar en forma considerable de un sitio a otro, sobre todo por variaciones locales en el tipo y estructura de la roca, topografía, condiciones de erosión, régimen de aguas subterráneas y variaciones locales de clima, especialmente en régimen e intensidad de lluvias.

En casi todas las rocas metamórficas e ígneas intrusitas, el perfil de meteorización comprende una capa de suelo residual, una de roca meteorizada y la roca fresca, poco meteorizada. Croquis de tales perfiles se muestran en la siguiente figura.

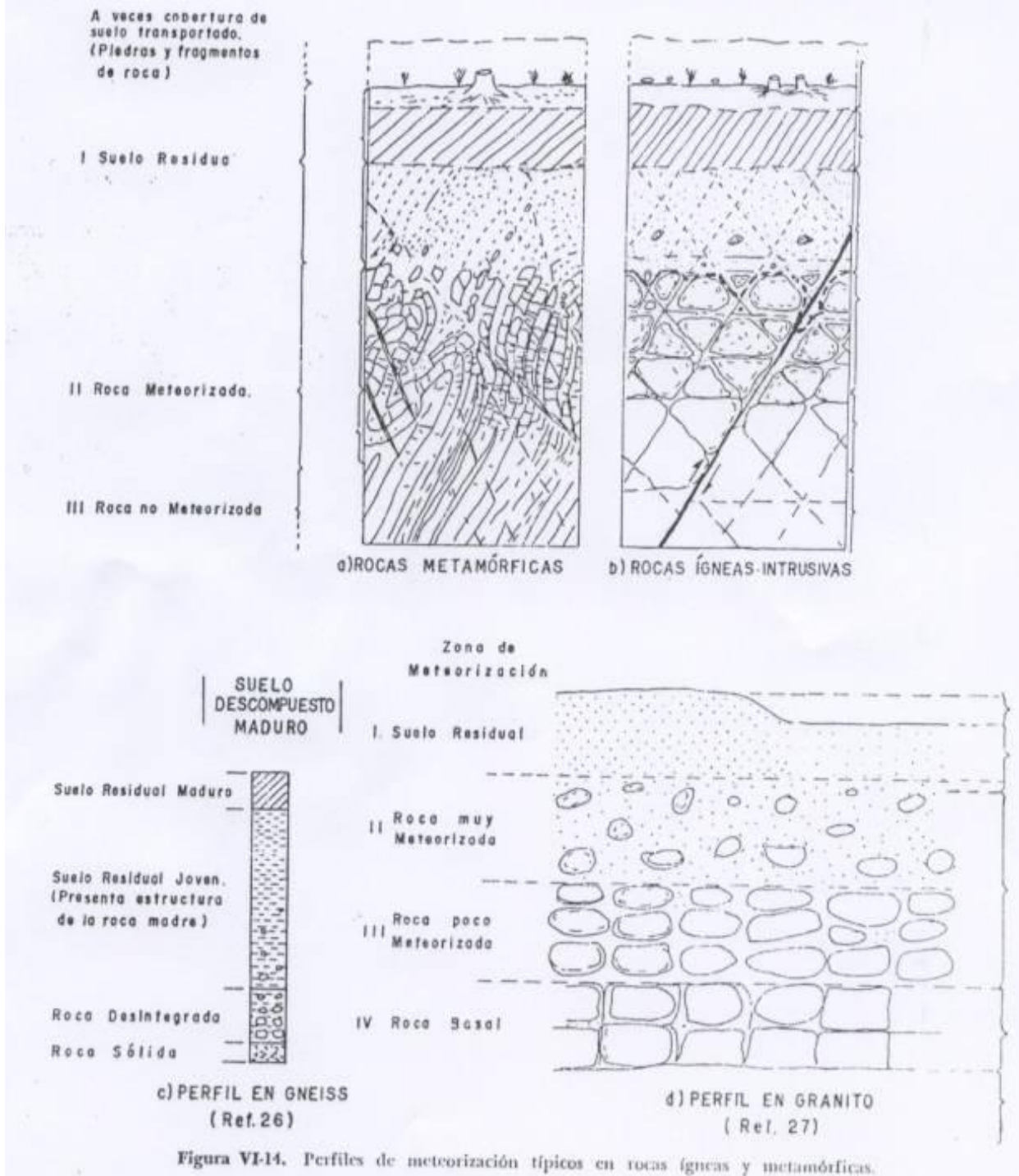
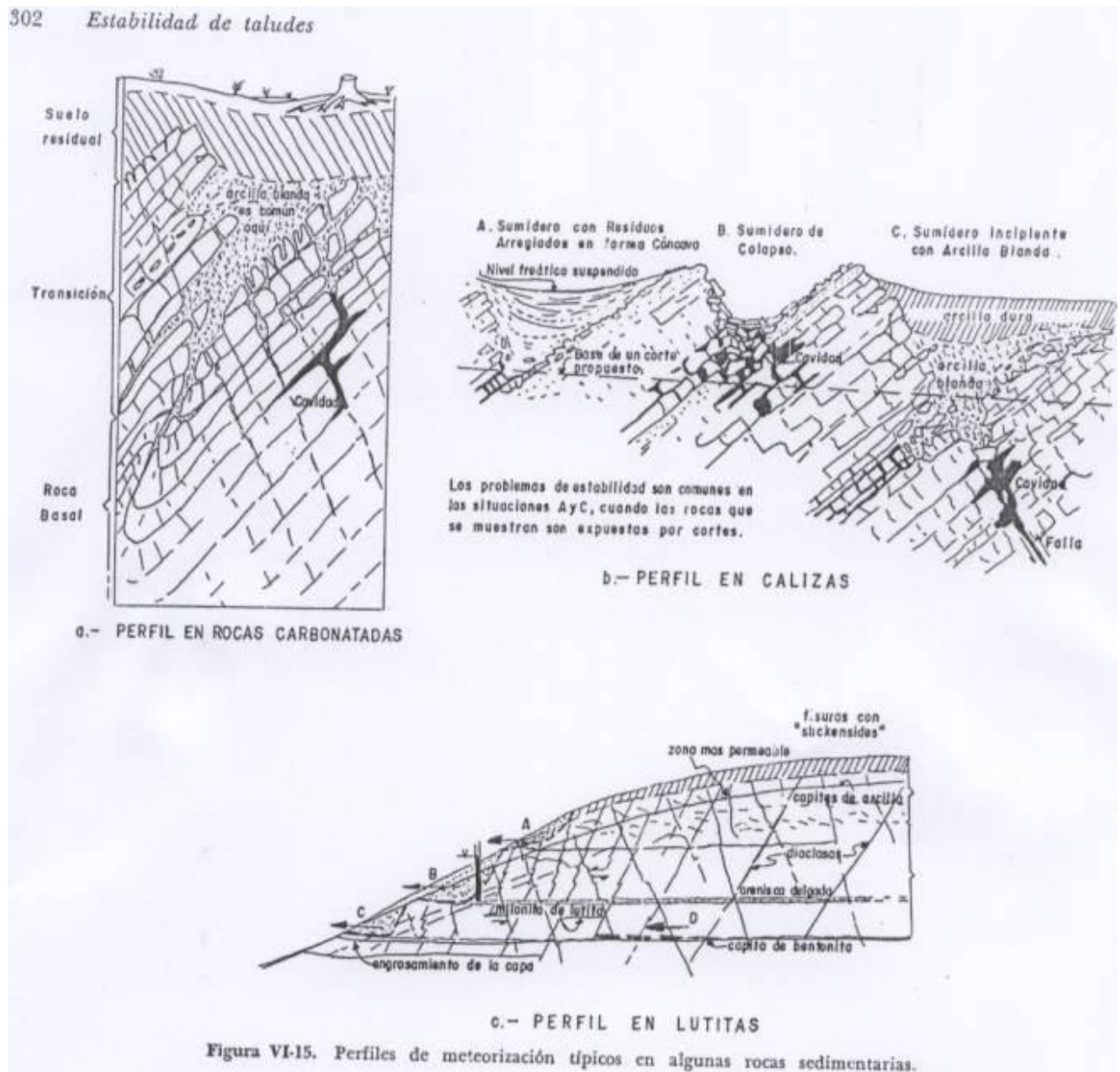


Figura VI-14. Perfiles de meteorización típicos en rocas ígneas y metamórficas.

Muchos de los problemas ingenieriles de las vías terrestres que atraviesan suelos residuales provienen de la capa de transición de roca meteorizada, comprendida entre la capa superior del suelo y la interior de roca más sana. Es difícil establecer los límites entre las distintas zonas de perfil de meteorización, y al respecto existen algunos criterios empíricos; por ejemplo la capa de suelo residual y de roca meteorizada se han separado con base en el momento en que se obtienen recuperaciones de un 10 % en los corazones de roca, al usar exploración rotatoria, en tanto que el porcentaje sube al 75 % para distinguir la capa intermedia de la roca sana basal.

Perfiles de meteorización típicos en rocas ígneas y metamórficas



Entre los perfiles de rocas ígneas y metamórficas existen algunas diferencias substanciales. Por ejemplo, en la parte (a) de la figura anterior se muestra un perfil típico de rocas carbonizadas (calizas, dolomitas, mármoles, etc.) en el que se ve que la cubierta de suelo residual puede ser ahora muy variable en espesor y calidad. Este suelo procede de la solución de la roca original y con frecuencia es arcilloso, pero puede ser arenoso y conglomerático; por lo general presenta un porcentaje infinito de la roca original, pues esta ha sido eliminada por solución. En las rocas ígneas y metamórficas, por el contrario, es común que el suelo residual contenga prácticamente todos los constituyentes de la roca original. Es frecuente en muchas rocas sedimentarias del tipo de la caliza que el perfil de la roca meteorizada sea sumamente irregular y con cavidades rellenas o no de arcilla, partes a y b de la figura anterior (VI – 15) y que transición con el suelo residual sea brusca.

En las lutitas es común que la capa de suelo residual (arcilloso) sea delgada. Esto se atribuye sobre todo a la resistencia a la meteorización que han debido desarrollar muchos de los minerales de las lutitas, los cuales proceden ya de la meteorización previa de otras rocas. En estos casos suele ser notable el grado en que prevalecen los sistemas de pequeñas grietas y fisuras, que se pueden abrir con facilidad por relajación de esfuerzos, desencadenando procesos de meteorización mecánica que pueden ser muy rápidos. En general las lutitas son más susceptibles a la desintegración mecánica que a la descomposición química, en lo que difieren de la mayoría de las rocas.

La mayor parte de los problemas de estabilidad en suelos residuales producto de la meteorización de rocas metamórficas e ígneas ocurren en la capa de suelo residual superficial por fenómenos relacionados con incrementos de presión de poro (flujos por lluvias), o en la capa intermedia de roca meteorizada por influencia de diaclasas y fracturas heredadas de la roca original. En estos perfiles es muy común que existan fuertes fluctuaciones estacionales de los niveles piezométricos en las distintas capas que los forman.

Los problemas de estabilidad más comunes ligados a las calizas y otras rocas carbonatadas emanan de los sumideros, de la facturación intensa y de las frecuentes intercalaciones de arcillas blandas; parte (b) de la figura anterior (VI – 15), en estas formaciones es común que se definan zonas de intensa concentración de flujo.

