

## TALUDES REFORZADOS

Los Taludes con alto grado de inclinación se han convertido cada vez más convenientes debido al deseo de incrementar el uso del suelo aunado a la disminución de costos. El concepto de refuerzo permite la construcción de taludes con ángulos de inclinación más grandes de lo que permite el ángulo de reposo natural del suelo. Los taludes reforzados con Geosintéticos Mirafi® pueden incrementar el uso de suelo sustentablemente proveyendo al mismo tiempo una apariencia natural.

La estabilidad de un talud reforzado puede ser amenazada por la erosión debida a un flujo de agua que corre por la superficie o por fuerzas de mayor magnitud asociadas con las corrientes de agua ó impactos de olas. La erosión en la cara de un Talud puede crear riachuelos y barrancos, lo que resulta en desprendimientos de superficie y posibles fallas por asentamiento (Berg. 1993). Por tanto las medidas para control de erosión y re-vegetación deben ser una parte integral de todos los sistemas de diseño de refuerzo en Taludes. El tipo de control de erosión frente a la opción que se seleccione depende del ángulo final de inclinación del Talud.

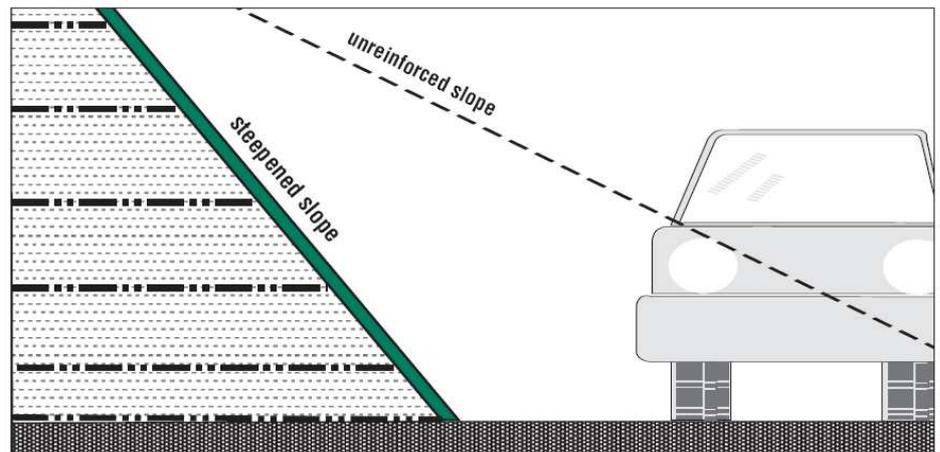


## VENTAJAS

- **Económicas:** Disminuye significativamente los costos de desarrollo ya que provee soluciones de retención de suelo sin el costo de materiales para un muro de contención.
- **Usabilidad:** Incrementa drásticamente la cantidad de suelo tratable sin tener el costo de un muro de retención tradicional.
- **Estética:** Permite la incorporación de una superficie “verde”.
- **Eficiencia:** Acelera el desarrollo y construcción del sitio.
- **Confiable:** Metodologías de diseño probadas conducen a la exitosa implementación de una pendiente grande en un talud.

## APLICACIONES

- Terraplenes de carretera.
- Diques y escollera.
- Reparación en taludes inestables.
- Estacionamientos comerciales ó de oficinas.
- Campos



## OPCIONES PARA CONTROL DE EROSIÓN

### ARMADO SIMPLE (ÁNGULOS MENORES A 45°)

Los taludes reforzados con un ángulo de inclinación menor a 45° son protegidos generalmente con sistemas simples. La función de un sistema de armado simple es el de facilitar el crecimiento de la vegetación que provee protección contra erosión a largo plazo.

