

# **Muros, Taludes y Terraplenes de Suelo Reforzado: Control de Erosión**

**Dr. en Ing. Rafael Morales y Monroy,**

**Miembro de GMA\*, SMMS\*, PMI\*, Monitech\* y la Facultad de Ingeniería de la UNAM,  
Perito Profesional en Geotecnia y en Vías Terrestres por parte del Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C.**

\* GMA: Geosynthetic Materials Association, SMMS, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, PMI, Promotora Mexicana de Industrias, S. A., de C.V., Monitech S.A. de C.V., Ingenieros Consultores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento urbano que experimenta nuestro país desde la década de los 80's ha implicado el uso de suelos con alto grado de dificultad para construcción, el reuso de predios anteriormente desechados por su dificultad, ya sea por lo abrupto, por lo irregular, por su baja resistencia, por su topografía, por su dificultad de acceso, por su lejanía y por muchos otros motivos y que, en la actualidad, dadas las circunstancias, se han debido de considerar para su construcción. En todos estos casos el factor suelo ha tenido un alto impacto económico debido a los procedimientos de estabilización que han debido seguirse para su conformación y uso.

En el caso del presente foro que nos ocupa se trata de rellenos artificiales de sitios problema, utilizados anteriormente con otros fines, generalmente como minas de agregados pétreos, barrancas, basureros u otros y que se deben terraplenar o conformar, principalmente para la creación de vivienda, que es la demanda más grande que tiene el país en estos momentos, aparte de la seguridad y el empleo. Este foro, al intentar satisfacer el problema tecnológico que se vive indirectamente contribuye a satisfacer los otros dos problemas, el empleo, al utilizar mano de obra y generar fuentes de empleo y con ello bajar el índice de criminalidad existente.

Desde el punto de vista tecnológico, aquí se proponen nuevas técnicas de construcción utilizando principalmente productos geosintéticos, es decir productos que se usan para adaptar cualquier tipo de suelo, para mejorarlo y modificarle sus propiedades actuales, enfocándolo al servicio y a la ocupación que se desee. Estos materiales, como su nombre lo indica, van enfocados al mejoramiento y transformación de suelos y son, todos ellos, artificiales, fabricados a partir de polímeros (polipropileno, poliéster, polietileno, poliestireno, pvc, etc.).

El enfoque que se piensa desarrollar en este foro es principalmente cualitativo, dada la premura de tiempo, sin embargo, existe toda una investigación y desarrollos tecnológicos a nivel mundial que respaldan el uso y la tecnología de estos productos: existe software para cada aplicación, existen muchas técnicas, productos y metodologías que pueden aplicarse de manera alternativa a cada problema, incluso, dentro de los mismo geosintéticos: hay tal diversificación que los productos rivalizan entre sí para dar la mejor solución, de acuerdo a las condiciones de un proyecto dado.

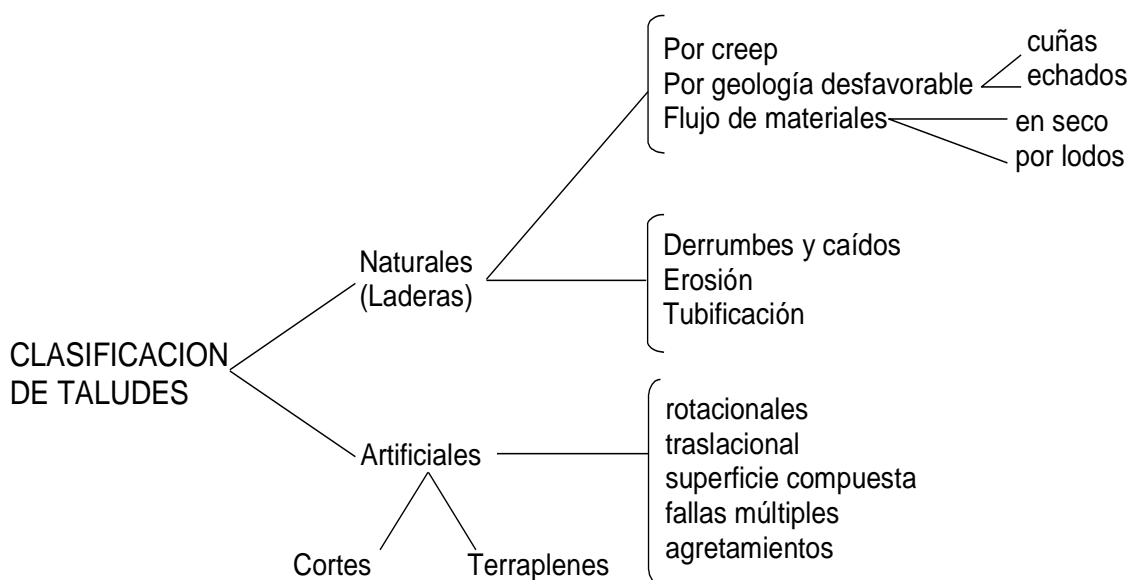
Como se decía anteriormente, aquí se hablara de manera cualitativa, sin embargo, se enlistan al final una serie de referencias que pueden ser consultadas para investigar, profundizar, ahondar en el tema, el cual es muy amplio e interdisciplinario ya que involucra técnicas tan diferentes y especializadas como la arquitectura del paisaje o paisajismo, estabilidad de taludes, empujes de tierras, control de erosión, biología, climatología, edafología, conservación de suelos, geografía, topografía, catastro, ingeniería ambiental, agronomía, etc.

Todos estos temas y en todas las disciplinas comentadas, así como algunas otras que se omitieron por razones de espacio, presentan una gran cantidad de líneas de investigación por las que nuestros investigadores podrían continuar.

## 2. CONCEPTOS GENERALES

Los terraplenes y estructuras térreas que se utilizan para rellenos de predios, plataformas, caminos, bordos, desniveles, pisos industriales, estacionamientos, patios de contenedores, ferrocarriles, aeropuertos, rampas de hospitales u otras, etc., son el acumulamiento de tierra o suelo de una cierta calidad, compactado de acuerdo a técnicas ya muy conocidas. La resistencia de dicha acumulación de tierra varía de acuerdo al tipo de suelo que se use y de acuerdo al uso que se pretenda dar a tal obra.

Cuando lo anterior implica la formación de un desnivel, comienza a denominarse talud o terraplén, aunque esto entra a una disertación que de manera exitosa presentan Rico y del Castillo, 1980, y de los cuales se toma la siguiente clasificación de taludes, por considerarla muy interesante y adecuada.



En el presente trabajo se hablará principalmente de taludes artificiales: su formación y corrección, aunque también se puede, mediante estos mismos métodos, corregir y prevenir la falla de taludes o laderas naturales, así como el prevenir o corregir derrumbes, caídos, erosión y tubificación.

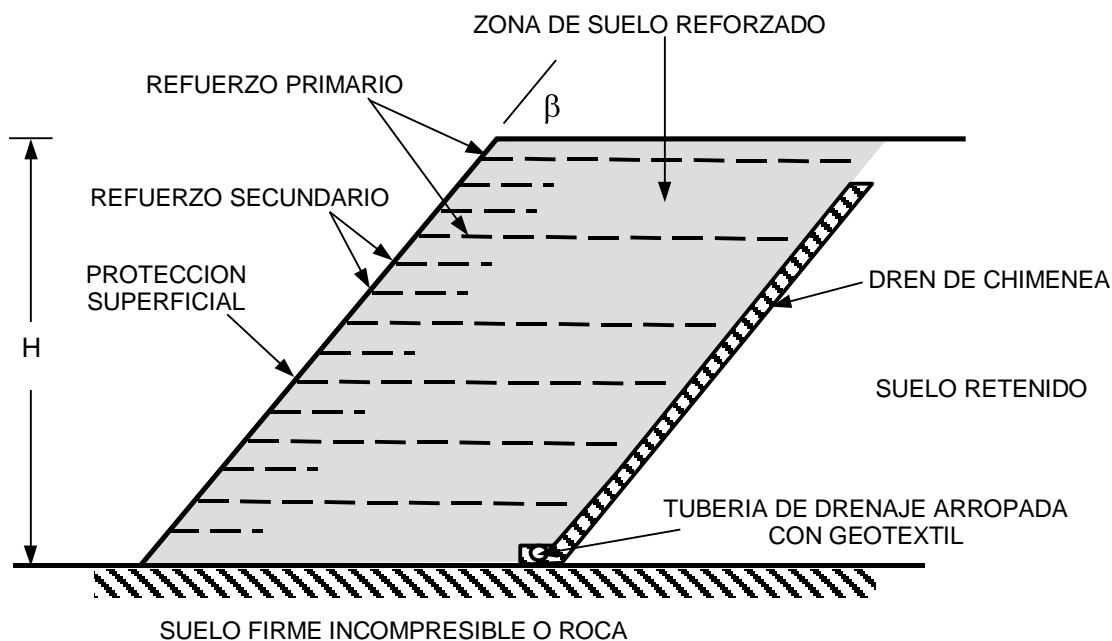
Estas soluciones son fáciles de calcular, ya que utilizan las mismas teorías y conceptos que los taludes y terraplenes sin refuerzo; son fáciles de construir, ya que necesitan un mínimo de mano de obra, se construyen principalmente con maquinaria pesada, a muy rápidas velocidades de construcción. Son económicos y efectivos. Permiten alcanzar ángulos de reposo que de ninguna manera se podría alcanzar con los suelos naturales y permiten alcanzar grandes alturas, a bajos costos de estabilización, llegando incluso a alcanzar la vertical y sustituir con facilidad a muros de contención tradicionales.