La forma más típica de ruptura de laderas en lutita es el deslizamiento poco profundo que se indica con “A” en la parte (c) de la figura anterior (VI – 15), tal deslizamiento suele estar aparejado a un nivel freático anormalmente alto en la lutita fisurada subyacente. El deslizamiento de tipo B de la misma figura está asociado a pequeñas capas débiles o muy permeables interestratificadas con lutita, situación muy común. El deslizamiento C de la misma figura estará típicamente asociado a una capa de arcilla muy blanda y poco resistente. Es común que deslizamientos del tipo B ó C se hagan progresivos o sucesivos. Al desarrollarse deslizamientos profundos, acompañados de pequeños movimientos, aumenta la permeabilidad de la masa fallada y la posibilidad de filtraciones, pero por lo general permanecen las mismas condiciones de flujo para el agua detrás y debajo de la masa deslizante, si la masa deslizante no colapsa, cualquier medida que favorezca el drenaje de esas aguas beneficiará mucho la estabilidad del conjunto.

Skempton ha hecho ver que las laderas naturales en lutitas y arcillas sobreconsolidadas sólo serán estables para ángulos de inclinación que no excedan mucho de la mitad del ángulo de resistencia residual y que, desde luego, no sobrepasan este último valor. Puede haber variaciones importantes a tales límites por distribuciones particulares de la presión de poro dentro de la masa. Desde luego el límite anterior es teórico y, como ya se dijo, en la práctica será relativamente común encontrar laderas naturales estables con ángulo de inclinación del orden del ángulo de resistencia residual o, incluso, ligeramente mayores. Si el tipo de falla que se considera en la ladera es de los que dependen de la resistencia máxima, el ángulo de inclinación máxima estable, en el sentido de Skempton, estará en el orden de la mitad el ángulo de resistencia máxima del suelo, ligado a esfuerzos efectivos, es decir, tal como se obtiene en una prueba lenta, con consolidación y drenaje.

Un caso especial de secuencia geológica que por su frecuencia tiene particular interés en muchos problemas conectados con suelos residuales lo constituye aquel en que aparecen las lutitas interestratificadas con areniscas. Las areniscas son muchas veces más firmes que las lutitas, pero son también mucho más permeables y permiten la difusión del agua de filtración.

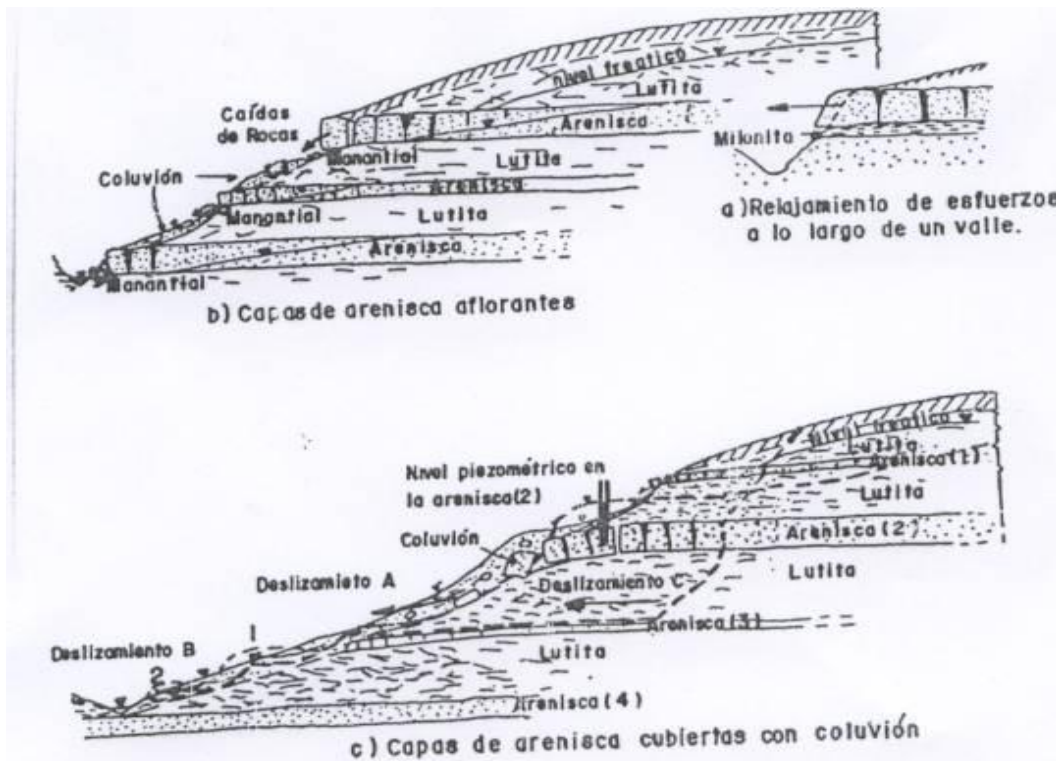
Los perfiles de arenisca y lutita intercaladas pueden variar mucho por plegamiento y por el diferente grado de fisuración y fracturamiento a que aquél pueda dar lugar.

Henkel ha estudiado teóricamente la inclinación que pueden tener en condiciones estables estos perfiles, llegando a conclusiones similares a las que se han mencionados para las lutitas solas, de manera que el ángulo de inclinación límite resulta comprendido para la ladera natural entre la mitad y el valor completo del ángulo de resistencia que pueda atribuirse al material, a través del cual vaya a presentarse el deslizamiento. A este respecto ha de notarse que en muchas ocasiones será el residual el ángulo de resistencia que se deba considerar en los perfiles de lutitas interestratificadas con areniscas.

La figura VI – 16 muestra algunos perfiles típicos de lutitas y areniscas, así como los problemas de estabilidad de taludes que con más frecuencia se pueden generar

Se ven en la figura los tipos de deslizamientos (A y B) que son más comunes en estos perfiles y que están siempre asociados a estructuras heredadas, abertura de diaclasas en las areniscas por aumento de presión de poro, zonas de debilidad asociadas a la estratificación, problemas derivados de la expansión de las lutitas o rupturas y erosiones debajo de los bloques de las areniscas.

Como ya se dijo el agua subterránea y su flujo desempeñan un papel fundamental en la estabilidad de los suelos residuales.

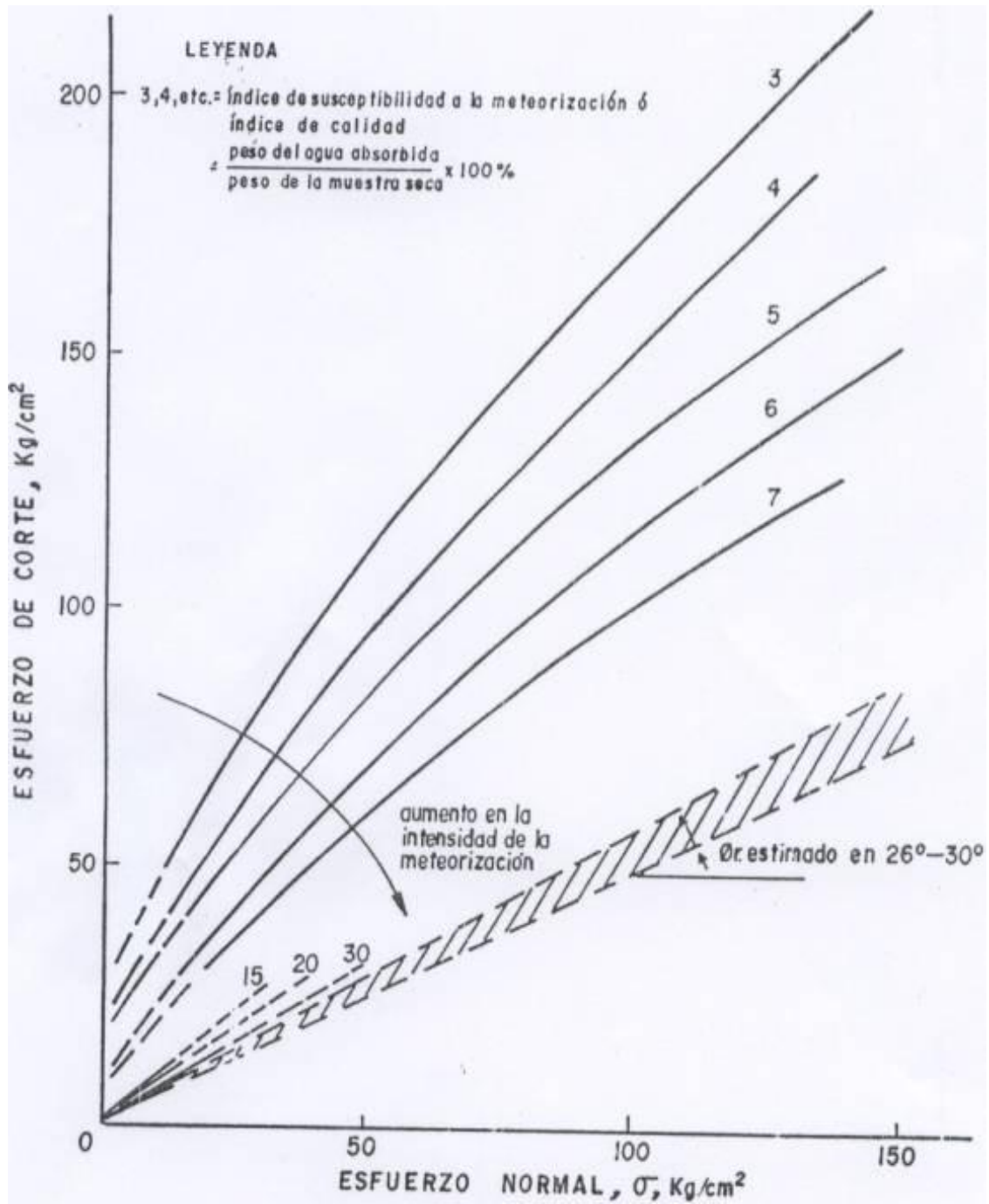


Perfiles de meteorización típicos y problemas de estabilidad en lutitas interestratificadas con arenisca.

Los sistemas de flujo subterráneos suelen recordar a los de flujos superficial que los sobreyace y que reconocen a los valles principales y los grandes ríos como lugares de descarga, pero cuando hay variaciones importantes en la permeabilidad de formaciones relativamente profunda, los sistemas de flujo pueden hacerse muy completos y difíciles de definir para el ingeniero, aun con el auxilio de la geología. Es seguro que el estado más crítico se tenga en grandes cortes en que exista una cobertura de suelos altamente meteorizados e impermeables coexistiendo con la tendencia natural del agua a aflorar en el frente del corte; este caso es especialmente desfavorable cuando los suelos residuales o rocas meteorizadas, en forma parcial bajo la cobertura impermeable conservan estructuras heredadas con orientación adversa. Con frecuencia se desarrollan presiones importantes en las zonas de rocas parcialmente meteorizadas, en las que no es raro que el nivel piezométrico se eleve aun por encima del nivel natural del terreno.

Las estructuras heredadas consisten en diaclasas, exfoliaciones, juntas, grietas, fallas y otros defectos estructurales que muestra el suelo como herencia de los que tenía la roca original. Su influencia es tal que con frecuencia la resistencia al corte del material intacto no puede considerarse en absoluto representativa de la del conjunto. En mayor o menor grado, casi la totalidad de los deslizamientos profundos están relacionados con defectos estructurales heredados por los suelos residuales actualmente presentes. La peligrosidad de las discontinuidades se incrementa cuando se encuentran rellenos de suelos arcillosos. En general la resistencia al esfuerzo cortante disminuye cuando aumenta el grado de meteorización del material componente.

Envolturas de resistencia al corte en granito meteorizado "intacto".



La figura muestra este fenómeno en especímenes de rocas meteorizadas en grado creciente (en las curvas se señalan los valores del índice de susceptibilidad en cada caso); los especímenes corresponden a fragmentos “Intactos”, es decir, no representan la resistencia del conjunto, afectada de estructuras heredadas.