Un sistema de armado simple consiste en una manta contra erosión temporal o permanente, un sistema de celda de confinamiento u otro tipo de herramienta para control de erosión que permita la vegetación natural. Dos opciones comunes de sistemas simples son las mostradas a continuación:



*Producto Laminado de control de erosión (RECP: Rolled-Erosion Control Product)*



*Estabilización con Geoceldas de confinamiento*

## ARMADO RÍGIDO (ÁNGULOS MAYORES A 45°)

Cuando los ángulos de inclinación se incrementan a más de 45° se requerirá un sistema con mayor durabilidad. Para este tipo de taludes generalmente se hace uso de sistemas de armado más complejos. La función de este sistema es proveer protección contra erosión en un largo periodo de tiempo. Un sistema rígido de armado puede usar vegetación como control de erosión. Un armado rígido consiste en una canastilla de acero, paneles de confinamiento con Geocelda, una unidad SRW u otro tipo de herramienta para control de erosión. Estos sistemas pueden usar vegetación natural como una forma de protección. Cuatro armados rígidos comunes son los mostrados a continuación:



*Canastilla de acero*



*Unidad de cara expuesta SRW*



*Forro de confinamiento con Geoceldas apilado*



*Malla de alambre gavión*

## SISTEMAS DE REFUERZO EN TALUDES SEMI-VERTICALES SOBRE UNA CIMENTACION FIRME

### APLICACIONES DE UN SISTEMA DE REFUERZO EN TALUD SEMI-VERTICAL

Los Taludes son estructuras localizadas adyacentemente de las carreteras y a lo largo de la periferia de sitios en construcción. Estas áreas deben estar sobre el terreno existente o sobre el nivel de desplante, regularmente haciendo cambios significativos en los bordes de las excavaciones. La factibilidad económica al construir alguna carretera en particular o el desarrollo de una parcela de tierra, puede ser determinada al lograr una planicie suficiente para satisfacer el espacio de seguridad o los requerimientos de acceso. Los Taludes semi-verticales con refuerzo proveen un costo-beneficio más rentable al alcanzar cambios de inclinación más efectivos que los posibles con taludes sin refuerzo.

La figura 1 ilustra alguna de las aplicaciones de taludes con refuerzo:

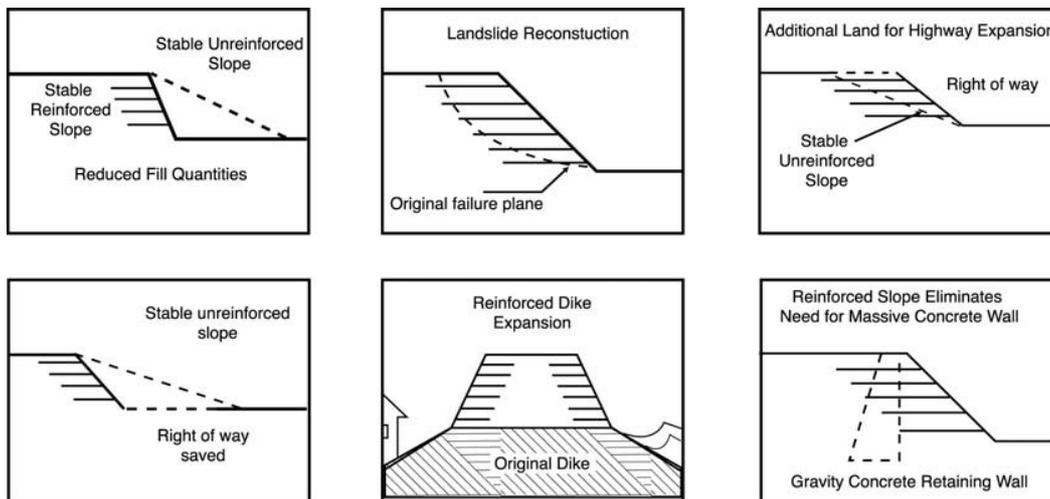


Figura 1.- Aplicaciones usando taludes reforzados semi-verticales

### DETALLES DE UN SISTEMA DE REFUERZO EN TALUDES

**Información general:** Los taludes reforzados con geosintéticos son estructuras de suelo construidas con ángulos de inclinación de hasta 70° de la horizontal. Los taludes típicos sin reforzar están limitados a ángulos de inclinación entre los 25° y 30° o menos, dependiendo del tipo de suelo. La inclinación adicional provista por el refuerzo minimiza la extensión en que la estructura cambia, es decir, que los taludes o muros deben invadir solamente el derecho de vía como se muestra en la figura 2:

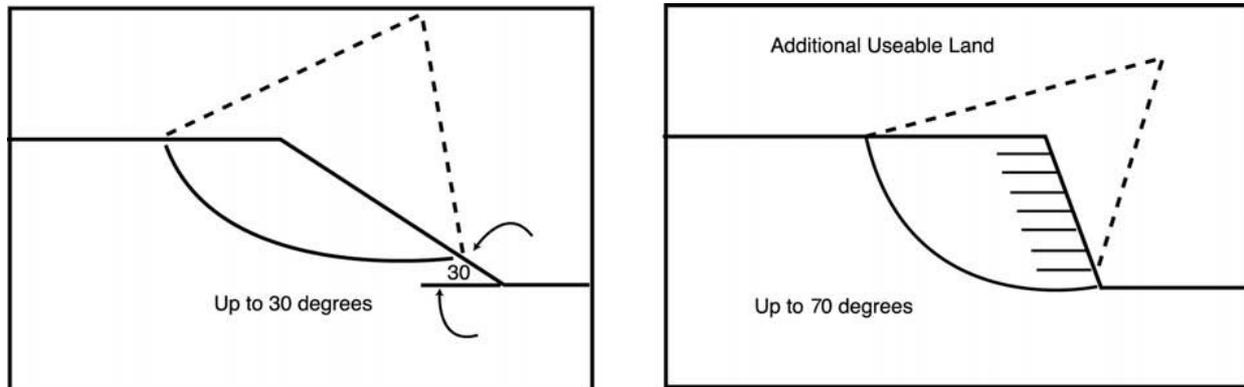


Figura 2.- Taludes con Pendientes convencionales vs. Inclinas

**Componentes del sistema:** Como los taludes convencionales, los reforzados son construidos compactando el suelo en capas, al mismo tiempo que se van colocando más atrás las capas subsecuentes hasta crear el ángulo deseado. A continuación, la superficie espuesta del talud es protegida contra erosión con vegetación o algún otro medio que cumpla con la función. Los elementos geosintéticos adicionales pueden ser incorporados en los taludes reforzados para minimizar la presión del agua y para mejorar la estabilidad y la resistencia a la erosión. Los componentes siguientes son típicos de un talud reforzado con geosintéticos:

- **Cimentación:** Suelo estable o capa de material granular dónde el talud es construido. La estabilidad de la cimentación es asumida.
- **Suelo retenido:** El suelo que permanece en su lugar más allá de los límites de excavación.
- **Drenaje:** El drenaje con Geosintético es instalado en los límites de la zona con el suelo reforzado para poder controlar, coleccionar y crear una ruta para la filtración del agua.
- **Suelo reforzado:** Se trata del suelo que es colocado en forma ascendente adyacentemente al suelo retenido e incorpora capas horizontales de refuerzo para crear las estructuras inclinadas.
- **Refuerzo principal:** Geosintéticos, ya sean Geomallas o Geotextiles con suficiente resistencia y módulos compatibles al suelo, colocados horizontalmente dentro del talud para proveer fuerzas tensionantes que resisten inestabilidad.
- **Refuerzo secundario:** Geosintético, ya sean Geomallas o Geotextiles que son usados para estabilizar localmente la cara del talud durante y posterior a la construcción del talud.

La figura 3 muestra los componentes típicos de un talud reforzado semi-vertical y sus localizaciones relativas. El refuerzo principal provee una fuerza tensionante dentro de la zona reforzada que permite al talud elevarse con

ángulos más grandes de los que podrían ser alcanzados con taludes sin refuerzo.