En el caso de aplicación a rellenos de cavidades o para conformar plataformas de trabajo de baja altura (< 2 m), se puede usar mano de obra, carretillas, bailarinas en sustitución de maquinaria pesada, aunque su avance resulte más lento.

En este trabajo, las estructuras de suelo reforzado se dividirán en:

1. Taludes o laderas y terraplenes con pendientes pronunciadas sobre suelos con adecuada capacidad de carga,
2. Muros de contención sobre suelos con adecuada capacidad de carga,
3. Refuerzo de suelos con baja capacidad de carga,
4. Terraplenes sobre suelos con baja capacidad de carga,
5. Control de erosión en taludes, laderas y muros.

En los dos primeros casos, el muro, talud o terraplén de suelo reforzado, se supone que esté desplazado sobre un suelo firme incompresible o roca, los cuales impiden a las potenciales superficies de falla presentarse por la base o por el pié del talud al revisarse por estabilidad global la estructura. Un ejemplo de esto, con sus principales componentes, se ilustra en la Fig. 2.1.



**Fig. 2.1 Principales componentes de un talud de suelo reforzado sobre un suelo con adecuada capacidad de carga.**

Para el caso de terraplenes sobre suelos blandos, la resistencia del suelo de cimentación y su compresibilidad controlan, con mucho, la estabilidad de la estructura ya que, aunque se pueda reforzar de manera adecuada el suelo blando subyacente (caso del Valle de México, zona del lago), éste tiene una gran deformabilidad, que no debe olvidarse y que, aunque resista la construcción, tendrá hundimientos y deformaciones en el tiempo, misma que deben de calcularse y tenerse en cuenta para la vida útil del proyecto. Un ejemplo de esto se ilustra en la Fig. 2.2. El refuerzo debe de colocarse, en una o varias capas, en su parte inferior, para tomar las tensiones que se generen y minimizar la deformación que se presente, sobretodo en la parte central de la estructura, que es la que mayor deformación va a sufrir. El estrato compresible D es el que va a presentar las deformaciones por compresibilidad, las cuales no pueden evitarse a menos de removerlo del sitio (hecho que puede lograrse solamente cuando el espesor es de poca importancia). No debe olvidarse que, aunque este reforzado, el talud o estructura siempre va a tener hundimientos ya que actúa como refuerzo, no como balsa salvavidas.

El refuerzo que se coloca actúa exactamente como el que se coloca para las losas o vigas de concreto reforzado: se hace la analogía entre suelo reforzado y concreto reforzado: el concreto y el suelo solamente toman esfuerzos de compresión; el acero y los geosintéticos toman las tensiones

por desarrollarse y la flecha que se produzca debajo de las sobrecargas será tomada por el acero de refuerzo. La características de resistencia de la capa o las capas dependerán de los esfuerzos actuantes, al igual que en el caso de concreto reforzado y, al igual que el acero, que existen manuales de diseño en donde existen varillas y perfiles con ciertas características, en el caso de los geosintéticos y el suelo reforzado, existen manuales en donde se publican las resistencias de los diferentes geosintéticos de refuerzo por seleccionar en el diseño.

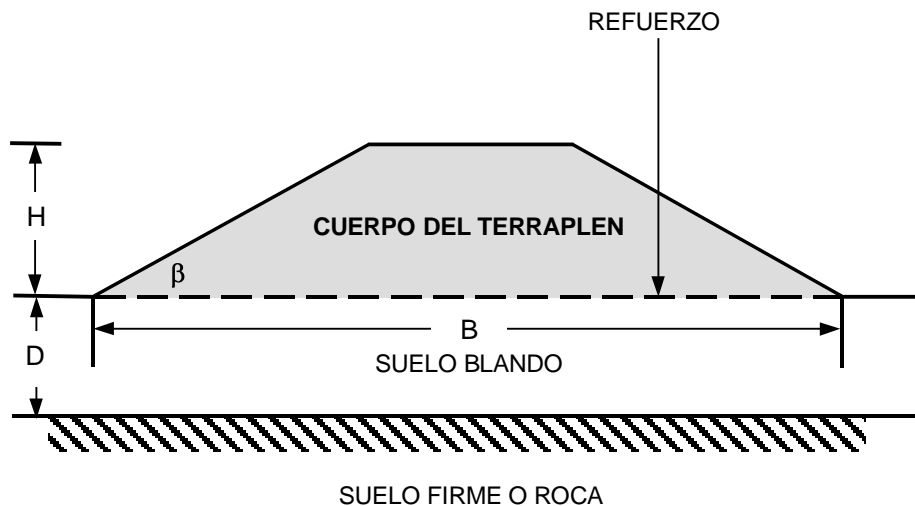


Fig. 2.2 Principales componentes de un terraplén sobre suelos blandos.

## 2.1 Taludes

Las principales componentes de un talud con pendiente pronunciada se ilustraron en la Fig. 2.1., donde  $H$  es la altura del pié hasta la cresta del talud y  $\beta$  es el ángulo que forma la cara del talud con respecto a la horizontal.

- A. **Zona de suelo reforzado:** es la masa de suelo conformada por el relleno y las capas horizontales de refuerzo. La cara del suelo reforzado puede ser o no paralela la cara frontal del talud. Pueden o no existir también sobrecargas sobre la superficie del suelo reforzado.
- B. **Suelo retenido:** es el suelo natural o relleno localizado detrás de la zona de suelo reforzado. Puede, igualmente, soportar o no sobrecargas en su superficie.
- C. **Dren de chimenea:** generalmente se hace necesario, como medida de seguridad, el colocar un dren que elimine o intercepte las aguas subterráneas provenientes del respaldo, evitando que se establezca una red de flujo a través del talud, disminuyéndole de esta forma su factor de seguridad e incluso podría ponerlo en peligro al generarse presiones hidrostáticas en la zona de suelo reforzado. Estos drenes pueden formarse por piedra partida, envuelta dentro de un geotextil, el cual funcionará como filtro, evitando el taponamiento del dren. Pueden igualmente usarse drenes prefabricados y una tubería de drenaje, forrada, igualmente, con un geotextil, para desalojar el agua que se colecte.
- D. **Suelo de cimentación:** es aquel suelo o roca localizado por debajo de la zona de suelo reforzado.

- E. Refuerzo primario:** este refuerzo comprende a las capas horizontales, de lata resistencia y alto módulo que se colocan de manera horizontal desde la cara del talud hacia adentro del mismo, en la zona de suelo reforzado. El refuerzo primario le da la resistencia a la tensión a la zona de suelo reforzado y le permite al talud resistir un ángulo  $\beta$  más alto que el de reposo del material de relleno o alcanzar mayores alturas que las que permitiría dicho material sin refuerzo.
- F. Refuerzo secundario:** está formado por capas horizontales cortas de geosintéticos que permiten estabilizar de manera local la cara del talud, durante y después de su construcción. En algunos casos el refuerzo secundario se usa de manera conjunta con una capa delgada de material granular en la cara del talud, lo cual facilita su construcción y drenaje.
- G. Protección superficial:** de la cara del talud contra la erosión. Esto se logra de muchas maneras: revegetando el talud, colocando concreto lanzado o utilizando geomatrices, las cuales se fijan o se anclan a la cara del talud para prevenir la erosión sobretodo a aquella debida a las lluvias y a las corriente que se forman por encima de la superficie de la cara del talud.

## 2.2 Refuerzo de terraplenes o terraplenes de suelo reforzado

Los principales componentes de un terraplén reforzado sobre de un suelo suave o compresible se ilustran en la Fig. 2.2. El espesor  $D$  se refiere al espesor de suelo suave que sobreyace al suelo resistente;  $H$  se refiere a la altura del terraplén, entre la base o pié y la cresta del mismo;  $B$  es el ancho o base del terraplén y  $\beta$  es el ángulo del talud, medido con respecto a la horizontal.

El uso de refuerzos con geosintéticos en la base del relleno puede incrementar el factor de seguridad contra una falla catastrófica cuando se construye sobre un suelo suave o compresible. En este caso, la función principal del geosintético de alta resistencia es el refuerzo, también puede trabajar, al inicio de la construcción, como separador y facilitador de la misma construcción. Debe señalarse, sin embargo, que la inclusión de los geosintéticos en el diseño y construcción de los terraplenes, no minimizará, de ninguna manera, los asentamientos del terraplén, al consolidarse el terreno que lo subyace.

- A. Relleno del terraplén:** comprende al suelo natural o a suelos importados, compactados, usados como relleno en la formación del cuerpo del terraplén.
- B. Suelo de cimentación:** comprende a un suelo con una muy baja resistencia al esfuerzo cortante, tal que, el factor de seguridad contra la falla catastrófica o de colapso del terraplén queda controlada por los suelos subyacentes. Además, estos materiales pueden ser compresibles bajo el peso del relleno del terraplén.
- C. Refuerzo:** está formado por una capa horizontal de alta resistencia y alto módulo; un geosintético que se extiende a lo largo del ancho total de la base del terraplén. En algunos casos se ha llegado a utilizar más de una capa de refuerzo en la base del terraplén y la cara de éste se han reforzado con capas horizontales, primarias y secundarias, semejantes a las ya descritas, para los taludes con pendientes muy pronunciados.

## 2.3 Orientación del refuerzo

Los materiales que generalmente se usan para el refuerzo, son materiales con diferentes resistencias y rigideces, tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal. Cuando se usan en aplicaciones de refuerzo, en taludes o en terraplenes, la dirección más fuerte deberá de orientarse de manera perpendicular a la cara del talud. Este es el caso de las georredes uniaxiales en donde uno de sus lados es preferentemente fuerte en uno de sus lados.