En realidad el problema básico estriba en estimar la resistencia del conjunto, tomando en cuenta la estructura y la condición de los materiales “In Situ”. La información disponible al respecto es poco consistente, pues procede de métodos diferentes, tales como pruebas de laboratorio en muestras que contienen irregularidades, referidas en ocasiones a esfuerzos totales y en otras a efectivos, pruebas directas de campo o cálculos realizados sobre deslizamientos ya ocurridos. Tal parece que la dirección de la irregularidad o fractura desempeña un papel importante, sobre todo si el deslizamiento a lo largo de ella a de tener lugar remontando o descendiendo; desde luego que también influye el grado de meteorización del suelo o la roca y, finalmente, la presencia de agua en la irregularidad y su estado de presiones. Dado que los envolventes de resistencia suelen ser curvas que se aproximan en líneas rectas, la envolvente de trabajo que finalmente se obtenga dependerá del intervalo de esfuerzo con que se hayan ejecutado las pruebas, lo cual produce serias confusiones al interpretar los valores de C y φ extraído de dicha envolvente, en especial cuando haya de compararse los resultados obtenidos por diferentes investigaciones para poder llegar a conclusiones de carácter general. En este sentido los valores del ángulo de resistencia residual son particularmente útiles por evitar la anterior pluralidad de resultados. Sin hacer a un lado todas las limitaciones señaladas, la tabla VI -2 recoge, alguna información general que pudiera resultar útil como norma de criterio, pero que no evitara el estudio particular de cada caso en que haya de analizarse las condiciones de estabilidad de un corte dado o de una ladera natural específica.

Probablemente la mejor manera de diseñar taludes en suelos residuales es con el ejercicio de un criterio basado en experiencia previa, que tenga en cuenta el perfil de meteorización, la naturaleza de las estructuras heredadas y el régimen local de aguas subterráneas. Es difícil imaginar una exploración suficientemente completa y un programa de pruebas de laboratorio lo bastante racional para permitir un diseño fundamentado exclusivamente en el cálculo.

PARAMETROS TÍPICOS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE ED SUELOS RESIDUALES Y ROCAS PARCIALMENTE METEORIZADAS.

Tipo de roca o suelo	Intensidad de la meteorización	Parámetros de Resistencia			Φ_r (residual)	Criterio para la obtención	
		Cu, cohesión (esfuerzos totales) Kg/cm2	φ_u , ángulo de resistencia (esfuerzos totales)	Φ (esfuerzos efectivos)			
Rocas metamórficas	Sano	12.5	60°	-	-		
	Medianamente descompuesto.	8	35°	-	-		
	Muy descompuesto	4	29°	-	-	Pruebas de corte directo con contacto roca-concreto.	
	Muy descompuesto (Zona Falla)	1.5	27°	-	-		
	Ganéis	Descompuesto	-	18.5°	-	-	Pruebas rápidas consolidadas
		Parcialmente meteorizado	0.7	35°	-	-	Análisis a partir de deslizamientos normales a la esquistosidad .
		Meteorizado	-	24.5°	-	-	
Esquistos		Medianamente meteorizado	-	-	15°	-	Prueba rápida consolidada con grado de saturación al 50% y al 100%.
	Meteorizado	-	-	21°	-		
Filitas	Meteorizado	-	26°-30°	-	-	Pruebas de corte directo en pedraplén compactad.	
	Suelo residual	0	24°	-	-	Análisis de deslizamiento perpendicular a la esquistosidad .	

Filitas	Suelo residual	0	18°	-	-	Análisis de deslizamiento paralelo a la esquistosidad.
Rocas Igneas						
	Índice de Calidad (fig.VI-17)					
	3	6.13	62°-63°	-	-	Pruebas de corte directo en el lugar.
	5	5	57°	-	-	
	7	3	49°-52°	-	-	
	10	2	45°	-	-	
	15	1	41°	-	-	
Granito	Relativamente sano.	-	-	-	29°-32°	Pruebas de corte directo en el laboratorio.
	Parcialmente meteorizado.	-	-	-	27°-31°	
	Meteorizado	-	-	-	-	
	Muy descompuesto.	-	-	-	26°-33°	
	Suelo residual.	0	-	35°	-	
		-	25°-34°	-	-	
		-	-	28°	-	
		-	-	-	-	
Diorita	Descompuesta	0.1	30°	-	-	Pruebas rápidas consolidadas.
	Parcialmente meteorizada	0.3	22°	-	-	
Riolita	Descompuesta	-	-	30°	-	
Rocas Sedimentarias						
Marga	Sana	-	-	>40°	23°-32°	Pruebas lentas y rápidas consolidadas.
	Medianamente meteorizada	-	-	32°-42°	22°-29°	
	Altamente	-	-	-	-	

	meteorizada.	-	-	25°-32°	18°-24°	
Arcilla (londres)	Meteorizada	-	-	19°-22°	14°	
	No meteorizada	-	-	23°-30°	15°	
Materiales relleno de grietas	Arcilla negra fisurada.	-	-	-	10.5°	Pruebas rápidas consolidadas.
	Arcilla negra no fisurada.	-	-	-	14.5°	
Suelos y Minerales						
Arena Cuarzosa		-	-	-	30°-35°	-
Caolinita		-	-	-	12°	-
Ilita		-	-	-	6.5°	-
Montmorilinita		-	-	-	4°-11°	-
Muscovita		-	-	-	17°-24°	-
Mica hidratada		-	-	-	16°-26°	-

Ábaco de Taylor para suelo homogéneo y saturado

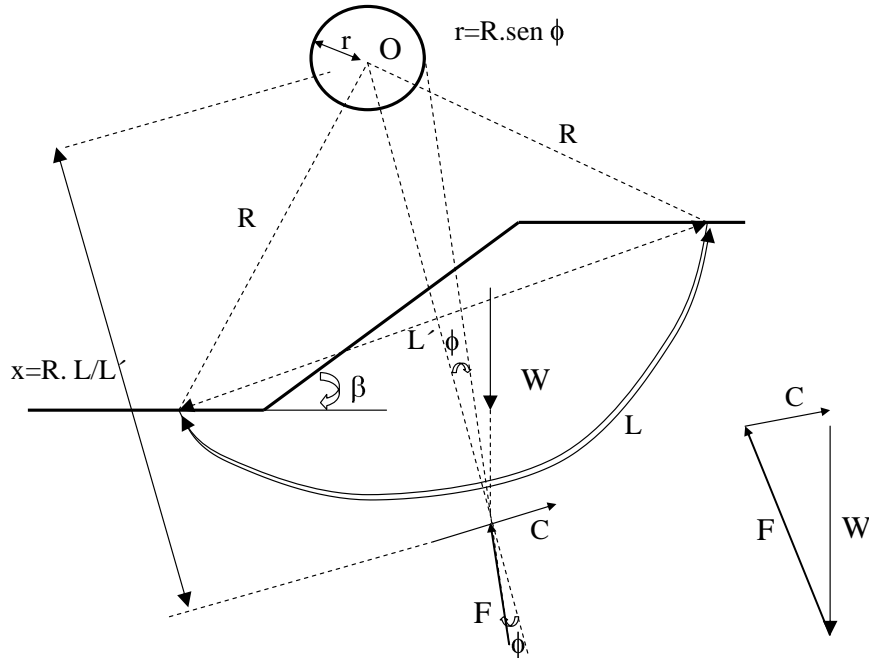
$$m = \frac{c}{(F.S.).H.\gamma} \quad \text{Coeficiente de estabilidad de Taylor}$$

Cuando se quiere utilizar este método en suelos cohesivos-friccionales saturados, Taylor plantea un gráfico a partir del coeficiente de estabilidad y de la utilización de los círculos de fricción. **Soluciones pre-informática.**

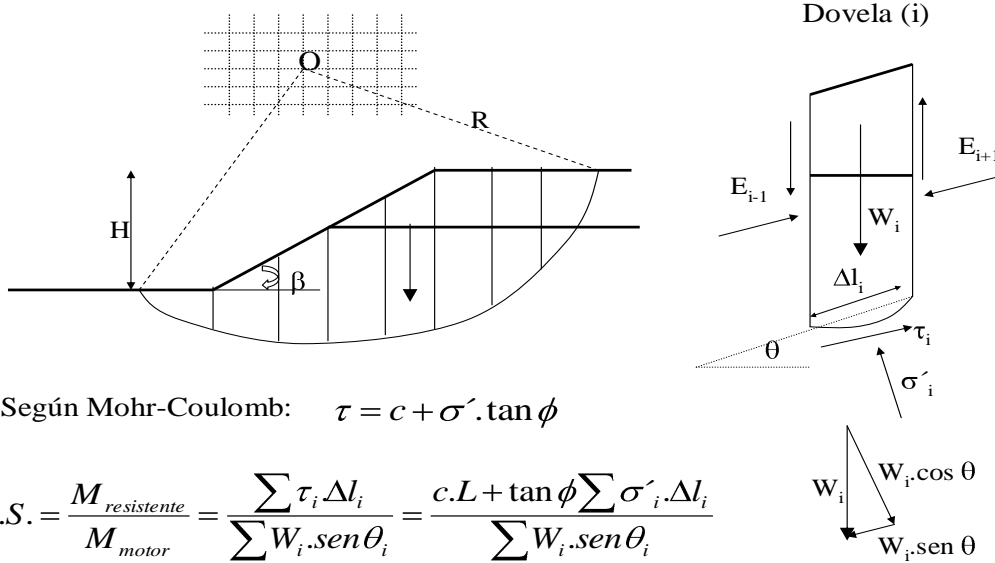
Para suelo homogéneo existen tres variables: m , ϕ y β

Se plantea un determinado F.S. global, el cual debe ser el mismo que el F.S. tomado para c y para ϕ . La solución se alcanzará cuando se tenga el mismo coeficiente de seguridad para los parámetros que para el conjunto.

Método del círculo de fricción



Cálculo de estabilidad – Suelos cohesivo friccionales en condición de drenaje - Método de las dovelas simplificado



Cálculo de estabilidad – Suelos friccionales en condición de drenaje

Granular seco: Superficie de falla plana y paralela al talud. Masa que desliza es de pequeño espesor.

Si se moviliza rota la resistencia al corte, el talud será estable si $i = \phi$. Donde i es el **ángulo de reposo**.

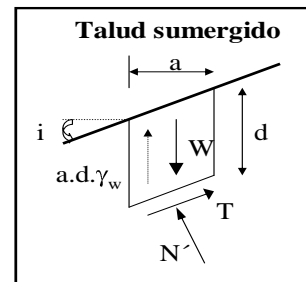
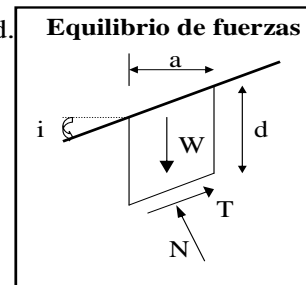
Talud granular sumergido: No existe flujo de agua en el interior.

El talud es estable para $i < \phi$.

En general: El ángulo de fricción para el cual comienza el deslizamiento está relacionado con el $\phi_{m\acute{a}x}$ (dependiendo de su i inicial). Si el material queda suelto, $\phi = \phi_u$.

$$F.S. = \frac{\tan(\phi)}{\tan(i)}$$

El flujo de agua reduce la estabilidad del talud.



Verificación de la estabilidad para distintos estados

Si el suelo se encuentra saturado se puede optar entre cálculos en tensiones efectivas y en tensiones totales.

Se deben tener presentes distintos cálculos de estabilidad según las distintas etapas: **final de la construcción**, **largo plazo con flujo en régimen establecido** (redes de flujo), **vaciado rápido** (elevadas presiones neutras).

Si se carga la masa de suelo, suele ser crítica la condición al final de la construcción. La estabilidad a largo plazo es crítica en masas de suelo en descarga. Para determinar cual situación es la crítica, se debe estudiar la forma de variación de las presiones neutras con el tiempo.