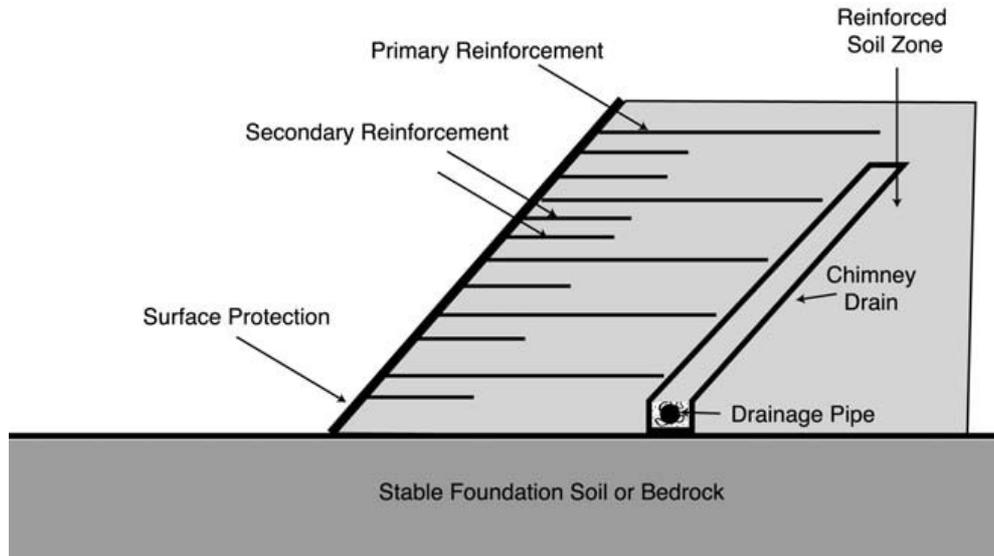


Figura 3.- Componentes típicos de un sistema de refuerzo en Taludes

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO ESPECÍFICAS PARA EL SITIO

**Geometría del Talud:** La inclinación real requerida para el Talud resultará de la configuración del sitio y será determinada por medio de estudios topográficos relacionando el punto más bajo de la zona de desplante con el punto más alto de la misma. El grado o inclinación del Talud así como su altura generalmente variará a lo largo del alineamiento, requiriendo así que el diseñador elija una superficie razonable, representativa de las secciones transversales para el diseño de refuerzo. En la selección del ángulo  $\beta$  y la altura  $H$ , se deberá considerar que los ángulos de inclinación no serán mayores a  $70^\circ$  y las alturas se limitarán por las consideraciones que se tengan en cuanto a superficie de agua.

**Condiciones de cimentación:** El análisis de estabilidad generalmente asume que la cimentación es firme, es decir fuerte y estable, relativa al material de relleno del talud y así las fallas por asentamiento no son una preocupación. Aun así, el diseñador debe evaluar las condiciones del suelo de soporte para un talud de refuerzo propuesto, asegurando que el plano de falla no sea propenso a llegar a la cimentación. Se deben hacer pruebas de capacidad de carga para estimar la resistencia del subsuelo y para localizar fallas geológicas y nivel de aguas freáticas.

**Presencia de agua:** El agua subterránea es una fuente potencial de problemas para las estructuras del suelo. La filtración inesperada puede alterar las propiedades del relleno de cimentación, causar erosión interna, puede

incluso “dibujar” superficies potenciales de falla o incrementar las cargas horizontales y verticales. Todas estas condiciones pueden ser disminuidas al identificar el nivel de aguas freáticas, controlando así la filtración que producen y diseñando con respecto a las condiciones que se tienen del suelo. Cuando sea posible, el nivel de aguas freáticas debe ser mantenida debajo del nivel de desplante de la cimentación.

**Relleno:** Los Taludes reforzados pueden ser construidos de una amplia variedad de suelos. Esto a menudo permite que el material del sitio se use, minimizando la necesidad de transportar el material dentro y fuera del lugar. Los materiales para relleno convenientes son predominantemente granulares o suelos finos de baja plasticidad. Las propiedades de estos materiales deben ser obtenidas de pruebas en laboratorios. La selección de propiedades del suelo para uso en el diseño se discuten más adelante.

**Sobrecarga:** Cargas adicionales horizontales y verticales son aplicadas a los sistemas de refuerzo en taludes por cualquier sobrecarga. Estas cargas pueden ser resultado de estructuras, vehículos o incluso masas de suelo adicionales. Las sobrecargas aplicadas deben ser distribuidas dentro de cargas horizontales y verticales con fuerzas correspondientes sobre el sistema de refuerzo. Una forma de hacer esto es transformar la carga “q” en una capa adicional de suelo equivalente a  $q / \gamma$ .