En algunas otras ocasiones se han usado redes biaxiales, las cuales, supuestamente, tienen la misma dirección en ambos sentidos (no siempre es correcto, aunque no existe tanta anisotropía como en el caso de las redes uniaxiales), o bien geotextiles de alta o muy alta resistencia.

Los geotextiles y las georredes biaxiales, en taludes, se usan como refuerzo secundario. Los geotextiles de alta y muy alta resistencia se usan como refuerzo primario.

## 2.4 Selección del refuerzo

Es necesario, para todos los métodos de análisis de muros, taludes y terraplenes, el que todos los geosintéticos que se utilicen tengan una suficiente resistencia a la tensión, y que permanezca sano e inalterado por un tiempo de vida mucho mayor al de la estructura que se diseñe. Hay dos mecanismos de falla potenciales que deben de considerarse:

1. *Pullout* o extracción del refuerzo.
2. Falla por adherencia o más bien, por falta de adherencia.
3. Falla por sobreesfuerzo del refuerzo.

### 2.4.1. Pullout o extracción

El *pullout* se presenta como resultado de un excesivo movimiento de la capa del geosintético de refuerzo a través del suelo. Se podría semejar, con mucho, al resbalón que se produce al pisar una cáscara de plátano con el pie. También pudiera ser el caso aquel de jalar una hoja de papel intermedia colocada debajo de una pila de hojas encima de ella. Este tipo de falla está asociado con las capas de refuerzo embebidas en suelos friccionantes. La resistencia a la extracción o "*pullout*" se ilustra en la Fig. 2.3, y se calcula mediante la ecuación 2.1:

$$T_{pull} = 2 \times l_a \times \sigma'_v \times C_i \times \tan \phi'_f \quad (2.1)$$

El modelo que se ha adoptado en general, para estos cálculos, es el propuesto por el Task Force 27 de AASHTO, para refuerzo con geosintéticos. El término  $\sigma'_v$  es el esfuerzo vertical efectivo actuando a la elevación donde se encuentra colocado el refuerzo y se calcula usando la teoría de los esfuerzos efectivos de Terzaghi así como las sobrecargas "q" que actúan de manera permanente sobre la longitud del anclaje  $l_a$ .  $\phi'_f$  es el ángulo de fricción del suelo reforzado.  $C_i$  es el coeficiente de interacción del esfuerzo cortante y se relaciona con la eficiencia para transferir las cargas entre el suelo y el geosintético de refuerzo. La magnitud de  $C_i$  es función del tipo de geosintético y del tipo de suelo de que se trate, variando, generalmente, entre 0.7 y 0.9.

### 2.4.2 Falla por adherencia

La falla por falta de adherencia ocurre cuando un geosintético de refuerzo tiene poca interacción con el suelo al cual se encuentra reforzando, generalmente con suelos puramente cohesivos o arcillosos. Este mecanismo de falla potencial se asocia generalmente con terraplenes reforzados formados con suelos arcillosos suaves.

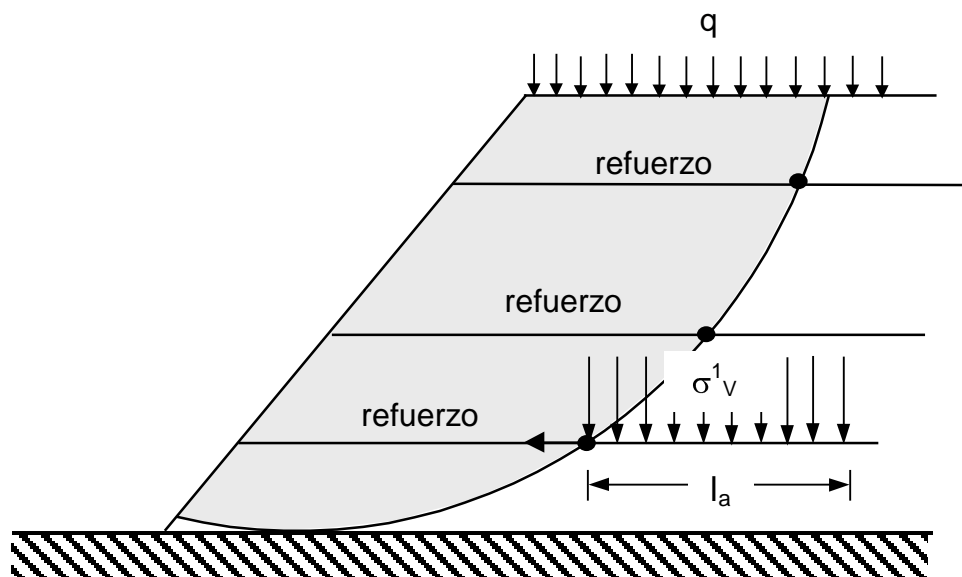


Fig. 2.3 Cálculo de la capacidad de refuerzo por “pull out” o extracción en suelos friccionantes

### 2.4.3 Falla por sobreesfuerzo

El sobreesfuerzo por tensión en el geosintético de refuerzo se presenta cuando el esfuerzo a la tensión en el geosintético excede al esfuerzo de trabajo permisible en el mismo geosintético, lo cual se traduce en una deformación inadmisibles y posiblemente hasta la ruptura del geosintético. Este modo de falla se le conoce como “ruptura” aunque en realidad casi nunca se alcanza el rompimiento del geosintético, ya que las cargas de diseño se seleccionan para que permanezcan siempre muy por debajo de la resistencia última del geosintético. En general, a los esfuerzos permisibles de trabajo se les denomina como “carga de diseño permisible, a largo plazo” LTADL, por sus siglas en inglés (*long term allowable design load*). Estos valores varían con el geosintético utilizado. En el **anexo A**, se presentan valores de algunas de las georredes existentes en el mercado mexicano, a manera ilustrativa.

### 2.5 Refuerzo secundario

El refuerzo secundario se recomienda para las caras de los taludes, para prevenir y minimizar los desconchamientos y fallas locales del talud, así como para facilitar su construcción (Fig. 2.1).

Las guías emitidas por la FHWA (*Federal Highway Administration*) recomiendan que el refuerzo secundario se coloque con espaciamientos menores a 60 cm y con una extensión o longitud de 1.20 m a 1.50 m hacia adentro del talud. Este refuerzo secundario no necesita tener la misma resistencia que el refuerzo primario y podrá ser cualquier tipo de geosintético que satisfaga el requerimiento.

### 2.6 Control de Erosión Superficial

La erosión en la cara del talud, debida sobre todo a los escurrimientos superficiales podrá prevenirse revegetando el talud, ya sea con tepes de pasto, enredaderas o con plantas nativas de la región, pero también existen una serie de productos especialmente diseñados para ello, las geomatrices, las cuales pueden ser biodegradables, fotodegradables, orgánicas o inorgánicas. Puede usarse también el concreto lanzado, algún bloque prefabricado, tabique, adobe, adocreto,



Ecomuro, Ecocreto, enredaderas, etc. Puede usarse todo lo anterior de manera combinada, lo cual conlleva a soluciones efectivas y agradables a la vista.

### 3. 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 arropo” 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.

#### 3.1 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 pié 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 pié del talud.
3. Las propiedades del suelo quedarán determinadas a través de su peso volumétrico  $\gamma$ , y su ángulo de fricción reducido  $\phi'$  (grados). El ángulo  $\phi$  de un suelo friccionante es de  $30^\circ$ .
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:

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

donde el término LTADAL representa la *carga de diseño a largo plazo* (esfuerzo de trabajo permisible) en los geosintéticos. En el **Anexo A** se presentan, a manera ilustrativa, algunas georredes que se comercializan en nuestro país.

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.

#### **4. Análisis de estabilidad para taludes y terraplenes sobre suelos con adecuada capacidad de carga**

Si se desea hacer un cálculo 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.

#### **5. 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.

## 5.1 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.

## 5.2 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 da al vector en el cálculo de la estabilidad puede variar entre  $0 \leq \delta \leq \psi$ , como se ilustra en la Fig. 5.1.

Aquí, el ángulo  $\psi$  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  $\delta$ :

$\delta = 0$ , 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  $\varepsilon_d > 10\%$  y mayores deformaciones tolerables.

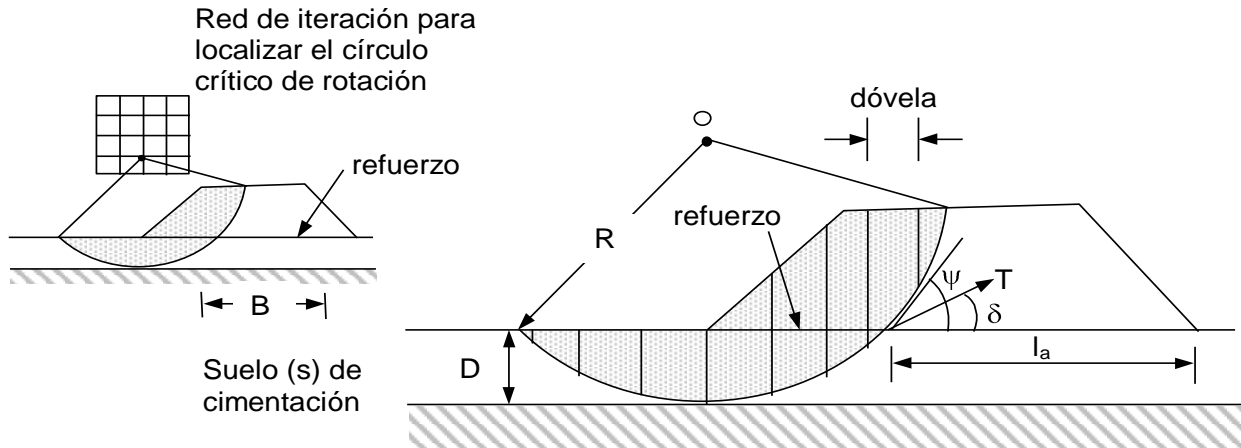


Fig. 5.1. Análisis de deslizamiento circular para terraplenes sobre suelos suaves, con propiedades de resistencia constante.