Verificar la fundación de presas o terraplenes sobre suelos blandos.

Se pueden ajustar los parámetros considerados en un proyecto a partir de la observación del comportamiento de terraplenes de prueba debidamente instrumentados (monitoreo de deformaciones y presiones neutras).

Elección del método de cálculo

Caso	Método	Observaciones
Final de la construcción con suelo saturado; periodo de construcción corto respecto al de consolidación	Cálculo con S_u ($\phi=0$) Resistencia no drenada	El método c, ϕ permite comprobaciones mediante las presiones neutras reales
Estabilidad a largo plazo	Método c, ϕ con presiones neutras deducidas de las condiciones de equilibrio del agua freática	
Estabilidad en fases intermedias	Método c, ϕ con presiones neutras estimadas	Las presiones neutras reales deben determinarse <i>en sitio</i>

DISEÑO DE TALUDES, TERRAPLENES O MUROS SOBRE SUELOS CON ADECUADA CAPACIDAD DE CARGA

En este inciso se describen, a grandes rasgos, los puntos críticos en el diseño de un terraplén, talud o muro.

Primeramente se sugiere abandonar el concepto de que el uso de suelos “baratos”, tipo tepetate es lo más económico para las obras. Este tipo de suelos “baratos”, debido a sus propiedades mecánicas mediocres genera empujes más altos hacia las estructuras de retención y, sobretodo, acumula agua, la cual genera empujes hidrostáticos que son altísimos, ya que equivalen a más del doble de los que generan los empujes de tierras y las sobrecargas. Estos empujes hidrostáticos resultan ser los causantes del 92% de las fallas de muros, terraplenes y taludes.

Se recomienda, en cualquier muro, utilizar arenas (gruesas, no finas) o gravas, SIN FINOS.

La principal recomendación es el diseñar muros, taludes y/o terraplenes, con drenaje libre, es decir, contruidos con material granular, sobre suelos con adecuada capacidad de carga, incompresibles.

En segundo lugar se recomienda una longitud de refuerzo, del refuerzo primario, igual a la altura del muro, terraplén o talud por reforzar.

La separación del refuerzo primario puede variar, dependiendo de su resistencia, aunque se sugiere no hacerla mayor a 0.50 m, para conseguir, de esta manera, una excelente interacción entre suelo y refuerzo.

El refuerzo secundario podrá ser una georred biaxial o un geotextil, especialmente cuando estos se usen, además, para formar el “encapsulado o arroyo” del suelo que se está conformando en forma de terraplén, talud o muro.

Un último punto de máxima importancia es el drenaje y subdrenaje de la estructura: canalizar el agua superficial, que no se acumule en el respaldo o en la estructura misma, para evitar la creación de presiones hidrostáticas. Este puede lograrse por cunetas, contracunetas, drenes de chimenea, drenes de penetración, plantillas drenantes, etc.

PRINCIPALES SUPOSICIONES EMPÍRICAS

Las suposiciones básicas que se deben de utilizar para el diseño empírico son las siguientes:

1. Los suelos de cimentación por debajo del pie del talud son estables e indeformables, y cualquier inestabilidad potencial deberá quedar limitada por el tipo de suelo del relleno, un suelo friccionante, por arriba del nivel de desplante, que evite la generación de presiones de poro.
2. El nivel de aguas freáticas deberá estar por debajo del pie del talud.
3. Las propiedades del suelo quedarán determinadas a través de su peso volumétrico γ , y su ángulo de fricción reducido ϕ' (grados). El ángulo ϕ de un suelo friccionante es de 30° .
4. No se presentarán cargas adicionales en el talud, debidas a sismo.
5. El refuerzo primario se logrará a base de algún geosintético: geotextil o georred.
6. La longitud del refuerzo será igual a la altura del terraplén, talud o muro por reforzar.
7. Todos los refuerzos son de la misma longitud
8. En el caso de muros, la excentricidad de la base debe caer en el tercio medio del ancho L.
9. El número de capas de refuerzo mínimas N_{\min} se puede calcular como sigue:

$$N_{\min} \geq (P/LTADL) = (1/2 K \gamma H^2) / (LTDAL),$$

Donde el término LTADAL representa la *carga de diseño a largo plazo* (esfuerzo de trabajo permisible) en los geosintéticos.

10. El factor de seguridad mínimo FS para taludes con suelo reforzado es de 1.5, en análisis estáticos y 1.1 en análisis sísmicos.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA TALUDES Y TERRAPLENES SOBRE SUELOS CON ADECUADA CAPACIDAD DE CARGA

Si se desea hacer un calculo adecuado, llevado a cabo por un ingeniero geotecnista, deberá procederse primeramente a una exploración, muestreo y análisis del suelo, para luego continuar con el análisis, que podrá ser por cualquiera de los métodos que siguen o analizarlo por uno de ellos y revisarlo por medio del otro:

1. análisis de Cuña,
2. análisis de falla circular (Bishop modificado).

Estos dos métodos, a detalle, pueden consultarse en el Manual de Diseño Geotécnico, Capítulo 8, Geosintéticos, editado por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., 2002.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y ASENTAMIENTOS DE TERRAPLENES, TALUDES Y MUROS DESPLANTADOS SOBRE SUELOS CON BAJA CAPACIDAD DE CARGA

El análisis y diseño de terraplenes, taludes y muros desplantados sobre suelos con baja capacidad de carga puede simplificarse al revisar los siguientes cuatro mecanismos potenciales de falla:

1. Falla por capacidad de carga del suelo de cimentación.
2. Inestabilidad global con propagación de la falla, dentro y a través del suelo de cimentación.
3. Deslizamiento lateral del terraplén, debido a la falla de los materiales que conforman el cuerpo del terraplén sobre la capa de refuerzo o deslizamiento de los materiales que conforman el cuerpo del terraplén y el refuerzo directamente sobre la superficie del suelo de cimentación.
4. Asentamientos muy grandes, intolerables o excesivos.

En este caso se considerará que los suelos de cimentación son cohesivos, saturados, con baja resistencia al corte, no drenada, C_u y/o suelos compresibles que tienden a consolidarse o, de cualquier manera, que tienden a comprimirse bajo el peso del terraplén. Los suelos que conformarán el cuerpo del terraplén se supondrán puramente friccionantes (arenas y/o gravas con $c' = 0$, $\phi' \neq 0$) sin presiones de poro.

Los tres primeros mecanismos potenciales de falla se analizan de manera rutinaria, usando métodos de equilibrio límite. El análisis de los asentamientos se hace usando las teorías de la elasticidad lineal y la de la consolidación unidimensional.

Los análisis de equilibrio límite que se describen en este inciso se aplican a la etapa final de la construcción y suponen que el relleno del cuerpo del terraplén se coloca de manera muy rápida. Como resultado del drenaje, de la consolidación y de la compresión, el factor de seguridad contra la inestabilidad podría incrementarse con el tiempo, luego de terminada la construcción del terraplén. La función primaria del refuerzo, en los cálculos que aquí se describen, es el asegurarse de que el factor de seguridad contra una falla catastrófica del talud es adecuado, durante la construcción e inmediatamente después de la construcción.

Un segundo beneficio del refuerzo es el facilitar la colocación de las primeras capas del material pétreo, que de otra manera no podría colocarse, ya que se hundiría el equipo de construcción.

Factor de Seguridad

El factor de seguridad mínimo contra la falla por capacidad de carga de un terraplén, talud o muro sobre un suelo blando, a corto plazo, debe ser mayor que uno ($FS \geq 1$). Para estratos potentes, el colocarle una capa de refuerzo no aumentará el factor de seguridad más allá del calculado para un talud sin refuerzo.

Para el caso en donde se encuentren factores de seguridad menores que uno, será necesario llevar un procedimiento de construcción muy cuidadoso, ejecutarlo por pasos, con bermas laterales, particularmente en el caso de turbas o rellenos suaves.

Otras estrategias podrían ser la preconsolidación, con o sin drenes verticales, la remoción de esos suelos blandos y su sustitución o bien la compactación in situ, pudieran ser adecuadas, sin embargo, los beneficios del uso de los refuerzos podría venir en el permitir la circulación sin problemas de la maquinaria de construcción, para levantar o construir el terraplén, empujando las capas de suelo sobre de la capa o capas de refuerzo. La pérdida de material, por incrustación, al comenzar un relleno sobre suelos blandos es muy alta, y el refuerzo permite dichos ahorros, además de permitir el iniciar adecuadamente el relleno.

También deberá de notarse que la compresión y la consolidación de los suelos blandos, una vez que el terraplén haya sido construido, aumentará el factor de seguridad contra la falla por capacidad de carga al paso del tiempo, por lo cual, la parte más crítica en la construcción de un terraplén sobre suelos blandos, será el final de la fase de construcción.

Estabilidad global

La estabilidad global involucra a las fallas superficiales que se extienden a través de todo el cuerpo del terraplén, del talud o del muro y por debajo del suelo de desplante. Debe siempre de realizarse un análisis de estabilidad global, de rutina, para todo tipo de terraplenes, taludes o muros, reforzados y no reforzados.

Si ocurre una falla por estabilidad global en un terraplén, talud o muro reforzado, deberá suponerse que una falla por sobreesfuerzo del material de refuerzo o una falla por adherencia contribuyeron al colapso del terraplén.

5.2.1 Análisis de falla circular

El análisis de la estabilidad global se facilita si se supone una superficie de falla circular. La metodología de este tipo de análisis de terraplenes sobre suelos blandos es idéntica a la de Bishop modificada, la diferencia radica en cómo usar dicho método.

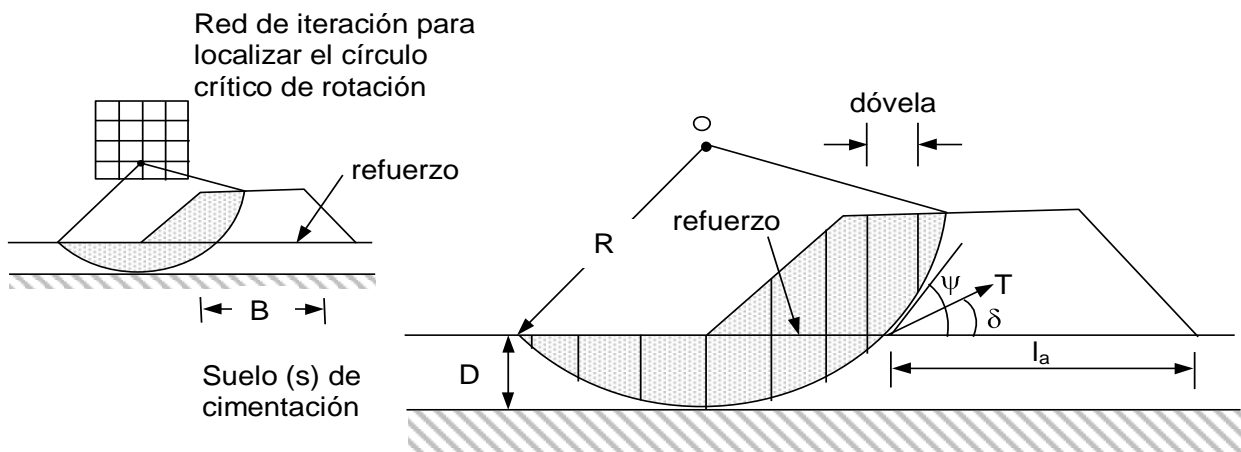
En el análisis de estabilidad de un terraplén, talud o muro sobre suelos blandos hay cuando menos dos tipos de suelos diferentes. La fuerza T que proporciona el refuerzo, en el punto de intersección de la superficie de la falla circular y el refuerzo, proporciona un momento estabilizador adicional. La orientación que se le de al vector en el cálculo de la estabilidad puede variar entre $0 \leq \delta \leq \psi$.