**Otras cargas externas:** Otras cargas externas aplicadas como son las cargas puntuales o cargas hidrostáticas están fuera del alcance de este documento, pero deben ser tratadas por el diseñador si dichas cargas estas presentes.

## PROPIEDADES DE SUELO DE RELLENO Y GEOSINTÉTICO DE REFUERZO

**Selección del material:** Cada tipo de material de relleno desarrollará propiedades únicas de resistencia e interacción de refuerzo bajo las condiciones de compactación y mezcla del suelo. Por lo tanto, el costo-beneficio de un Talud reforzado puede ser afectado por el relleno y el tipo seleccionado de refuerzo. Es necesaria una rigurosa evaluación del material potencial de relleno y el material de refuerzo para identificar la mejor combinación posible.

**Propiedades del Suelo:** El equilibrio crítico para talúdes reforzados con alto grado de inclinación es gobernado usualmente por condiciones de estabilidad a largo plazo. La resistencia del suelo es por lo tanto descrita en términos propios de peso volumétrico máximo ( $\gamma_{m\acute{a}x}$ ), ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) y cohesión efectiva (c). Estas propiedades son usadas para determinar la estabilidad de las capas del suelo bajo las cargas de diseño. La Tabla 1 muestra algunos tipos de suelo y rangos de propiedades asociadas. Esta información es para grupos generales de material y debe de utilizarse sólo como una guía. Propiedades específicas para suelo de cimentación, relleno y

taludes dado en un proyecto debe ser determinado por medio de pruebas de campo o de laboratorio.

Table 1: Typical Soil Properties <sup>(1)</sup>

Soil Description	USCS Class*	(Deg) $\phi'$	MDD** Std Compact (lb/ft <sup>3</sup> )	Optimum Moisture Content (%)
Well-graded sand-gravel	GW	>38	125-135	11 - 8
Poorly-graded sand-gravel	GP	>37	115-125	14 - 11
Silty gravels, poorly graded sand-gravel-silt	GM	>34	120-135	12 - 8
Clayey gravels, poorly graded sand-gravel-clay	GC	>31	115-130	14 - 9
Well graded clean sand, gravelly sands	SW	38	110-130	16 - 9
Poorly-graded clean sands, gravelly sands	SP	37	100-120	21 - 12
Silty clays, sand-silts - clays	SM	34	110-125	16 - 11
Clayey sands, sand-clays	SC	31	105-125	19 - 11
Silts and clayey silts	ML	32	95-120	24 - 12
Clays of low plasticity	CL	28	95-120	24 - 12
Clayey silts, elastic silts	MH	25	70-95	40 - 24
Clays of high plasticity	CH	19	75-105	36 - 19

\*Unified Soil Classification System  
\*\*MDD=max dry density

Las propiedades del suelo usadas en el diseño de estabilización de taludes deben reflejar las condiciones del sitio. La cohesión del suelo es regularmente descuidada lo que resulta en un diseño conservador. La colocación controlada del relleno y la flexibilidad de la estructura final generalmente asegura una condición drenada y capaz de soportar grandes esfuerzos. La resistencia del suelo es propiamente descrita ya sea por una capacidad portante alta o un factor pico efectivo de ángulo de fricción. El factor de ángulo de fricción se calcula usando la ecuación 1.

$$\phi'_f = \tan^{-1} [(\tan\phi') / FS]$$

**Refuerzo con Geosintético:** Este tipo de refuerzo, es decir, geomallas o geotextiles, usado en taludes debe satisfacer ambos requerimientos de resistencia y interacción del suelo. El requerimiento respecto a la resistencia se enfoca en esfuerzos de diseño a largo tiempo del material de refuerzo. Las propiedades de interacción del suelo incluyen coeficientes de desplazamiento ( $C_{ds}$ ) y pullout ( $C_I$ ).