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.

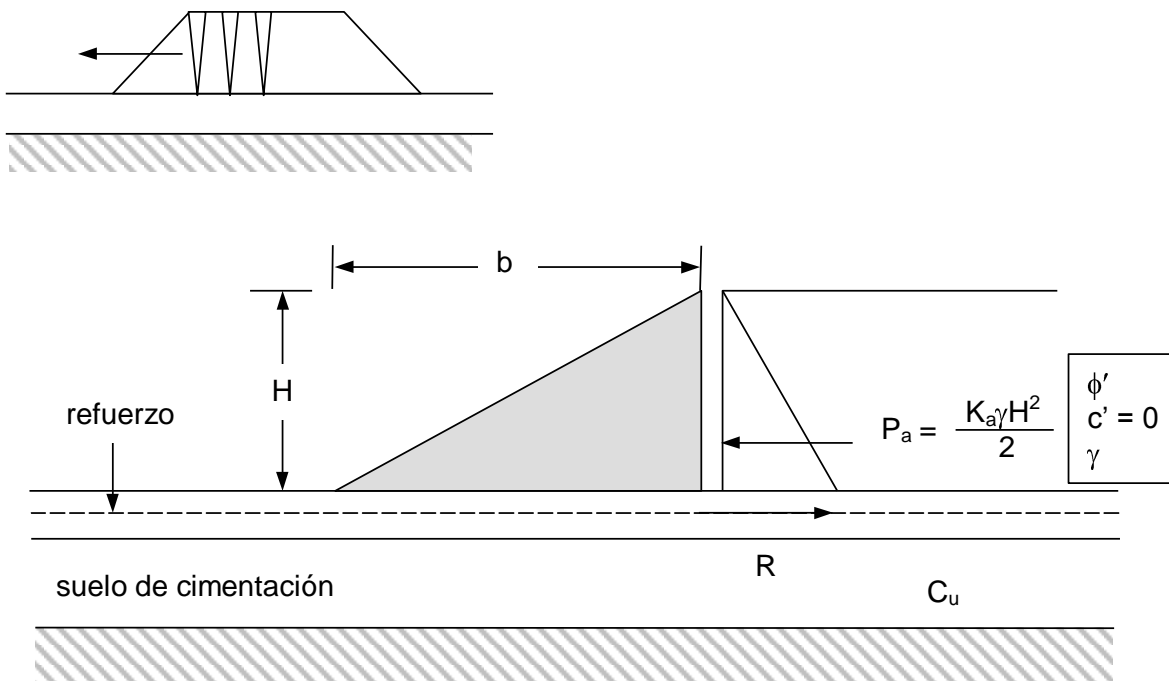
### 5.3 Deslizamiento lateral del terraplén

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.

Fig. 5.2 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.

#### 5.4 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 terraplenes reforzados se realizan con las mismas teorías que generalmente se usan para un terraplén sin refuerzo.

### **5.5 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.

### **5.6 Consideraciones adicionales**

Si se utilizara como refuerzo una geored, 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.

### **5.7 Otras aplicaciones**

#### **5.7.1 Terraplenes 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 rellenos 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.

## **6. 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 microbiológica.

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.

## 7. 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.

### 7.1 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.

### **7.1.1 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.

### **7.1.2 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%.

### **7.1.3 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.

### **7.1.4 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.

### **7.2 Coeficiente 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.

## **8. Erosión en Taludes, Terraplenes y Muros de contención**

La erosión, proceso por el que se produce la desintegración y arrastre de los terrenos, tiene tanta importancia práctica en los problemas conectados con el proyecto, la construcción y, quizá sobre todo, con la conservación de los terraplenes, taludes, laderas y muros de contención, así como a



todas las obras relacionadas con paisajismo, como clubes de golf, hoteles, residencias, desarrollos habitacionales, pasos a desnivel, distribuidores viales, vialidades, etc.

Poca atención seria ha recibido el tema por parte de los ingenieros y arquitectos dedicados a la construcción, en general y de los ingenieros agrónomos, a excepción de los que se dedican específicamente a conservación de suelos. Hasta la fecha, 2003, siguen sin integrarse a las soluciones la parte biológica, la botánica, la climatología, la edafología, la ingeniería ambiental; generalmente se resuelve “sobre la marcha” con soluciones empíricas basadas generalmente en jardineros que no tienen ningún conocimiento que respalde su experiencia práctica, exitosa o no para combatir la erosión; faltan los enfoques fundamentales, en donde el fenómeno se estudie en sus causas últimas y en relación con otros más conocidos, para poder situarlos dentro del marco general del conocimiento actual, estableciendo las normas de criterio para su correcta interpretación y racional neutralización.

La Tabla I, tomada de Rico y del Castillo, 1980, permite establecer los mecanismos de generación y actuación de la erosión, así como los esfuerzos que los suelos, los vegetales o los sistemas anti-erosivos han de desarrollar para resistirla. El trabajo se refiere a la erosión causada por la lluvia al caer y por el agua que escurre superficialmente, proveniente de la misma fuente.

<b>Tabla I. Efectos de la lluvia en la erosión de terrenos</b>		
<i>Acciones directa o indirectamente.</i>	<i>Mecanismo de acción.</i>	<i>Efectos erosivos, directos o indirectos.</i>
Impacto de las gotas.	Disgregación.	Erosión por escurrimiento laminar. Erosión por escurrimiento concentrado (torrentes).
Escorrimento superficial.	Disgregación y transporte.	Erosión diferencial por diferentes resistencias al fenómeno de las distintas capas del terreno.
Infiltraciones.	Nivel freático suspendido. Elevación del nivel freático.	Deslizamientos de tierras. Erosión interna, tubificación, etc.
Humedecimiento y secado	Expansión y contracción.	Fisuramiento. Pérdida de cohesión. Flujos estacionales.

La erosión por lluvia se debe a dos causas principales:

- el impacto de las gotas y
- el arrastre del agua que escurre por la superficie del terreno.

Los aspectos básicos de la erosión son:

- Las gotas de lluvia desprenden partículas de tierra y obstruyen la superficie. El agua no puede infiltrarse en la superficie sellada y entonces aumenta el flujo sobre el suelo.
- La vegetación o cualquier otra cobertura puede reducir el impulso o la energía de las gotas de lluvia y así prevenir el sellado de la superficie.

La erosión resulta del impacto de la lluvia y del flujo de ésta por superficie u otras capas. La energía cinética de las gotas de lluvia que caen aumenta con la intensidad de la precipitación, pero el incremento va siendo menor según la intensidad aumenta, de manera que la energía cinética tiende asintóticamente a un valor límite, que parece ser el mismo para todas las tormentas de gran intensidad.

La razón de este fenómeno parece estar en que las gotas de un tamaño máximo estable (5 ó 6 mm), de manera que precipitaciones mayores producen gotas mayores, pero ya inestables, que se dividen durante la caída. Existe también un tamaño mínimo de gota para producir algún efecto. Cuando el viento hace a la lluvia oblicua aumenta su energía cinética, pues la nueva velocidad oblicua de llegada es mayor que la componente original de caída vertical; esto hace que tenga importancia práctica la orientación de los taludes en relación al viento.

La Fig. 8.1 muestra un escurrimiento laminar, de agua de espesor uniforme, sobre la superficie inclinada de un terreno; aquí, el agua, al escurrir, trasmite al terreno un esfuerzo tangencial:

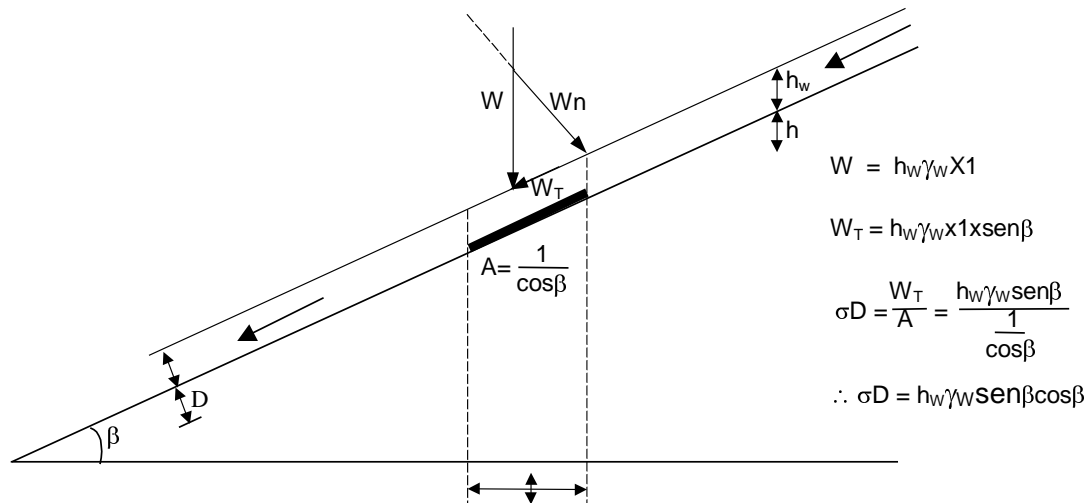


Fig. 8.1. Escurrimiento laminar uniforme en el terreno inclinado.

$$\tau_a = \gamma_w h_w \text{sen} \beta \cos \beta \quad (8-1),$$

para la cual existe una velocidad crítica para cada tipo de terreno, definida como:

$$h_w \cos \beta = a \quad (8-2),$$

con lo cual se obtiene:

$$\tau_a = \gamma_w a \text{sen} \beta \quad (8-3),$$

donde  $a \text{sen} \beta$  puede considerarse como el gradiente hidráulico del escurrimiento.