Aquí, el ángulo ψ es la orientación de la tangente del círculo en la intersección con la capa de refuerzo. La guía de la FHWA recomienda los siguientes valores para δ :

$\delta = 0$, para suelos frágiles, suelos muy sensitivos a deformaciones, por ejemplo, algunos suelos marinos.

$\delta = \psi/2$ para $D/B < 0.4$ y para suelos de moderado a alta compresibilidad, por ejemplo, arcillas suaves y turbas.

$\delta = \psi$ para $D/B > 0.4$ y para suelos altamente compresibles, por ejemplo, arcillas suaves y turbas y para refuerzos de alta elongación, tipo geotextiles no tejidos, con elongaciones $\epsilon_d > 10\%$ y mayores deformaciones tolerables.



Análisis de deslizamiento circular para terraplenes sobre suelos suaves, con propiedades de resistencia constante.

Deben de analizarse un gran número de círculos de falla potenciales, de manera rutinaria, para determinar el círculo crítico y la magnitud del factor de seguridad mínimo que corresponda a ese terraplén.

La mayoría de los programas comerciales hacen este trabajo, con y sin refuerzo, buscando siempre el círculo crítico y el factor de seguridad mínimo; consideran una geometría simple, una carga uniformemente repartida, un suelo de cimentación homogéneo, un cierto tipo de material de relleno del cuerpo del terraplén y no consideran la presencia del agua freática.

La FHWA recomienda los siguientes factores de seguridad mínimos para la estabilidad de los terraplenes, usando el método circular:

Al final de la construcción: FS = 1.3
 A largo plazo: FS = 1.5

Sin embargo, la selección del factor de seguridad debe basarse en las recomendaciones del ingeniero geotecnista responsable del diseño y que, además, debe de conocer perfectamente las condiciones del sitio, las cargas, los métodos constructivos y la función que desempeñará el terraplén.

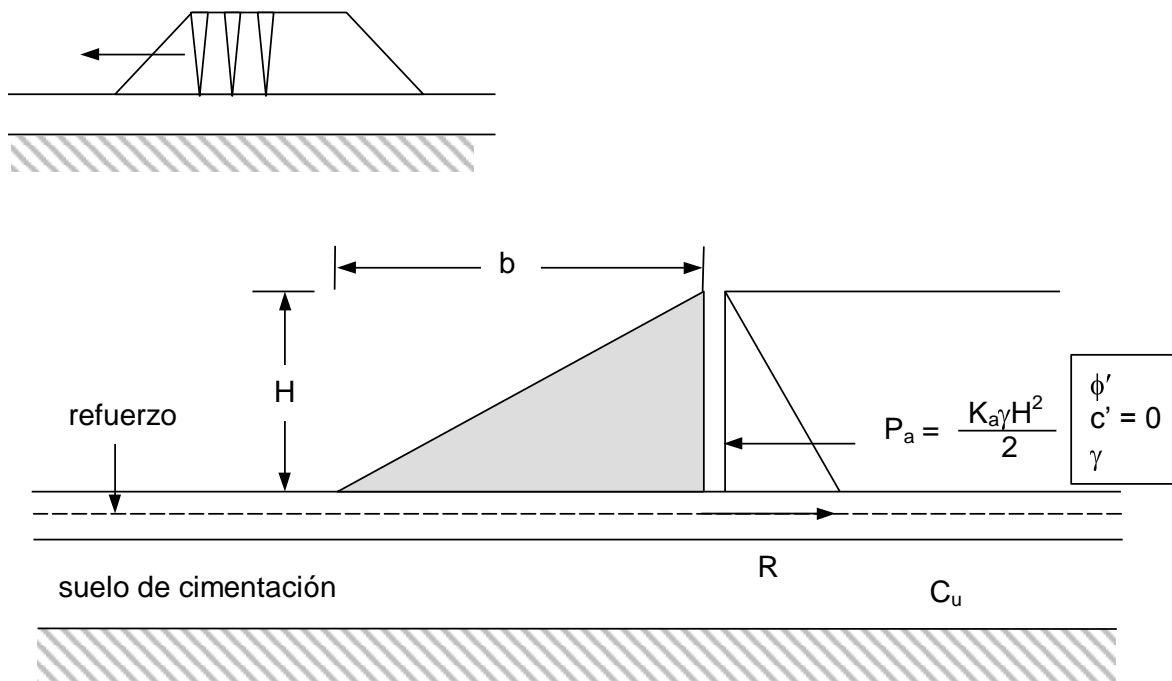
Deslizamiento lateral del terraplén

Se puede presentar una inestabilidad horizontal del terraplén si:

1. desliza sobre del refuerzo o;
2. falla el refuerzo por un sobre esfuerzo y el relleno desliza a lo largo del suelo de desplante.

Para evitar estas fallas, la resistencia R debe de ser mayor que el empuje activo P_a (Fig. 5.2). Aquí R es la menor de las resistencias debidas a:

1. el deslizamiento del geosintético y,
2. la adherencia de la cimentación y la carga de tensión en el refuerzo.



R = resistencia al deslizamiento debidas a (i) deslizamiento sobre el geosintético, o (ii) adherencia de la cimentación y la carga de tensión al refuerzo.

Análisis de estabilidad para taludes reforzados desplantados sobre suelos de cimentación suaves (según Bonaparte y Christopher, 1987).

Para prevenir una falla lateral, el refuerzo de diseño deberá trabajar sin una carga excesiva, que lleve a grandes deformaciones en la base del terraplén; entonces, el módulo de rigidez del geosintético que se utilice como refuerzo es muy importante.

Asentamientos del terraplén

Debe de esperarse siempre, sin importar el refuerzo, que un terraplén desplantado sobre suelos compresibles tenga asentamientos. Si los suelos de desplante son arcillas o limos suaves, saturados, compresibles, sus asentamientos estarán ligados al tiempo, a la consolidación, primaria y secundaria. Se supondrá que los asentamientos elásticos sean inmediatos y ocurran siempre durante la etapa de construcción; se calculan con la teoría de elasticidad lineal.

El uso de un geosintético de refuerzo no tendrá ninguna influencia sobre la magnitud de los asentamientos por consolidación que genere un terraplén; este se hundirá de la misma manera, exactamente lo mismo, con y sin el refuerzo, pues la magnitud de los asentamientos depende solamente del suelo de desplante.

Normalmente se aconseja utilizar un geotextil de alta resistencia como separador entre el suelo de desplante y el cuerpo del terraplén, lo que le permite tomar deformaciones locales y roderas, que se forman debidas al mismo procedimiento constructivo y que pueden reducirse. En algunos casos, la función más importante del geosintético en un terraplén es el permitir la colocación de los primeros metros del material de relleno sobre del un suelo de desplante compresible, suave, deformable.

Los cálculos de los asentamientos, inmediatos, mediatos y a largo plazo, para terraplén reforzados se realizan con las mismas teorías que generalmente se usan para un terraplén sin refuerzo.

Selección de resistencias de diseño permisibles, a largo plazo

El efecto de refuerzo de las capas de geosintéticos en un terraplén sobre suelos blandos se requiere solo hasta que los suelos sobre los cuales se desplantó, se consoliden y ganen resistencia. Luego de ello, la resistencia a largo plazo se vuelve mayor en un talud sobre suelos suaves que en cualquier otra aplicación en la cual se espera que el efecto del creep persista durante toda su vida útil.

Consideraciones adicionales

Si se utilizara como refuerzo una georred, se deberá siempre colocar un geotextil no tejido debajo de ella. El geotextil trabajará como filtro y separador, minimizando la mezcla y “contaminación” del material natural con el material de banco que se use en la formación del cuerpo del terraplén.

Otras aplicaciones

Terraplén sobre vacíos

Los geosintéticos de refuerzo se usan también para “puentear” vacíos o huecos al rellenar sobre de materiales heterogéneos, como es el caso de pedraplenes o donde se usen materiales producto de corte colocados directamente en el cuerpo de un terraplén o bien sobre sitios rellenados con “cascajo” o desperdicios de la construcción y demolición.

Estos terraplenes siempre darán origen a deformaciones, principalmente con el agua de lluvia, al arrastrar suelos finos hacia los vacíos que dejan los gruesos.

Otro caso es el de los rellenos sanitarios, en donde, al paso del tiempo, al formarse la composta, al descomponerse los sólidos, se generan vacíos. Aquí los geosintéticos de refuerzo tienen un papel importante al puentear la carga sobre de tales oquedades.

Estos cálculos no se presentan aquí, pero pueden buscarse en algunas referencias como Giroud et al, 1990 y Morales R., 2000.

Exploración y selección de parámetros de diseño

Las propiedades de los suelos, así como los parámetros de diseño pueden obtenerse y desarrollarse por un ingeniero geotecnista que esté familiarizado con terraplenes y taludes.

Para un adecuado diseño de suelos, taludes y terraplenes reforzados deberán de realizarse trabajos de exploración y muestreo en campo, obteniendo una clara estratigrafía, sobretodo en donde existan suelos erráticos. Es importante determinar con precisión el nivel de aguas freáticas y las presiones piezométricas en la vecindad. Debe de reportarse la presencia de cualquier flujo peligroso, gases o actividad microbológica.

El diseño, construcción, comportamiento y seguridad de un suelo reforzado se garantizan y simplifican al utilizar como material de construcción un suelo del tipo friccionante, sin finos. Cuando no existiese más que suelos cohesivos, el ingeniero diseñador deberá de utilizarlos con muchos cuidados, tratando de que presenten la menor cohesión y plasticidad posibles, además de garantizar el drenaje por medio de drenes y subdrenes de tipo prefabricados, a base de geocompuestos. En muchos casos, para el análisis, será prudente el despreciar la cohesión.

Los suelos cohesivos, saturados, sobre los que quede desplantada la estructura, tenderán a consolidarse bajo el efecto de la sobrecarga. Deberá de reportarse el valor de la resistencia al esfuerzo cortante no drenada, no consolidada. Estos valores podrán usarse para calcular el valor a corto plazo del terraplén. Un análisis con esfuerzos totales conllevará a un factor de seguridad mínimo contra el colapso del terraplén.

Con la consolidación aumentará la resistencia del suelo de desplante y con ello el factor de seguridad contra el colapso de la estructura, que deberá de aumentar con el tiempo.

Cuando se anticipe una precarga, el ingeniero de diseño deberá de efectuar análisis de laboratorio para determinar los nuevos pesos volumétricos del suelo de desplante, así como las presiones de preconsolidación, relaciones de compresión y recompresión, coeficientes de cambios volumétricos y coeficientes de consolidación, primaria y secundaria; los que apliquen.

Se podría utilizar la teoría de la consolidación para determinar el tiempo en que se alcance el asentamiento del terraplén. Los detalles pueden obtenerse directamente de cualquier libro de Mecánica de Suelos, en el inciso correspondiente a Consolidación.

La presencia, probabilidad y magnitud de la actividad sísmica en el sitio donde se construirá el terraplén, muro o talud, deberá de ser evaluada. Como un mínimo, el diseño por sismo deberá de considerar las aceleraciones horizontal y vertical.

Propiedades del refuerzo de diseño

Para un adecuado diseño, al momento de seleccionar el refuerzo, debería uno de formularse las siguientes preguntas:

- ¿Qué resistencia deben tener?.
- ¿Cuánta deformación se deberá de aceptar para que empiecen a trabajar?.
- ¿Podrá el suelo circundante desarrollar tal resistencia?.
- ¿Habrá algún factor ambiental que afecte la resistencia?.