**Propiedades de refuerzo:** Para estructuras con suelo reforzado es importante que dicho refuerzo sea compatible con el material. Esto significa que la resistencia de diseño a largo plazo debe ser la óptima en un nivel de deformación total (elasticidad + fluencia) correspondiente a una adecuación de la deformación y la resistencia del suelo. Para la mayoría de suelos la deformación en el esfuerzo pico está entre el 3% y el 10% y es fácilmente determinada en las pruebas de laboratorio. Como resultado, una deformación total no mayor al 10% es comúnmente utilizada para taludes semi-verticales, aunque una deformación

limitada del 5% puede ser apropiada si existen estructuras sensibles adyacentes al talud.

La resistencia de diseño a largo tiempo (LTDS) de un refuerzo es determinada aplicando factores de seguridad parciales a la resistencia última a tensión. Estos factores de seguridad parciales cuentan para el arrastre, durabilidad química y biológica y daño en la instalación. La ecuación 2 es usada para calcular los valores LTDS en la dirección MD para productos seleccionados de refuerzo Mirafi®.

$$LTDS = T_{ult} / [RF_{cr} \times RF_{id} \times RF_d]$$

(Eqn 2)

Donde:

$T_{ult}$  = resistencia última a tensión en el ancho

$RF_d$  = factor de reducción por durabilidad

$RF_{cr}$  = factor de reducción por deformación de arrastre

$RF_{id}$  = factor de reducción por daño en instalación

Table 2- LTDS for Selected Geosynthetics	
Geosynthetic	LTDS (In sand) (lb/ft)
Miragrid® 2XT	949
Miragrid® 3XT	1558
Miragrid® 5XT	2234
Miragrid® 7XT	2961
Miragrid® 8XT	3636
Miragrid® 10XT	4312

**Propiedades de interacción del Suelo:** El coeficiente de desplazamiento directo,  $C_{ds}$  y la interacción del coeficiente de pullout,  $C_i$ , son parámetros de interacción entre el geosintético y el suelo, ambos determinados mediante pruebas de laboratorio. El valor  $C_{ds}$  es usado para el cálculo de factores de seguridad involucrando un bloque de suelo en desplazamiento sobre una capa de geosintético. En contraste, el valor  $C_i$  es utilizado para determinar la longitud del geosintético el cuál se debe extender más allá de la superficie crítica de falla para que pueda actuar por completo o para que se ancle el refuerzo.

La ecuación 3 se usa para calcular esta longitud de empotramiento,  $L$ . La tabla 3 provee los valores de  $C_{ds}$  y  $C_i$  para los geosintéticos Mirafi® que se seleccionen con respecto a tipos de suelo típicos.

$$T_{pull} = 2 \times C_i \times L \times \sigma'_v \times \tan\phi'_f \tag{Eqn 3}$$

Table 3- Coefficient of Shear Stress Interaction for Mirafid® Construction Products

Soil Type	Coefficient of Shear Stress Interaction $C_i$		Coefficient of Direct Sliding $C_{ds}$
	Miragrid®	Geogrids	
Sands	0.9-1.0		0.9
Silts	0.8-0.9		0.8
Clays	0.7-0.8		0.7

Note: These values are for preliminary design purposes only. Specific test results are available from the Mirafid® Technical Services Department, upon request.

## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA TALUDES SEMI-VERTICALES Y TERRAPLENES SOBRE CIMENTACIONES ESTABLES

### ANÁLISIS DE CUÑA EN DOS PARTES

Este análisis puede ser referido por la figura 4. Un mecanismo de prueba de falla es definido por superficies potenciales de líneas de falla que se suponen se propaguen desde un punto en la cara del talud (punto A), a un punto de quibre (punto B) y hasta un punto final de la superficie (punto C) localizado en o más atrás de la cresta del Talud. Por lo tanto, la zona Potencial de falla comprende dos masas de suelo (porciones) identificadas como regiones 1 y 2 en la figura. Si una capa de refuerzo intersecta una superficie potencial de falla se provoca una restricción horizontal que es incluida en el cálculo total del equilibrio de fuerzas horizontales.