Cuando este esfuerzo  $\tau_a$  alcanza un valor límite, propio de cada terreno, las partículas comienzan a disgregarse y la erosión empieza; este valor límite puede denominarse el *esfuerzo erosivo* propio de cada caso.

Si se considerara que escurriera un cierto gasto  $Q$  representado por:

$$Q = a_w v \text{ (Faja unitaria de terreno)} \quad (8-4),$$

donde  $v$  fuera la velocidad con que el agua escurre y que se tuviera a una distancia  $L$  de la cresta del terreno, podría relacionarse con la intensidad de precipitación (en cm/min) a través de un coeficiente de escurrimiento, que exprese cuánto de agua caída escurre y cuánto se infiltra, evapora o se retiene de cualquier modo:

$$Q = C I L \quad (8-5),$$

donde  $C$  es el coeficiente de escurrimiento e  $I$  la intensidad de precipitación.

Si se igualan las ecuaciones anteriores, entonces:

$$a_w v = C I L \quad (8-6),$$

Si el agua que escurre trae sólidos térreos en suspensión, entonces:

$$\tau_a = (\gamma_s a_s + \gamma_w a_w) \text{sen} \beta \quad (8-7),$$

donde  $\gamma_s$  es el peso volumétrico de los sólidos arrastrados y  $a_s$  es el espesor de sólidos que debe considerarse.

Ahora, por otro lado, la concentración de sólidos en una suspensión esta definida por:

$$S = \frac{\gamma_s a_s}{\gamma_w a_w} \quad (8-8),$$

$$\gamma_w a_w$$

por lo que, al sustituir en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\tau_a = C l \frac{(1 + S)}{v} L \text{ sen } \beta \quad (8-9)$$

Con lo que el valor del esfuerzo cortante queda expresado en términos de magnitudes físicas relativamente sencillas y fáciles de determinar.

Si el agua que escurre tiende a concentrarse en pequeños torrentes, formados como consecuencia de irregularidades en el terreno, como suele suceder, ya no es válido considerar un ancho unitario a la faja de escurrimiento, sino que ese ancho deberá sustituirse por el real del pequeño torrente que se forme. En este caso también variará la altura  $a_w$  del escurrimiento y la velocidad,  $v$ . En general, cuando el escurrimiento se concentra es más fácil, para una misma tormenta, alcanzar el poder erosivo límite; esto es debido a varias causas, de las que una importante es que cualquier torrente que se forme en el terreno inclinado representa, para las partículas en la superficie, una inclinación mayor, de modo que aumenta la sollicitación por peso propio en esas partículas y aumenta también la velocidad de escurrimiento.

Otro efecto del agua de lluvia es su infiltración en el terreno y la consiguiente modificación del régimen de las aguas subterráneas. La Fig. 8.2 muestra un talud con el nivel freático a la profundidad  $z$ .

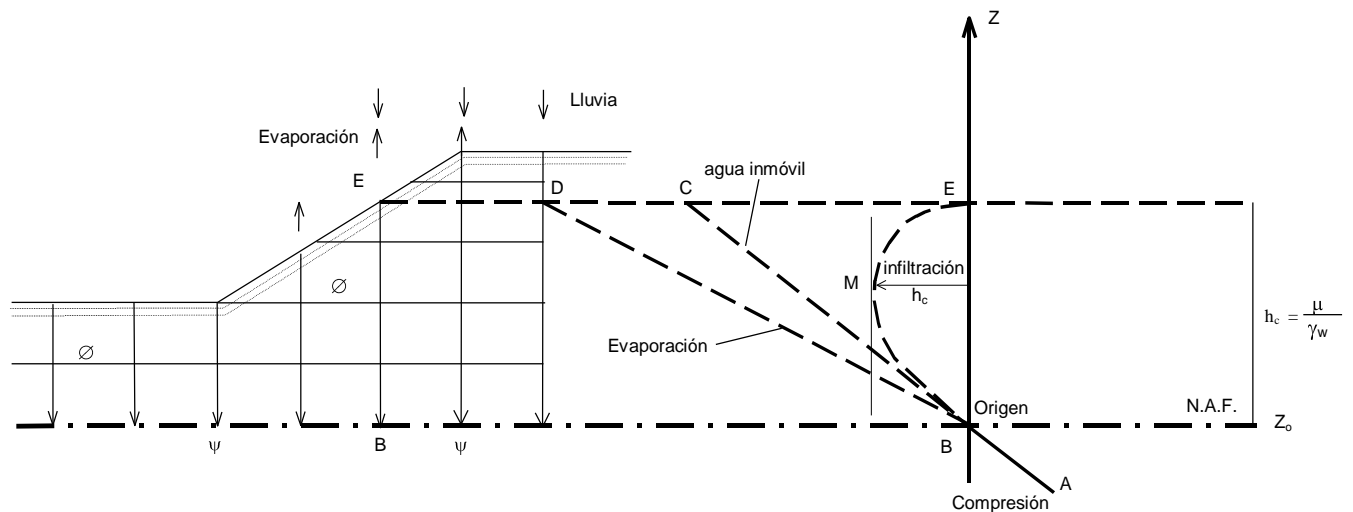


Fig. 8.2. Mecanismos de infiltración y evaporación del agua en un talud.

Para el recorrido  $ds$  del agua dentro del talud, el gradiente hidráulico se produce tanto por la energía potencial de posición, como por la presión; por tanto:

$$i = \frac{dz}{ds} + \frac{1}{\gamma_w} \frac{du}{ds} \quad (8-10)$$

Si  $h_w$  es una altura de agua equivalente a la presión  $u$ , podrá escribirse:

$$dz = dh_w$$

$$i = \frac{dh_w}{ds} + \frac{u}{\gamma_w} \quad (8-11)$$

Si se supone que el talud es homogéneo e isótropo en lo referente a la permeabilidad, el agua de la lluvia penetrará verticalmente hacia abajo, con lo que el gradiente correspondiente a la carga de posición será unitario ( $ds = dz$ ) y:

$$i = 1 + \frac{dh_w}{dz} \quad (8-12)$$

Si el agua está en reposo dentro del talud  $i = 0$ , por lo que esta condición de equilibrio puede expresarse como:

$$dh_w = - dz \quad (8-13)$$

Esta condición se representa en la figura 8.2 por la recta ABC. Sobre el nivel de aguas freáticas, NAF,  $h_w = (u/\gamma_w)$  tendrá que ser negativa para que haya equilibrio; bajo ese nivel,  $z$  es negativo y  $h_w$  será positiva para el equilibrio. Como la carga de presión en el NAF es nula por definición, si el agua está sobre ese nivel tiene que tener una presión negativa precisamente igual a la altura que tenga sobre del NAF. Como la presión que el agua desarrolla sobre el NAF es debida a fenómenos capilares y depende de la altura capilar a la que el agua asciende, se sigue que si el agua está en equilibrio sobre el NAF, su altura capilar  $h_c$  de ese suelo. O sea, matemáticamente:

$$- h_w = h_c = - \frac{u}{\gamma_w} \quad (8-14)$$

Si en el agua se tiene una altura sobre el NAF diferente de la altura capilar correspondiente habrá un gradiente en el agua de valor:

$$i = 1 - \frac{dh_c}{dz} \quad (8-15),$$

según se deduce de la ecuación (8-12) y de las reflexiones anteriores.

Nascimento, 1973, expresa este gradiente como:

$$i = 1 + i_c \quad (8-16)$$

Donde:

$$i_c = - \frac{dh_c}{dz} \quad (8-17)$$

Este es el gradiente capilar o de succión. Si  $i$  total es positivo el agua baja; si es negativo, sube.

Cuando llueve, el suelo se humedece o satura superficialmente, por lo que en esa zona el radio de los meniscos aumentará y la tensión capilar se reduce, disminuyendo  $h_c$ ; tanto en la ecuación (8-16), como en la (8-18), se ve que este efecto produce una alimentación del agua subterránea por un flujo descendente; de hecho si el suelo se satura con la lluvia,  $h_c = 0$  y la alimentación será máxima.

La evaporación también produce aumento de la tensión capilar y, por ende, de  $h_c$ , por lo que produce un flujo ascendente.

La figura 8.2 produce los cambios del diagrama original de presiones ABC, tanto en el caso de evaporación como en el de la infiltración por lluvia. En el caso de infiltración, el gradiente gravitacional del agua, que es unitario en un suelo homogéneo e isótropo, se ve aumentado en un sumando (ecuación 8-16) que puede ser importante, aumentándose considerablemente el gasto de infiltración. Lo contrario pasa en el caso de evaporación.