Estas cuatro preguntas se contestan al incorporar en el diseño la resistencia a largo plazo LTADL, el coeficiente de interacción C_i y la resistencia a la adherencia C_g . Estos parámetros los definen las distintas compañías que producen y comercializan los geosintéticos y debe consultarse la ficha individual de cada producto, como se hace con el acero, o los cementos, al momento de diseñar.

En el Anexo A se presentan, a manera ilustrativa, algunas georredes que se comercializan en nuestro país.

Carga de diseño permisible, a largo plazo

La resistencia a largo plazo LTADL de un refuerzo, es equivalente a su carga de trabajo, sin embargo, la deformación límite de servicio (permisible) en dicho refuerzo, el cual generalmente es proporcional a la deformación del suelo en una estructura térrea (talud, terraplén, muro, etc.), es la que determina el LTADL. El comportamiento ante el creep es la primera propiedad mecánica para establecer la deformación límite de servicio de dicho refuerzo. Los efectos ambientales tienen una influencia muy secundaria en el LTADL, para la mayoría de los proyectos.

El LTADL para los geosintéticos, se calcula como sigue:

$$LTADL = US \times CF \times DF \times SDF \quad (7.1)$$

donde:

US =	Resistencia a la tensión última	(inciso 7.1.1)
CF =	Factor de reducción por creep	(inciso 7.1.2)
DF =	Factor de reducción por durabilidad	(inciso 7.1.3)
SDF =	Factor de reducción por daño in situ	(inciso 7.1.4)

En el Anexo A se presentan, a manera ilustrativa, algunos valores de LTADL de algunos productos que comercializa una de las tantas compañías de geosintéticos.

Resistencia a la tensión última (US)

La resistencia a la tensión última y el comportamiento carga – deformación del refuerzo, se determinan a través de la denominada prueba ancha (ASTM D 4595), la cual no se ve afectada por el efecto de sus fronteras u orillas, como pasa con una muestra más delgada, aunque, como todos los polímeros, esta resistencia varía por efectos de la temperatura y velocidad de carga.

Factor de reducción por creep y deformación límite de servicio (CRF)

Para taludes y terraplenes de suelo reforzado, la deformación límite de servicio (recomendada), varía entre 2% y 5%, aunque se pueden tolerar valores hasta del 10%.

Factor de reducción por durabilidad (DF)

Para establecer un adecuado factor de reducción por durabilidad, la Environmental Protection Agency, EPA, estableció el protocolo EPA 9090 que los geosintéticos de refuerzo debieran cumplir con ser expuestos al medio ambiente, a ataques microbiológicos, a los rayos ultravioleta, a hidrólisis y a una gran cantidad de pruebas con soluciones químicas, sometidas a altas temperaturas. Los poliésteres de alto peso molecular lograron conservar hasta el 90% o más de su resistencia original, por lo cual se les permite usar un factor de reducción por durabilidad $DF = 0.9$. Para redes de polipropileno, deberá de utilizarse un mayor factor de reducción DF.

Factor de reducción por daños en el sitio (SDF)

Este factor varía de acuerdo con el tipo de polímero (poliéster, polipropileno, polietileno, etc.) del que esté fabricado el refuerzo, así como del recubrimiento que presente (pvc u otro). La abrasión es el agente más destructivo que se encuentra en las obras y varía de acuerdo al tipo de suelos que se manejen: en los suelos friccionantes la reducción de la resistencia por daños del geosintético de refuerzo puede ser hasta un 80%, mientras que en suelos cohesivos puede ser hasta 90% del original. Este factor ya ha sido aplicado por cada fabricante a su valor de LTADL que presenta en cada uno de sus productos, en sus fichas técnicas.

Coefficiente de interacción del esfuerzo cortante (C_i)

El coeficiente de interacción por resistencia al esfuerzo cortante C_i define la proporción de la capacidad disponible de esfuerzo cortante del suelo que puede actuar al momento que el geosintético le haga la transferencia de cargas. Este parámetro es crítico al determinar la resistencia a la extracción o pullout T_{ad} de un refuerzo a lo largo de una longitud de anclaje l_a . Los valores de C_i están dados por cada fabricante, en su ficha de datos técnicos.

FACTORES QUE PRODUCEN FALLAS DE ESTABILIDAD Y DESLIZAMIENTO

Los deslizamientos en taludes ocurren de muchas maneras y existe cierto grado de incertidumbre en su predicción. Sin embargo, conocer los deslizamientos que han ocurrido en el área de interés, constituye un buen punto para la detención y evaluación de potenciales deslizamientos futuros.

También resulta muy difícil establecer las causas de los deslizamientos pero se mencionan algunos de los procesos constructivos que comúnmente causan mas problemas:

1. Modificación de las condiciones naturales del flujo interno del agua al colocar rellenos o hacer excavaciones.
2. Sobrecarga de estratos débiles por relleno, a veces de desperdicios.
3. Sobrecarga de terrenos con planos de estratificación desfavorable por relleno.
4. Remoción por corte, de algún estrato delgado de material permeable que funciona como un manto natural drenante de estratos de arcillas suaves.
5. Aumento de presiones de filtración u orientación desfavorable de fuerzas de filtración al producir cambios en la dirección del flujo interno del agua por haber practicado corte o construido relleno.
6. Explosión al aire y al agua, por corte de arcillas duras fisuradas.
7. Remoción de capas superficiales de suelo por corte lo que puede causar el deslizamiento de capas del mismo estrato ladera arriba sobre mantos subyacentes del suelo mas duro o roca.
8. Incremento de carga hidrostática o niveles piezométricos bajo la superficie de un corte al cubrir la capa del mismo con una capa impermeable.

En general las causas de los deslizamientos pueden ser externas o internas las externas producen aumentos en los esfuerzos cortantes actuantes sin modificar la resistencia al esfuerzo cortante del material. El aumento en la altura del talud o al hacerlo mas escarpado son causas de este tipo también lo son la colocación de cualquier tipo de sobrecarga en la corona del talud o la ocurrencia de sismos.

Las internas son las que ocurren sin cambio en las condiciones exteriores del talud. Deben ligarse siempre a una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo constitutivo. El aumento de presión de poro o la disipación de la cohesión son causa de esta clase.

Principales parámetros que afectan el fenómeno de erosión, por lluvia		
<i>Acciones, directa o indirectamente erosivas</i>	<i>Parámetros inherentes a la lluvia o al clima</i>	<i>Parámetros inherentes al terreno o a la geometría del talud</i>
Impacto de las gotas.	Intensidad de la lluvia (hasta un límite). Velocidad del viento durante la tormenta.	Orientación del talud respecto a los vientos.
Escurrimiento superficial.	Intensidad de la lluvia y su duración.	Inclinación del talud. Área en la superficie expuesta del talud. Numero de surcos y torrentes que se formen. Coeficiente de escurrimiento. Velocidad del agua. Concentración de arrastre de sólidos.
Infiltración.	Duración de la lluvia.	Inclinación del talud. Porosidad, permeabilidad.
Humedecimiento y secado.	Alternancia de estaciones: seca y lluviosa. Intensidad de la acción solar. Pluviosidad.	Condiciones para la filtración (protección, permeabilidad, inclinación) y para la evaporación (orientación al sol, protecciones, etc.).

MÉTODOS MECANICOS PARA CORREGIR FALLAS EN TALUDES

Todos los métodos correctivos siguen una o más de las siguientes líneas de acción:

1. Evitar las zonas de falla.
2. reducir las fuerzas motoras.
3. Aumentar las fuerzas resistentes.

Evitar la zona de falla suele estar ligado a cambios en el alineamiento de la vía, sea el horizontal o el vertical; a la remoción total de los materiales estables o a la construcción de estructuras que se apoyen en zonas firmes, tales como puentes o viaductos.

La reducción de las fuerzas motoras se puede lograr, en general, por dos métodos: remoción de material en la parte apropiada de la falla y subdrenaje, para disminuir el efecto de empujes hidrostáticos y el peso de las masas de tierra, que es menor cuando pierde agua.

Por lo común, la línea de acción que ofrece mas variantes es la que persigue aumentar las fuerzas siguientes: algunas de estas son: el subdrenaje, que aumenta la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, la eliminación de estratos débiles u otras zonas falla potencial, la construcción de estructuras de retención u otras restricciones y el uso de tratamientos, generalmente químicos, para elevar la resistencia de los suelos al deslizamiento.

Los principales métodos para la corrección de fallas son:

A. Métodos de elusión

Indiscutiblemente constituyen los medios más seguros para eliminar los problemas derivados de deslizamientos y fallas, pero no siempre se puede utilizar. En otras ocasiones solo se podrá emplear parcialmente, en el sentido de que no se podrá evitar por completo una zona inestable, pero que un ligero cambio de alineamiento haga posible eludir su peor parte o mucha de la longitud de la vía dentro de la zona; en estos casos este tipo de soluciones pueden ser todavía más valiosos.

Uno de los problemas que mejor responden a la aplicación de estos métodos es el cruzamiento de formaciones inclinadas de suelo o roca, con echado desfavorable a la vía; en estos casos, cambios pequeños del alineamiento horizontal pueden llevar a zonas de menos peligro o inocuas y la elevación de la rasante puede reducir mucho los problemas.

En donde no sea posible evitar una zona de deslizamiento potencial o en la que haya ocurrido un deslizamiento, es a veces una buena solución evitar el problema por la construcción de un viaducto que se cimiente en las zonas firmes a ambos lados de la problemática.

B. Métodos de excavación

Este va desde excavaciones menores hechas solo en la cabeza de la falla, hasta la remoción total del material inestable.

La remoción de material en la cabeza de la falla o en todo el cuerpo de la misma, hasta llegar a la remoción total, es un método que en la práctica solo se puede emplear en fallas ya manifestadas, rara vez se puede conocer con tanto detalle las futuras fallas en una zona de inestabilidad potencial como para que resulte prudente proceder a remover materiales en gran escala. Las excavaciones en la cabeza buscan reducir las fuerzas motoras y balancear la falla, las remociones totales eliminan la causa de raíz.

La remoción de material suele dar lugar a soluciones bastantes permanentes, cuando se cuidan en forma conveniente los aspectos de drenaje en la excavación que se efectúe. Son métodos mejores para prevenir que para corregir, pues los costos unitarios de los movimientos de tierra relativamente grandes que implican son menores en construcciones nuevas que en trabajos de reparación.

Cuando una remoción se hace bien debe mejorar las condiciones de drenaje en la zona. El método se puede utilizar prácticamente en todo tipo de deslizamiento, pero es eficiente sobre todo en los de tipo rotacional. Dejando a un lado consideraciones de costo, que puede ser alto en fallas grandes, su principal desventaja estriba en que el material que se excava se ha de desperdiciar y esto pudiera ser difícil y peligroso en algunos casos, aparte de la repercusión que tales maniobras tendrán en el costo de la solución. También contribuye a incrementar este último el hecho de que la excavación tenga que empezar en la parte más alta y progresar ladera abajo. Conviene mencionar como otro posible inconveniente, el que muchas veces al remover el material y disminuir las fuerzas motoras también puede causar disminuciones en las fuerzas resistentes; esto puede ser cierto sobre todo cuando se trata con suelos friccionantes, en que la resistencia al corte depende de la presión normal.

Una solución mixta, que combina la remoción de material y relocalización es el abatimiento de la rasante de un camino para disminuir pesos del terraplén sobre zonas de suelos débiles o con superficies de falla previamente formadas.

C. Abatimiento de taludes

Este es uno de los métodos más socorridos para el mejoramiento de las condiciones de la estabilidad de los taludes. Es un método correctivo ligado a deslizamientos en el cuerpo del talud. De hecho este es el primer punto a tomar en cuenta respecto a esta solución; al igual que todas las demás, no es de alcance universal, y su eficiencia no es siempre la misma, sino que puede variar extraordinariamente de unos casos a otros.