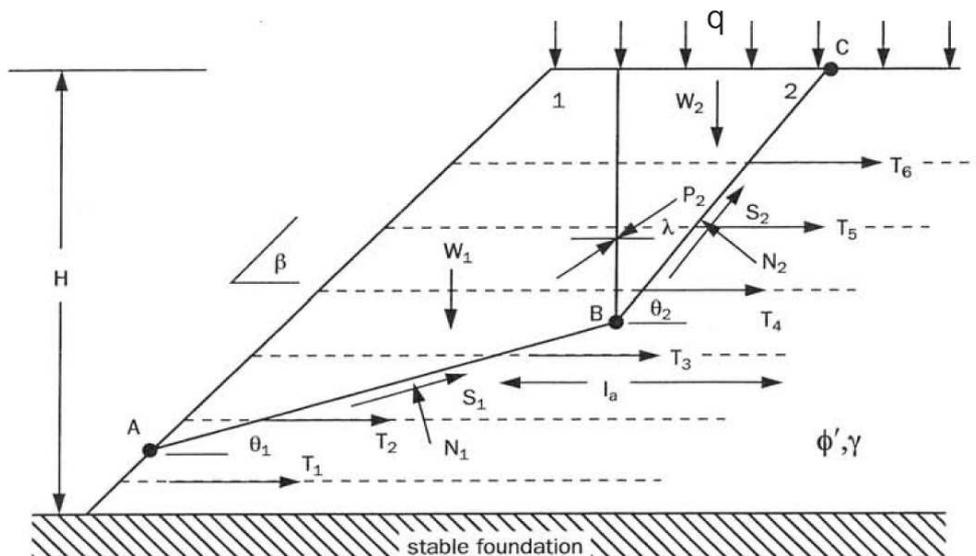


Figure 4: Two-part wedge analysis

En un análisis típico, se debe inspeccionar un gran número de porciones de las dos masas de suelo con el fin de encontrar la geometría típica (es decir, la porción de dos partes que de el factor de seguridad más bajo contra la falla del talud). Es claro que el método más práctico para indentificar el mecanismo de falla crítico es el uso de software. Los programas RSS, disponibles con la asociación federal de carreteras y desarrollado por ADAMA (FHWA NH1-00-043), puede ser usado para el análisis de porciones de dos y tres partes en taludes con variaciones geométricas, propiedades de suelo y niveles de agua subterránea. Otros programas comerciales están también disponibles.

### **CÁLCULOS DE ESTABILIDAD**

Los cálculo de estabilidad para un mecanismo de falla en una porción de dos partes supuesta es referida en la figura 4.

Para propósitos ilustrativos, los procedimientos descritos en la sección están restringidos a taludes reforzados sin suelo cohesivo (es decir,  $c=0$ ,  $\phi > 0$ ) y nivel de aguas freáticas debajo del desplante de la cimentación.

Las fuerzas desestabilizadoras actuantes en el Talud incluyen el peso de la masa  $W_1$  y  $W_2$  de las pruebas pertenecientes a la cuña de falla y cualquier carga uniformemente distribuida “q” que surja. Las fuerzas resistentes incluyen la resistencia a cortante desarrollada a lo largo de la parte superior y del fondo en los planos de falla ( $S_1$  y  $S_2$ ) y las fuerzas de tensión horizontales resultantes de la intersección de las capas reforzadas.

La resistencia a cortante a lo largo de los planos de falla AB y BC son supuestos a ser un tipo Coulomb con  $S_1 = N_1 \times \tan\phi_1$  y  $S_2 = N_2 \times \tan\phi_1$ . El ángulo de fricción del suelo usado en software es el factor del ángulo de fricción ( $\phi_f$  obtenido por la ecuación 1).

La cuantía  $P_2$  en la figura 4 es la fuerza no balanceada que se requiere para mantener la cuña superior en su equilibrio límite. En general, la orientación del ángulo de fricción interna será  $0 < \lambda < \phi_f$ . Una suposición afirmativa es  $\lambda=0$  (es decir, resultados para un diseño más seguro).

El factor de seguridad (FS) contra una falla de una prueba de una cuña con dos porciones es el valor mínimo que puede ser aplicado al coeficiente de fricción pico del suelo para que la fuerza desestabilizadora horizontal P sea igual a la suma de las capacidades tensionantes horizontales de las capas reforzadas ST/FS. La sumatoria  $\Sigma T$  es obtenida de las capacidades tensionantes del reforzamiento, el cual está intersectado por las superficies de falla en pruebas.(es decir,  $T_2$  a través  $T_6$ , en la figura 4).