Si se observa la figura 8.2, se ve que el gradiente de succión  $i_c$  (ecuación 8-18) vale -1 en B (NAF) durante la infiltración (el efecto, el agua para pasar de la posición original en E, con energía de posición  $h_c$ , al punto B, habrá recorrido un trecho también igual a  $h_c$ ); dicho gradiente tiene que anularse en un punto intermedio M, donde  $h_c$  tiene un máximo (durante la lluvia, supuesto que la tensión capilar se anula en la superficie del terreno, por causa de la lluvia, se tendrán  $h_c = 0$  en E y en B, por estar este último en el NAF; como quiera que la tensión capilar se conserva diferente de cero entre E y B, tiene que tener un máximo, según se muestra la curva BME que es una distribución de dicha tensión en la zona de saturación). Por supuesto, dicho gradiente es máximo en la superficie del terreno.

Consecuentemente, el gradiente hidráulico total de flujo (ec. 8-17) es máximo en la superficie del terreno, se conserva mayor que 1 entre E y M, pasa a ser menor que 1 entre M y B y llega a ser cero en B, sobre el nivel freático. Esto condiciona los valores de la velocidad de descarga del flujo ( $v = ki$ ), que disminuye constantemente desde la superficie, hasta llegar a ser cero en el nivel freático. Este hecho determina que el agua tiende a acumularse en la zona de saturación, sobre el nivel freático, disminuyendo constantemente las tensiones en el agua en esa zona y formándose un verdadero nivel freático suspendido, por encima del original. Como la disipación de la tensión capilar en el anterior talud por infiltración va ocurriendo a profundidad constante bajo la superficie del suelo, la masa de agua suspendida tiene un contorno paralelo al talud; esta masa de agua tiende a fluir por efecto gravitacional, aflorando al pié del talud. Este efecto incrementa las tendencias erosivas del agua en el interior del talud y el flujo paralelo a éste contribuye a aumentar el esfuerzo rasante que se expresó en la ecuación 8-1. Este aumento se cuantifica, llegándose a la expresión:

$$\frac{\Delta \tau_a}{\tau_a} = \frac{\sin^2 \beta + n \cos^2 \beta}{1 - n} \frac{\gamma_w}{S_s} \quad (8-19),$$

siendo  $n$  la porosidad de suelo, y  $S_s$  la densidad de los sólidos.

La gráfica de la Fig. 8.3 muestra cuánto se agrava el esfuerzo rasante actuante en un talud para diferentes inclinaciones de éste y diversos valores de  $n$ , que como se ve en la ecuación (8-19) es determinante en el aumento de la acción erosiva del agua por concepto del flujo de la masa de agua suspendida, que fluye paralela al talud.

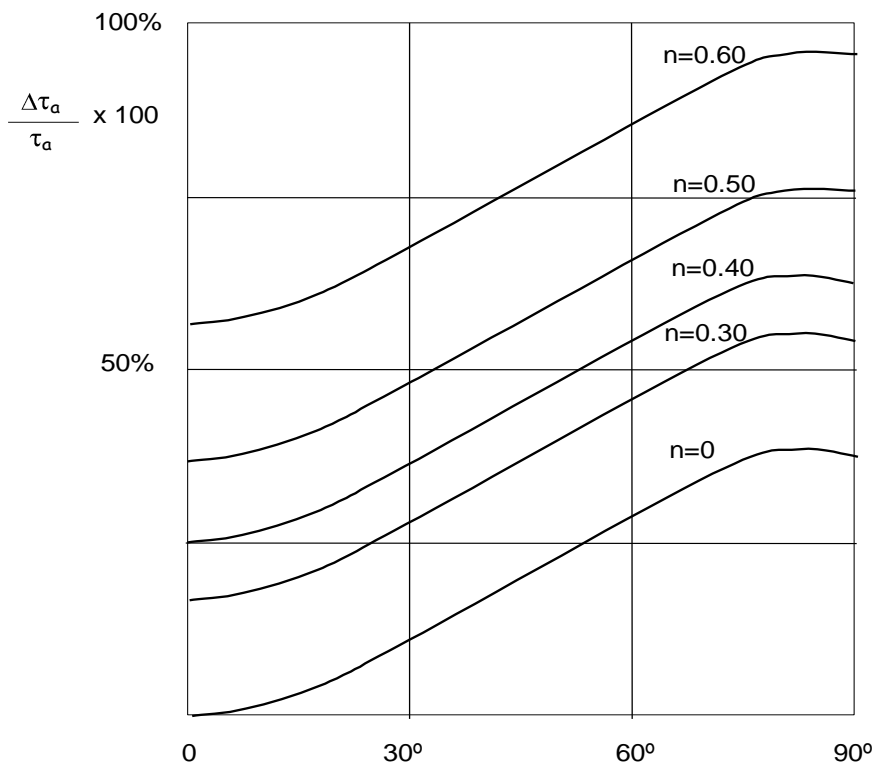


Fig. 8.3. Aumento del esfuerzo actuante en un talud por efecto de su inclinación y de la porosidad del suelo constituyente.

Puede verse en la figura que en un talud inclinado  $45^\circ$  con respecto a la horizontal, por ejemplo, el efecto del flujo paralelo a la superficie incrementa los esfuerzos rasantes a esa superficie en 37% para  $n = 30\%$ , pero lo hace en casi 80%, si el valor de la porosidad se elevara al 60%.

La Tabla II resume las principales conclusiones del análisis de la erosividad de las lluvias, detallando los principales parámetros que intervienen en el fenómeno; de éstos los hay los que se refieren a la lluvia en sí (siendo su intensidad y duración, con mucho, los más importantes), el clima, al terreno y a la geometría del talud.

<b>Tabla II. Principales parámetros que afectan el fenómeno de erosión, por lluvia</b>		
<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.  Inclinación del talud. Porosidad, permeabilidad.

Infiltración.		
Humedecimiento y secado.	duración de la lluvia. 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.).

Se analiza a continuación el fenómeno de la erosión desde su otro ángulo de interés, que se refiere a las características de los suelos que determinan su resistencia al fenómeno.

Desde luego, la resistencia que se opone a la remoción y arrastre de los granos que puede considerarse del tipo tradicional:

$$s = c + \bar{\sigma} \tan \phi \quad (8-20)$$

Con referencia a la figura 8.1 puede escribirse:

$$\bar{\sigma} = \gamma'_m h \cos^2 \beta \quad (8-21)$$

Donde h corresponde al tamaño de la primera hilera de granos (D, en la figura). El peso volumétrico por considerar será el sumergido si el talud está internamente anegado de agua suspendida. Teniendo en cuenta la relación geométrica entre h y D, la ecuación 8-21 también puede escribirse como:

$$\bar{\sigma} = \gamma'_m D \cos \beta \quad (8-22),$$

y la resistencia será:

$$s = c + \gamma'_m D \cos \beta \tan \phi \quad (8-23),$$

Si el régimen de escurrimiento es lo suficientemente veloz para que haya turbulencia, el segundo término del segundo miembro de la ecuación anterior se reducirá, por lo que deberá afectarse por un coeficiente menor que la unidad, sobre el que, por otra parte, aún no hay información.

También influirá, modificando la ecuación 8-22, el hecho de que sobre el talud se hayan formado ya surcos y torrentes, pues en tal caso la inclinación a que estarán sujetas las partículas de la superficie no es  $\beta$ , sino algo mayor.

En lo que se refiere a suelos granulares sin cohesión, la mayoría de la información sobre la resistencia a la erosión proviene de estudios sobre estabilidad de suelos en el fondo de canales (Lane, 1958). De ella se desprende que un aspecto fundamental es la relación entre el tamaño de los granos del suelo y el esfuerzo erosivo. En los materiales no cohesivos, con diámetro medio inferior a 5 mm, la resistencia a la erosión parece ser bastante más eficiente que en los de mayor tamaño.

En lo que se refiere a suelos cohesivos, la información es mucho más precaria y no pasa de fijar una velocidad límite que no produzca erosión. En la Tabla III se presentan los valores máximos de velocidades no erosivas en algunas clases de suelos.

**Tabla III. Valores máximos de velocidades no erosivas en distintas clases de suelos**

<i>Material</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
Arenas finas y limos	0.40 a 0.60
Arcilla arenosa	0.50 a 0.75
Arcilla	0.75 a 1.00
Arcilla firme	1.00 a 1.50
Grava limosa	1.00 a 1.50
Grava fina	1.50 a 2.00
Pizarras suaves	1.50 a 2.00
Grava gruesa	2.00 a 3.50
Zampeados	3.00 a 4.50
Rocas sanas y concreto	4.50 a 7.00

Si estas velocidades se transforman en el esfuerzo erosivo correspondiente, utilizando las ecuaciones 8-3 y 8-4, estimando el gasto que escurre, por ejemplo, puede llegarse a recomendaciones prácticas análogas a las incluidas en la Tabla IV, que se refieren a suelos cohesivos colocados en el fondo de canales.

<b>Tabla IV. Esfuerzos que provocan erosión en suelos cohesivos en el fondo de canales (<math>g/m^2</math>)</b>				
<b>Consistencia del material</b>				
<i>Material del fondo</i>	Suelto	Poco compacto	Compacto	Muy compacto
Arcilla arenosa	180	700	1470	2800
Suelos muy arcillosos	140	670	1370	2540
Arcillas puras	108	560	1260	2380
Suelos poco arcillosos	90	430	960	1540

Independientemente del valor que puedan tener los números específicamente anotados en la tabla anterior, un punto que destaca es la influencia de la compactación en la resistencia a la erosión de los suelos cohesivos; para circunstancias similares, la resistencia puede aumentar entre 15 y 20 veces al pasar el suelo del estado suelto a uno muy bien compactado.