Un segundo punto que se debe comentar desde un principio es que cuando se considere un abatimiento de talud en un proyecto o en una falla que se presente en el campo, se debe tener muy presente que el talud abatido es diferente del original, con todo lo que ello implica. Por ejemplo, si al talud original se lo había determinado un círculo crítico por los procedimientos estudiados, el talud abatido tendrá otro círculo crítico y en consecuencia, el factor de seguridad, ligado a su círculo crítico.

En el caso de suelos puramente friccionantes, la estabilidad del cuerpo del talud depende solo del ángulo de inclinación, en tanto que, en suelos puramente cohesivos y homogéneos con terreno de cimentación, la estabilidad depende mas bien de la altura del talud (de hecho, para inclinaciones menores de 53° y falla de base, la estabilidad es independiente del ángulo de inclinación del talud, y para inclinaciones de los 53° hasta los 90° , las condiciones de estabilidad si varia con la inclinación del talud, pero relativamente poco). Naturalmente que la gran mayoría de los taludes de las vías terrestres se hacen en suelos cuya resistencia se considera una componente friccionante y otra de cohesión, pero las tendencias extremas anteriores pueden seguir sirviendo como norma de criterio. En suelos en que la componente friccionante tenga mas importancia relativa que la cohesiva, será de esperar que la estabilidad este mas bien ligada a la inclinación del talud, en tanto que en suelos de naturaleza mas cohesiva, sera la altura del talud, mas que su inclinación, la que defina las condiciones del mismo.

Lo anterior debe tomarse en cuenta a la hora de escoger entre las diversas soluciones de corrección de fallas de taludes en que pueda pensarse. En suelos en que sea mas importante la componente friccionante de la resistencia, abatir los taludes tendra a ser mas eficiente; en suelos cohesivos, quizás resulte mejor otros métodos, y que equivalen en cierto sentido, a trabajar con taludes de menor altura.

D. Empleo de bermas y escalonamientos

Se denomina bermas a masas generalmente del mismo material del propio talud o de uno similar que se adosan al mismo, para darle estabilidad.

El uso de bermas tiende a incrementar la estabilidad del talud por razones un tanto similares a las expresadas para el abatimiento de taludes; de hecho en muchos casos, la construcción de bermas equivale mecánicamente a un abatimiento del talud. Así, caben el empleo de bermas muchos de los conocimientos hechos para el abatimiento en taludes. Un talud con bermas también es diferente del original y tendrá otro círculo crítico, que se deberá determinar analizando la nueva sección.

La berma tiende a hacer que la superficie de falla, se desarrolle en mayor longitud y mas profunda, lo que produce efectos ya discutidos para el abatimiento. Además, el peso del material que se coloque podrá aumentar la resistencia al esfuerzo cortante del terreno de cimentación en su parte friccionante. En suelos cohesivos seguramente el efecto mas interesante de la berma es descomponer el talud en dos, cada uno de menor altura, lo que repercute mucho en la estabilidad general.

No se puede dar una regla que permita fijar a priori las dimensiones más convenientes para una berma en un caso dado. Su sección idónea habrá de calcularse por aproximaciones sucesivas, habiéndose fijado previamente el proyectista un factor de seguridad deseable para le talud en cuestión. Una buena base para el inicio de los tanteos suele ser darle a la berma la mitad de la altura del terraplén que estabilizara y un ancho del orden del de la corona de dicho terraplén.

En accesos a puentes y pasos a desnivel se usan a veces bermas frontales, desarrolladas según el eje de la vía

El escalonamiento constituye una solución similar a las bermas. El escalonamiento en suelos arcillosos lo que se busca es transformar el talud en una combinación de varios otros de altura menor, pues en este tipo de suelos, este es el factor determinante en la estabilidad. Por ello los escalones deberán tener huella suficientemente ancha para que puedan funcionar prácticamente como dos taludes independientes. En el caso de taludes con suelos con cohesión y fricción, el escalonamiento se hace sobre todo para provocar un abatimiento del talud; recoger caídos y coleccionar aguas son funciones secundarias, pero a veces muy importantes, que se asignan también a los escalonamientos.

El escalonamiento queda definido por el ancho de los escalones, la distancia vertical entre ellos y por el ángulo de los taludes intermedios.

El que los taludes de los respectivos escalones sean paralelos o se construyan con inclinación variable dependerá mucho de la condición del material constitutivo del corte. Escalones de inclinación variable son convenientes cuando el material tiene una capa superior alterada, pero su condición mejora claramente con la profundidad.

Es importante la función que pueden cumplir los escalones para proteger el corte contra la erosión del agua superficial, pues reducen la velocidad ladera abajo y el gasto de escurrimiento. Para ello es preciso que los escalones estén adecuadamente conformados; la mayor parte de las veces basta con que el escalón tenga una ligera inclinación hacia el corte, pero en terrenos muy erosionables pudiera llegar a convenir que se invirtiera su inclinación, haciéndola hacia la parte interna, que garantice la rápida eliminación de las aguas. Si la posible infiltración del agua de lluvia fuera muy de temer, se podría llegar a la precaución extrema de impermeabilizar toda la huella de los escalones.

El escalonamiento cumple con la función de detener pequeños derrumbes y caídos que puedan llegar a presentarse en los diversos taludes. En ocasiones esta condición, además del costo, gobierna su ancho. Tampoco existen reglas fijas para proyectar el escalonamiento de un corte y este deberá ser propuesto para cada caso particular. En el caso de suelos con cohesión y fricción, el perfil del escalonamiento debe ser tal que se llegue a una inclinación razonable para todo el corte considerando un talud simple que promedie a todos los escalones. La altura y el ancho de los escalones, aparte de la condición anterior y del costo, muchas veces se deben fijar por las consideraciones ya mencionadas de prevención contra la erosión superficial del agua y la detención de derrumbes. Es común que la huella de los escalones disminuya hacia arriba, lo mismo que el peralte.

E. Empleo de materiales ligeros

Esta solución es aplicable únicamente en terraplenes por razones obvias, y solo será eficiente sobre suelos puramente cohesivos, tales como arcillas blandas o turbas, pues en terrenos de cimentación friccionantes la ventaja del poco peso se neutraliza mucho por la poca presión normal que se produce, lo que a su vez da lugar a que el terreno responda con baja resistencia.

Basta decir que lo que se busca es la reducción de las fuerzas motora, empleando en el cuerpo del terraplén materiales de bajo peso volumétrico. El tezontle, espuma basáltica volcánica, con peso volumétrico comprendido por lo general entre 0.8 1.2 ton/m², ha sido muy utilizado para estos fines. Otros materiales, casi siempre de origen volcánico, resultan también apropiados; entre ellos figuran muchas arenas pumíticas.

El uso de materiales ligeros debe comprenderse claramente cuando se compacten los terraplenes, pues muchos de ellos se degradan estructuralmente por compactación muy enérgica y pierden su característica de materiales ligeros.

Otras soluciones en esta línea, tales como la sustitución de parte del terraplén por tubos o cajones huecos de concreto, resulta por lo común muy costoso, por lo que su uso es limitado.

F. La consolidación previa de suelos compresibles

Esta solución es a base de precarga. La consolidación previa del terreno de cimentación se puede lograr por alguno de los otros métodos mencionados.

G. Empleo de materiales estabilizantes

Un aspecto de esta solución es el añadir al suelo alguna sustancia que mejore sus características de resistencia. Este tipo de soluciones es más factible en terraplenes. Las substancias que mas normalmente se han añadido al suelo para el fin que se busca son cementos, asfaltos o sales químicas. Sin embargo, en la práctica estos procedimientos resultan caros, por lo que su uso es limitado.

En general se trata de añadir cimentación artificial a los granos del suelo. La mayor parte de lo procesos de inyección química que se han intentado utilizan mezclas químicas en que predomina el silicato de sodio, a partir del cual pueda formarse un silíceo para rellenar grietas, intersticios o vacíos en el suelo. Se ha dicho que estos métodos solo se pueden aplicar a suelos arenosos con diámetro efectivo de un décimo de milímetro como mínimo. La mayor parte de los reportes que hay en la literatura sobre estas técnicas se refieren a tratamientos temporales.

En forma muy excepcional se ha empleado el tratamiento térmico para estabilizar deslizamientos de tierras. El método fue descubierto por Litvinow. En esencia es un método de calcinación, en que se inyectan al suelo gases a más de 1000°C, para endurecerlo. Pueden lograrse radios de acción de 2 o 3 m en torno al tubo de inyección.

Otro método de endurecimiento de suelos consiste en inyectarles lechada de cemento. Se ha empleado sobre todo en construcción de ferrocarriles en Europa. En Inglaterra constituye un método popular, cuyo uso se extiende incluso en cortes y terraplenes en arcilla. Se reportan los mejores resultados formadas y relativamente superficiales, en materiales duros, tales como lutitas, argilitas y arcillas rígidas y fisuradas; no rinde buenos resultados en materiales flojos y sueltos.

El efecto de la inyección es desplazar al agua de las fisuras y rellenarlas con mortero de cemento, lo que forma un buen nexo de unión entre los bloques. No es un método que modifique las características intrínsecas de la masa de suelo, pues la lechada no penetra en él. La inyección debe comenzar con presiones mayores que la presión preexistente en el punto que se considera, lo que permite la penetración en las fisuras y en la superficie de falla ya formada.

También se han utilizado como materiales para inyectar emulsiones asfálticas, con las que se logra mejor penetración que con la lechada de cemento, por su menor viscosidad. El costo puede ser comparable o algo mayor a la inyección con cemento, si bien estas cifras relativas dependen mucho de la disponibilidad de asfalto o cemento que se tenga en el país en que se aplique la solución y, como es natural, también de la experiencia que haya en el manejo de uno u otro producto. El uso de las inyecciones asfálticas está fuertemente limitado por la posibilidad de flujo de agua interno, pues este puede remover fácilmente la película asfáltica.

Otro método de tratamiento de suelos para fines que se comentan es la congelación. Es un método lento y muy costoso, que solo se puede aplicar como tratamiento temporal.

La electroósmosis es otro método factible para mejorar las características de los materiales que componen un talud.

H. Empleo de estructuras de retención

El uso de muros en celosía, tablestaca y otras estructuras de retención es muy común para corregir deslizamientos después de que han ocurrido o para prevenirlos en zonas en que sean de temer. De hecho, su principal campo de aplicación está en la prevención.

El funcionamiento mecánico de esta solución es claro y probablemente no necesita mayor abundamiento; sin embargo, los resultados de su empleo han sido decepcionantes en muchos casos, razón por la cual conviene comentar algunos aspectos de su uso.

En primer lugar debe comprenderse que la estructura de retención ha de contener a la superficie de falla formada o por formarse; si esta contiene al muro, el efecto de este será nulo en la estabilidad general. Lo anterior lleva con frecuencia a muros muy altos, que han de enterrarse mucho en el terreno con la consiguiente elevación del costo de la solución.

Otra fuente común de mal funcionamiento ha sido el descuido del drenaje de la propia estructura de retención. Si este es siempre de fundamental importancia, resulta vital, por razones obvias, cuando el muro se relaciona con problemas de estabilidad de taludes.

Se debe tener en cuenta que una estructura de retención de costo razonable no incrementa demasiado la resistencia al deslizamiento del conjunto; si las fuerzas resistentes, la construcción del muro puede ser apropiada, pero si el desequilibrio es fuerte, lo más probable es que el muro no baste para crear la seguridad que se requiere.

La estructura de retención se construye por lo general al pie de los taludes de terraplenes que no podrían ligarse convenientemente con el terreno de cimentación, sobre todo en laderas inclinadas. También se construyen al pie de cortes para dar visibilidad o para (y este es quizás uno de sus usos más deficientes) disminuir la altura de cortes en materiales cuya resistencia sea predominante o puramente cohesiva, en los que, como en repetidas ocasiones se menciono, la estabilidad es una función muy sensible de la altura.