Uno de los efectos que más colaboran a la erosión de los suelos cohesivos tiene que ser la expansión en la superficie, que da lugar a humedecerse y que no está contrarrestada por ninguna contrapresión, por lo que ocurre libremente.

### **8.1 Revestimientos Vegetales**

Los revestimientos vegetales (Caldeira, 1973) se usan: para protección de los suelos naturales, taludes, terraplenes o muros y/o por estética.

Las principales funciones benéficas de la vegetación son:

- 1.- Proteger al suelo del impacto de las gotas de lluvia,
- 2.- Disminuir la velocidad del escurrimiento del agua por aumento de rugosidad,
- 3.- Aumentar la infiltración por huecos de raíces, animales, etc.

En general, la vegetación debe estar formada por especies seleccionadas, susceptibles de afianzarse y crecer en las condiciones locales, ya que las especies propias de la región ofrecen una garantía, pues con frecuencia se les pretende hacer vivir en condiciones diferentes a las que le son propicias.

Otra función importante es el control del contenido de agua en las capas superiores del suelo, gracias a la evapotranspiración de las plantas.

En lo que se refiere al mejoramiento de la apariencia que se logra con la vegetación, cabe comentar que el efecto no se circunscribe solamente a la apariencia, sino a otros muchos



aspectos, como el efecto aislante de los ruidos que tiene la vegetación, lo que puede tener el mayor interés en zonas urbanas y habitacionales.

Cuando haya de intentarse un programa de vegetación o revegetación en taludes, lo primero que ha de tomarse en cuenta es que el suelo por poblar seguramente no es tal en sentido botánico; no posee las características necesarias para sostener la vida vegetal, ni por su estructura, ni por su textura, ni por la ausencia de los microorganismos y detritus que definen la llamada tierra vegetal. Por esto, casi sin excepción, suele ser necesario un recubrimiento de este material vegetal donde no lo haya, y su conservación sistemática donde exista.

Cuando se coloque tierra vegetal sobre un talud es preciso vigilar que la inclinación de éste pueda retenerla, que no sobrepase el ángulo de reposo de la tierra vegetal, pues de otro modo será preciso recurrir a la construcción de bermas o a introducir sistemas de retención como son los geosintéticos: geomatrices, webs o sistemas rígidos; ésta es una condición por la que conviene algunas veces dar a un talud una inclinación menor que la estrictamente indispensable por razones de estabilidad. Por la misma razón, cuando un talud vaya a protegerse con vegetación no conviene que su acabado sea liso.

Cuando se vegeten taludes debe tenerse presente que no basta analizar las condiciones generales del clima regional, para atribuírselas simplemente, pues los taludes casi nunca presentan esas condiciones regionales; tanto por la incidencia de la radiación solar, que aumenta la temperatura del suelo, como por el declive, que vuelve al suelo más seco durante casi todo el año, como por la exposición al viento; los taludes son zonas en que los suelos están expuestos a condiciones generalmente mucho más desfavorables que las medias.

La vegetación puede plantarse desparramando directamente semillas sobre la tierra vegetal apropiada; esto puede hacerse a mano o por métodos mecánicos o hidráulicos (hidrosiembra). Otras veces se plantan tepes o macizos de tierra ya vegetada, a modo de mosaicos; este método es apropiado para pastos y plantación de herbáceas. La planta suele requerir de algunos riegos antes de su establecimiento definitivo (mínimo 40 días). Los árboles y arbustos, que se utilizan sobre todo como barreras contra ruido, suelen plantarse ya de un cierto tamaño, a fin de contar con su protección desde un principio; requieren mayor atención y riego en tanto no se afianzan.

En términos generales puede afirmarse que la vegetación es un método de recubrimiento económico, elegante y acorde a los requerimientos actuales de conservación de suelos y protección al medio ambiente.

## **8.2 Sistemas de Revestimiento Rígido**

Los bancos taludes, terraplenes o muros no pueden sostener la vegetación, así que deben protegerse de la erosión por medio de varios sistemas, entre ellos el de revestimiento rígido. Estos revestimientos incluyen a los “preformados de geotextiles” (geobolsas, geosacos, colchacreto, bolsacretos, etc.), confinamiento geocelular, gaviones, bloques articulados de concreto, adocretos y por supuesto, enrocamientos.

Cuando se coloca un sistema de revestimiento rígido el agua puede entrar y salir, pero la fuerza del agua la resiste el revestimiento. Con el entrar y salir del agua, ésta puede acarrear gradualmente partículas de tierra hacia afuera del revestimiento. Los huecos (tubificación) resultantes hacen que el soporte que proporciona el revestimiento se pierda. A este proceso se le llama *tubificación*. La tubificación puede culminar en asentamientos, desplazamiento u otro tipo de inestabilidad en el sistema de revestimiento rígido.

En un sistema de revestimiento rígido, bien construido, se coloca una capa filtrante entre el suelo del terraplén y el revestimiento, para prevenir un deslave. Las capas filtrantes tradicionales han sido capas de arena y de agregados. Estos filtros graduados son muy costosos, porque se construyen con material selecto, clasificado. También, la capa filtrante debe ser de un espesor

controlado, sobre una ladera, donde es muy difícil construir.. Por estas dos razones es frecuente - de manera errónea- que estas capas no se incluyan en la obra.

Los sistemas de protección con revestimientos rígidos son caros de construir. Los costos pueden llegar a los \$210 dólares por metro cuadrado en casos cuando se usen elementos tan sofisticados y elegantes como el Ecomuro o el Ecoconcreto. El buen funcionamiento de los sistemas más caros solo puede asegurarse si está protegido contra la tubificación. En consecuencia, siempre debe usarse una capa filtrante debajo de un revestimiento rígido, en un ambiente erosivo.

Los geotextiles se han convertido en las capas filtrantes más adecuadas para los revestimientos rígidos porque superan las desventajas de los filtros de arena y de agregados pétreos. Para empezar, se fabrican ya con propiedades hidráulicas específicas y de retención de tierra, las cuales pueden seleccionarse fácilmente para proteger el suelo que necesite protección. Segundo, pueden instalarse con facilidad sobre taludes, terraplenes o muros, aún bajo el agua. De acuerdo a la granulometría del suelo por proteger, se puede elegir un geotextil tejido o no tejido. La especificación AASHTO M 288 proporciona una guía para seleccionar las propiedades adecuadas para el geotextil. Para conocer más al respecto, se recomienda ampliamente el Manual de Geosintéticos, editado por la GMA, en español.

### 8.3 Sistemas de Revestimiento Flexible

Ya se mencionó en el inciso 8.1 que la vegetación de una obra puede ser un método de recubrimiento efectivo, económico y elegante, sin embargo, su integridad puede ser severamente afectada por:

- Lluvia
- Viento
- Flujos de tierra; y
- Fuerzas biológicas

Para ayudarle al pasto y/o vegetación a defenderse de los elementos negativos ya mencionados, a enraizarse y arraigarse en un talud, terraplén o muro, primeramente deberá de existir un sustrato orgánico (suelo vegetal) del cual puedan alimentarse para sobrevivir y, por supuesto, contar con agua suficiente.

Para lograr enraizarse y arraigarse en un talud, terraplén o muro, los vegetales necesitan una ayuda, sobretodo en donde los ángulos de la pendiente sobrepasan lo natural (mayores de 30° o aún verticales). Para tal fin existen los revestimientos flexibles (geomatrices), que son unas mallas, generalmente tridimensionales, que, por una parte, retienen los sólidos y las partículas pétreas in-situ, evitando que sean arrastrados por el agua al caer (antes de haber sido vegetados) y al mismo tiempo retienen el suelo orgánico, recién colocado para reforestar o revegetar y las semillas de los pastos y/o vegetales con los que se desea vegetar esa obra.

Al uso indiscriminado de la vegetación para el control de la erosión se le ha mencionado como *ingeniería verde* y produce los siguientes beneficios a largo plazo:

- costo moderado
- mejora la estética visual
- funcionamiento demostrado
- fácil de instalar
- aumenta la infiltración y recarga de acuíferos

Las geomatrices o *productos en rollos para el control de la erosión*, RECP's, por sus siglas en inglés, se diseñan para estimular y aumentar la efectividad de la vegetación, usándose como materiales para controlar la erosión, buscando alcanzar los dos objetivos principales de las mismas:

- Reducir la pérdida de suelo,
- Aumentar la repoblación vegetal en el lugar.

Estas geomatrices forman un sistema con la vegetación, a largo plazo, uniendo las plantas individuales, a nivel de la raíz, para crear un “pasto reforzado”.

Las geomatrices que se usan en combinación con los materiales convencionales, ofrecen el potencial para limitar la erosión y además ofrecen las siguientes ventajas sobre los materiales tradicionales:

- pasan por un riguroso control de calidad en un medio de fabricación controlado para minimizar variación del material.
- los rollos son grandes y pueden extenderse fácil y eficientemente.
- son más baratos al comprarlos, transportarlos e instalarlos, que la alternativa a base de sistemas rígidos.
- pueden instalarse rápidamente
- el sistema puede embarcarse fácilmente, a precios competitivos y pronta disponibilidad en cualquier lugar.
- su funcionamiento no está sujeto a las condiciones del clima.

### 8.3.1 Geomatrices temporales

Los materiales temporales, degradables: biodegradables o fotodegradables, se usan para prevenir pérdidas de suelo de la capa sembrada y aumentar la firmeza de la vegetación, donde la vegetación misma proporcionará suficiente protección una vez establecida. Esto generalmente incluye taludes, terraplenes y muros con flujos de menos de 150 kPa de esfuerzo cortante. Las mallas para control de erosión (NEC en inglés), mallas de tejido abierto (ECM en inglés) y las mantas para control de erosión (ECB en inglés), son los sistemas degradables, temporales más comunes. Normalmente se hacen de fibras naturales tales como paja, yute, coco (cáscara) o madera (en tiras) o bien de polímeros.

### 8.3.2 Geomatrices no degradables, de largo plazo

Las geomatrices no degradables a largo plazo, a veces conocidos como de pasto reforzado (en inglés Turf Reinforcement Mats, TRM's), proporcionan protección contra la erosión y amplían los límites de control de la erosión de la vegetación, tierra, roca y otros materiales. Estos materiales plásticos se usan para aplicaciones hidráulicas permanentes, donde las descargas de diseño generan esfuerzos cortantes que exceden los límites de la vegetación madura, natural.

Los sistemas TRM's están compuestos por materiales estabilizados contra la acción de rayos ultravioleta, no degradables, de fibras poliméricas y en forma de mallas y/o filamentos, con matrices reforzadas en tres dimensiones, donde el diseño permite descargar, además de los esfuerzos producidos por la velocidad del flujo, los esfuerzos cortantes en exceso que la vegetación no puede tomar.

Los sistemas TRM's proporcionan suficiente espesor, fuerza y espacios vacíos para permitir el relleno con suelos orgánicos.

### 8.3.3 Hidrosiembra

Las capas protectoras a base de fibras de celulosa pueden aplicarse por aspersión hidráulica junto con la semilla. Las fibras se dispersan en una solución que, cuando se riega sobre el suelo raso, hace que las fibras se peguen entre sí y también al suelo. Estos sistemas de capas protectoras “lanzadas” son más resistentes a la erosión que los sistemas aplicados en seco. Las aplicaciones de mayor espesor, llamadas matrices de fibras pegadas, pueden ser más resistentes a la erosión, pero también son más costosas.

La instalación de cualquiera de estos sistemas de control de erosión no se presenta en este trabajo, sin embargo, es extremadamente sencilla. Pueden encontrarse recomendaciones al

respecto en el Manual de Geosintéticos, editado por la GMA, en español o directamente con el fabricante o sus distribuidores.

#### 8.3.4 Cortinas para Conservación de Suelos (Silt Fence)

La erosión ocurre cuando las partículas del suelo se desplazan por el impacto del granizo, el agua corriente y el viento. La sedimentación ocurre cuando las partículas desgastadas (sedimentos) acarreadas por el agua o el viento, se depositan en otro lugar donde pueden causar problemas. Claramente se nota que los sedimentos (partículas desgastadas suspendidas) y la sedimentación (partículas de tierra redepositadas) causan los problemas generalmente asociados a la erosión.

El control de la erosión puede prevenir problemas desde su inicio. El control de sedimentos únicamente puede tratar de minimizar el tamaño del problema debido a que una erosión acelerada puede ser el resultado de áreas arrasadas durante la construcción; se necesitan medidas de control de sedimentos para evitar que éstos detritos sean arrastrados a vías de agua cercanas o a propiedades vecinas. Se pueden aplicar diversas medidas para el control de sedimentos que impidan el flujo de aguas cargadas con sedimentos y para filtrar el mismo; una de estas medidas es el reducir las pendientes y con ello la velocidad del agua, sin embargo, cuando el control de erosión falla, se puede recurrir al uso de cortinas para conservar suelos, en particular los finos: estas cortinas han sido llamadas "Silt Fence" y no hay una palabra adecuada en español para traducirla, aunque en este trabajo se le llamará también "Cortinas para conservación de suelos".

Las estructuras para control de sedimentos están hechas de material permeable. Se colocan de manera tal que intercepten las aguas de superficie. Estas barreras sirven: 1) para reducir la velocidad del agua corriente y (2) para retener el sedimento suspendido. Las medidas tradicionales incluyen barreras hechas de paja, grava o piedra triturada y maleza. La medida alternativa, con geosintéticos, esta formada por las cortinas para conservación de suelos, "silt fences". Estas cortinas se forman con geotextiles fuertes y durables pegados a postes de soporte. Las cortinas de retención pueden recoger un porcentaje mucho más alto de sedimentos suspendidos de lo que retienen las pacas de paja. Con un funcionamiento aprobado, una cortina de retención bien diseñada:

- cribará los suelos finos (limos y las arcillas) de la corriente.
- formará un filtro de tierra junto a la cortina de retención, reduciendo el flujo del agua a través de la cortina.
- creará un pequeño estanque detrás de la cortina, el cual sirve como depósito de sedimentos para coleccionar el agua desviada y retener los sedimentos suspendidos.

En los Estados Unidos se usan anualmente más de 30 millones de metros cuadrados de cortinas de retención que proporcionan los siguientes beneficios:

- requieren un trabajo mínimo para instalarlas,
- bajo costo,
- alta eficiencia para eliminar sedimentos,
- muy durables y a veces reutilizables.

La instalación apropiada de estructuras para controlar sedimentos va en relación directa con su funcionamiento. Debe señalarse que, a pesar de su uso tan común en los Estados Unidos, es muy frecuente encontrar cortinas mal colocadas, generalmente sin enterrarse, permitiendo que el flujo, y los sólidos, pasen por debajo de la cortina permitiendo la migración de sedimentos. La instalación de cualquiera de estos sistemas de control de erosión no se presenta en este trabajo, sin embargo, es extremadamente sencilla. Pueden encontrarse recomendaciones al respecto en el Manual de Geosintéticos, editado por la GMA, en español o directamente con el fabricante o sus distribuidores.

## 9. Lecturas adicionales

Se recomienda ampliamente leer a Humphrey & Rowe, 1991, y a Jewell, 1988, los cuales abundan sobre soluciones en problemas de terraplenes sobre suelos blandos, sobre el incremento de la capacidad de carga; presentan soluciones que pueden aplicarse en el detalle de un diseño de un terraplén. Igualmente se recomienda visitar los sitios web de la GMA, de la SMMS, de PMI y el de varias asociaciones en Estados Unidos relacionadas con este topico: Internacional Erosion Control Association, IECA, National Roadside Vegetation Management Association, NRVMA, North American Geosynthetics Society, NAGS, Soil and Water Conservation Society, SWCS.

## 10. Agradecimientos

Se agradece y reconoce la ayuda de los siguientes ingenieros en la integración y crítica de la presente contribución: Víctor A. Sotelo Cornejo, Luis Torres Cedillo, Santiago Palacios Pérez, Ángel H. Díaz y Oscar Couttolenc Echeverría.

## 11. Referencias

AASHTO, *Design Guidelines for use of extensible reinforcements for mechanically stabilized earth walls in permanent applications*, 1990. Task Force 27, AGC-ARTBA, Joint Committee.

Bathurst, R.J., et al., 1992. *Design Manual and Methodology for MIRAFI Reinforced Soil Slopes and Embankments*.

Bonaparte R., & Christopher, B.R., 1987. *Design and Construction of reinforced embankments over weak foundations*, Transportation Research Record 1153, pp 25-39.

Caldeira Cabral, 1973. *Restimientos vegetais*. Laboratorio de Ingeniería Civil, Portugal.

FHWA, *Geotextile Design and Construction Guidelines*, 1989a, Pub. No HI-90-001.

FHWA, *Reinforced soil structures: Vol. 1, Design and Construction Guidelines*, 1989 b, Report N° FHWA-RD-89-043.

FHWA, *Geosynthetics Design and Construction Guidelines*, 1998, Pub. No HI-95-038.

Holtz, Christopher, and Berg, 1997, *Geosynthetics Engineering*, USA.

Geosynthetic Materials Association, GMA, 2002, *Manual de Geosintéticos*, Mexico.

Girouod J.P., et al., 1990, *Design of soil layer - Geosynthetic systems overlying voids*, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 9, pp 11-50.

Holtz, R.D., 1990, *Design and Construction of geosynthetically reinforced embankments on very soft soils*, Proceedings of the International Reinforced Soil Conference, Glasgow, Scotland.

Humphrey, D.N. and Rowe R. K. , 1991, *Design and Analysis of Reinforced Embankments: Recent Developments in the State of Art*, Proceedings of the ASCE, Geotechnical Engineering Congress, Boulder Co., USA.

Jewell, R.A., 1988, *The Mechanics of Reinforced Embankments on soft soils*, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 7, pp 237-273.

Koerner R.B., 1998, *Designing with Geosynthetics*, 4<sup>th</sup> edition, Ed. Prentice Hall.

Lane, E. W., *Studies on the design of stable channels*. ASCE., 1958.

Morales R., 2000, *Los Geosintéticos en los residuos de construcción y demolición*, Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Oaxaca, Oax. México.

Nascimento, U., 1973. *Teoria da erosao de taludes*. Laboratorio de Ingenieria Civil, Lisboa, Portugal.

North American Geosynthetic Society, *Erosion and Sedimentation Control Workshop*, Geosynthetics 2003, February 11-14, Atlanta Ga, USA.

Rico A. y Del Castillo H., 1980. *Mecánica de Suelos Aplicada a Vías Terrestres*, Vol. 1 y 2., Ed. Limusa, Mexico.

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., 2002, *Manual de Diseño Geotecnico*, Captitulo 8, Geosintéticos, R. Morales y Monroy., Mexico.