Las estructuras de retención tiene la ventaja general de exigir poco espacio para su erección. El volumen de excavación para su cimentación depende mucho de la naturaleza del suelo existente en el lugar y esta es, por cierto, una de las circunstancias que con más cuidado se deben sopesar antes de decidir la utilización de la solución que se comenta, pues un terreno de cimentación débil puede producir movimientos muy indeseables en el muro, los que en combinación con los propios de la falla pueden con facilidad llegar a generar situación no rara en terraplenes.

Otras veces los muros de retención se usan con éxito para confinar el pie de fallas en arcillas y lutitas, impidiendo la abertura de grietas y fisuras por expansión libre.

En general los muros de retención altos y largos son muy caros, de manera que es difícil que compitan con otras soluciones alternativas. Requieren de todo un conjunto de obras auxiliares, tales como subdrenaje, ademado, desagües, etc., que se han de atender cuidadosamente y que elevan en forma considerable el costo total.

Los muros de celosía pueden tener ventajas adicionales en relación a los muros de retención común, ligada por lo general a la rapidez de su erección y a su facilidad para soportar asentamientos. Difícilmente soportan grandes empujes.

Dentro de este grupo se trataran métodos de recubrimiento que incrementaran la estabilidad del talud a base de proteger los materiales contra los efectos de erosión e intemperismo. En esta línea de acción quedan comprendidos los recubrimientos con mampostería seca, mampostería, gunites, concretos lanzados, losas delgadas de concreto (muchas veces sujetas con anclajes), riegos asfálticos, etc.

Las soluciones a base de riegos de recubrimiento (asfáltico, concretos lanzados, etc.), que con frecuencia han fracasado por haberse hecho sin ninguna consideración del flujo de agua en el cuerpo del talud; si el agua rompe la unidad entre esta y el material y la solución hasta por desprendimiento. Cuando sospeche la existencia de flujo interno, se deberán tomar las precauciones correspondientes de subdrenaje, por alguno de los métodos que se han detallado.

Respondiendo a criterios similares se usan mallas de acero o de plástico, para detener derrumbes u caídos. La malla se ancla en la corona del corte y se sujeta al talud de este con grapas o anclaje.

Muchos problemas de estabilidad se han resuelto con el uso de falsos túneles. Se trata de secciones en túnel de concreto reforzado a las que se dota de un techo suficiente de suelo, de manera que cualquier derrumbe posterior no dañe a la estructura.

La condición de su uso es que el túnel falso no quede involucrado en la zona de falla, por lo que difícilmente pueden adaptarse a la solución de grandes masas con superficie de deslizamiento definido; mas bien su utilización esta ligada a zonas de caídos, derrumbes o flujos. El túnel falso es caro, pero ofrece solución radical.

I. Empleo de pilotes

Constituye la solución más controvertible entre las que son más usuales para estabilizar mecánicamente deslizamientos en laderas y taludes; sin embargo, se han reportado algunos éxitos espectaculares, logrados a costos comparativamente bajos. En casi todos los casos de éxito se instalaron dos y tres hiladas de pilotes, y algunas veces su uso ha sido reportado como solución mas bien restrictiva, en el sentido que se instala una hilera de pilotes o dos para frenar un movimiento y se van instalando hileras sucesivas, a medida que el material se adapta a la restricción y los movimientos vuelven a comenzar; en tales condiciones, existen fallas que se han estado piloteando a lo largo de 20 años.

Es probable que el método solo sea apropiado en deslizamientos superficiales; los profundos generan fuerzas muy grandes, que con dificultad resisten los pilotes; además. Tales fuerzas harían avanzar al suelo entre los pilotes, aun suponiendo que estos resistiesen. En abundamiento de lo anterior debe pensarse que en los deslizamientos superficiales los pilotes resultaran cortos, aun cuando se anclen lo necesario; en cambio, en los deslizamientos profundos de utilizar pilotes muy esbeltos.

En anclajes es evidentemente esencial; pilotes poco anclados serán arrancados y volcados, movimiento que, por cierto, provocara alteraciones en la superficie de falla con posibles resultados contraproducentes. No existen reglas fijas en cuanto a longitud de anclaje, la cual se deberá fijar en cada caso.

La solución solo se puede intentar en roca o materiales duros, pues los suelos blandos fluirán fácilmente en torno al pilote reduciendo mucho su eficiencia. Cuando la fricción a lo largo de la superficie de falla potencial sea muy importante, el pilotaje constituye una medida de prevención digna de tomarse en cuenta porque puede incrementar los efectos de fricción. En ocasión se complementa la acción de los pilotes colocando losas de concreto reforzada entre ellos.

J. Empleo de contrapesos al pie de la falla

Esta busca dos efectos; en primer lugar, balancear el efecto de las fuerzas motoras en la cabeza de la falla, en forma similar a como hace una berma, a la que equivalen en algunos aspectos; en segundo lugar, incrementar la resistencia al esfuerzo cortante del material subyacente, cuando este es de naturaleza friccionante

Una apropiada forma de la superficie de falla (de preferencia que tienda a elevarse bajo el contrapeso) y que el terreno en la zona de colocación tenga suficiente resistencia para soportar el peso que le impone, son probablemente las dos condiciones básicas para que pueda pensarse en el empleo de esta solución.

El método consiste en si en colocar un peso suficiente de suelo o roca en la zona apropiada al pie de la falla.

K. Anclajes

Algunos problemas muy importantes de estabilidad de taludes y laderas se han resuelto con técnicas de anclaje en suelos con costos muy razonables.

Una variante de los métodos de anclaje que se ha usado poco en las vías terrestres, pero que con seguridad es merecedora de mayor preferencia por parte de los proyectistas, es la utilización de tirantes de anclaje en estructuras de retención, especialmente cuando estas han de cimentarse en suelos poco resistentes, con presiones de contacto mayores que la capacidad de carga; en retenciones a base de pilotes, el anclaje de estos puede dar muy buenos resultados cuando el estrato resistente en que se afianzan no ofrece suficiente garantía de que los pilotes no lo penetren lateralmente.

Los anclajes suelen consistir en cables de acero unidos a muertos y solidamente ligados a la estructura de retención.

L. Uso de explosivos

La superficie de falla sobre la cual ocurre un deslizamiento es muchas veces lisa y pulida; el caso típico de este fenómeno es el de masas de suelo cohesivo que deslizan sobre mantos de roca o suelos mucho más duros. Este tipo de contactos constituyen también una superficie potencial de deslizamiento.

En tales situaciones, se ha recurrido a veces a utilizar explosivos para romper y hacer rugoso un contacto de tal naturaleza; se proporciona así una mejor liga friccional a los dos materiales en contacto. La eficiencia del método se aumenta si a cierta profundidad de la superficie de falla existen mantos denantes a los que la explosión comunique con dicha superficie, a la que entonces se proporciona drenaje.

En la utilización de este método deberá cuidarse el manejo de los explosivos, pues de otra manera corre el riesgo de que la explosión acelere el deslizamiento sobre cualquier superficie previamente formada o lo genere, sobre una superficie potencial.

Se ha dudado mucho sobre la permanencia de una corrección por medio de explosivos y el punto se discute con frecuencia, sin que exista un entendimiento claro al respecto. Parece que la mayoría de los especialistas opina que para que el método sea exitoso es preciso que exista una formación dura debajo de la superficie de falla. También es conveniente mencionar que en todos los casos en que se ha usado el método se ha reportado un asentamiento importante en los meses siguientes a su puesta en práctica. Es cuestionable cualquier ventaja de drenaje que se pueda obtener mediante el uso de explosivos; los fragmentos resultantes no forman un filtro, de manera que con seguridad los pequeños espacios entre ellos se sellaran al depositarse material muy fino arrastrado en el flujo del agua. Los deslizamientos muy profundos quedan fuera del alcance del método, por la violencia de las explosiones necesarias para ponerlo en práctica.

Los explosivos se pueden usar tan bien en derrumbes y caídos, pero no como método de corrección sino de remoción.

Es probable que el aspecto mas sugestivo del uso de explosivos sea su costo, que suele ser muy interior al de otras soluciones, al grado que aun suele ser ventajoso económicamente un programa que incluya varias aplicaciones sucesivas del procedimiento a lo largo de varios años.

M. Empleo de vegetación

Se trata de un método preventivo y correctivo de fallas por erosión. Los movimientos de tierra que acompañan a la construcción de cortes y terraplenes producen inevitablemente una destrucción muy indeseable de la cobertura vegetal, dejando a los expuestos al ataque de agua superficial y vientos. Se acepta que la vegetación cumple dos funciones importantes; primero, disminuye el contenido de agua en la parte superficial, y en segundo, da consistencia a es aparte por el entramado mecánico de sus raíces. Comoquiera que las plantas o el pasto toman el agua que necesitan del suelo en que crecen, se pueden plantear varios criterios para seleccionar el tipo de especies mas conveniente en un caso dado; desde luego, el uso de plantas propias de la región será en principio recomendable y evitara fracasos posibles en la adaptación al ambiente de especies importadas, fracasos que son difíciles de prever para un ingeniero civil ; pero hay especies que toman demasiada agua del suelo y otras que toman mucho menos, produciendo grados muy diferentes de abatimiento en los contenidos de agua superficiales. En suelos arcillosos, seguramente pueden convenir más las primeras, al garantizar una corteza de suelo más resistente, pero en suelos arenosos un secado intenso en la superficie hace a los materiales más erosionables y ello no es conveniente.

Cuando se trata de arbolado en los coronamientos de los cortes o como barreras contra invasión de arena, las consideraciones anteriores no son muy validas y el criterio debe quizás circunscribirse al uso de las especies locales que tengan mejores posibilidades de adaptación el lugar específico de que se trate.

La experiencia ha probado que es mas efectivo para defender taludes la plantación continua de pastos plantas herbáceas, en vez de la plantación de matas o áreas aisladas. Comoquiera que el costo de ambas soluciones también es diferente, la actitud del ingeniero debe quedar condicionada a la feracidad de la región; hay zonas en que la forestación se reproduce en forma casi natural e inevitable, otras en que es muy difícil el crecimiento vegetal. La plantación aislada incrementa mucho la posibilidad de infiltración y escurrimiento. Por otra parte, en el caso de terraplenes muy altos ha dado buen resultado la plantación de arbustos en hileras, para hacer perder velocidad al agua que escurra.

Es muy importante el efecto del pasto para evitar la formación de grietas de contracción en los suelos que estarían expuestos de no existir tal cobertura.

Principales parámetros que afectan el fenómeno de erosión, por lluvia		
<i>Acciones, directa o indirectamente erosivas</i>	<i>Parámetros inherentes a la lluvia o al clima</i>	<i>Parámetros inherentes al terreno o a la geometría del talud</i>
Impacto de las gotas.	Intensidad de la lluvia (hasta un límite). Velocidad del viento durante la tormenta.	Orientación del talud respecto a los vientos.
Escurrimiento superficial.	Intensidad de la lluvia y su duración.	Inclinación del talud. Área en la superficie expuesta del talud. Número de surcos y torrentes que se formen. Coeficiente de escurrimiento. Velocidad del agua. Concentración de arrastre de sólidos.
Infiltración.	duración de la lluvia.	Inclinación del talud. Porosidad, permeabilidad.
Humedecimiento y secado.	Alternancia de estaciones: seca y lluviosa. Intensidad de la acción solar. Pluviosidad.	Condiciones para la filtración (protección, permeabilidad, inclinación) y para la evaporación (orientación al sol, protecciones, etc.).