La fuerza horizontal fuera de balance P es calculada usando la Escuación 4<sub>a</sub>, 4<sub>b</sub> y 4<sub>c</sub>. Los pesos de cuña  $W_1$  y  $W_2$  incluyen la fuerza vertical provocada por cualquier sobrecarga uniformemente distribuida actuante sobre la superficie del talud.

$$P = P_2 \cos \lambda + (P_2 \sin \lambda + W_2) \left\{ \frac{\sin \theta_2 - \cos \theta_2 \tan \phi'_f}{\cos \theta_2 + \sin \theta_2 \tan \phi'_f} \right\} \quad (\text{Eqn 4a})$$

$$\text{where, } P_2 \cos \lambda = W_1 \left\{ \frac{\tan \theta_1 - \tan \phi'_f}{1 + \tan \theta_1 \tan \phi'_f} \right\} \quad (\text{Eqn 4b})$$

$$\text{and } \phi'_f = \tan^{-1} \left\{ \frac{\tan \phi_f}{FS} \right\} \quad (\text{Eqn 4c \& Eqn 1})$$

La máxima fuerza de tensión  $T_1$  disponible de cualquier refuerzo individual es la menor del diseño LTDS o del diseño de la capacidad pillout del geosintético,  $T_{pull}$ .

Un resumen de posibles mecanismos de falla que debe ser examinado para encontrar el mecanismo crítico está ilustrado en la figura 5. Otras permutaciones incluyen deslizamiento en la base, en el cual ningún refuerzo es intersectado por la cuña superior de falla.

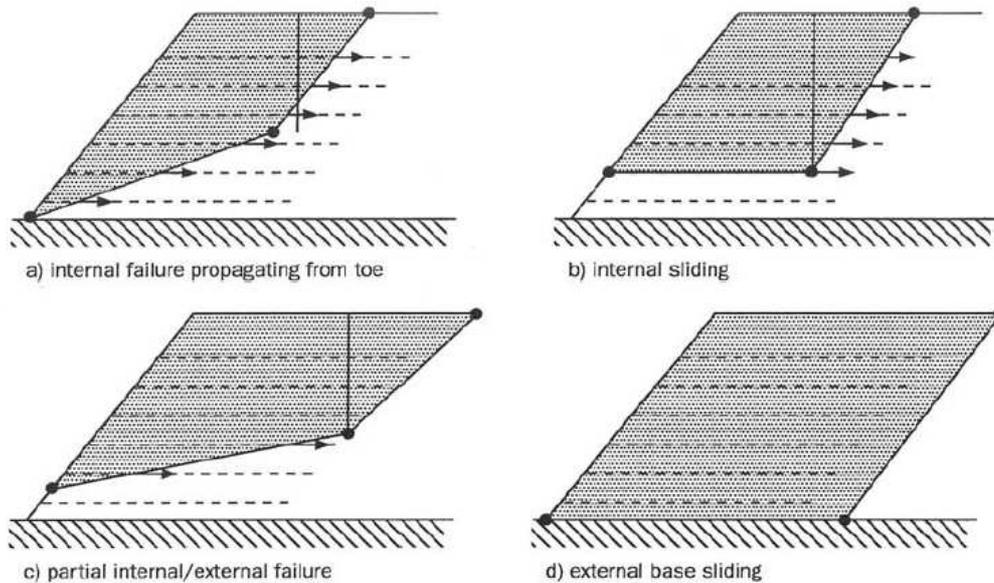


Figure 5: Some Two-Part Wedge Failure Mechanisms

## DESLIZAMIENTO INTERNO

La figura 5b ilustra un mecanismo directo de deslizamiento interno en el cual el fondo de los límites de la cuña coincide con la capa de refuerzo. En la práctica se asume que la resistencia a cortante potencial a lo largo de esta superficie de fondo es modificada por la presencia de una capa de refuerzo. Por esta condición el término del coeficiente de fricción ( $\tan \phi_f$ ) en el denominador y numerados de la ecuación 4ª se convierte en:  $\alpha \times \tan \phi_1$ , en dónde  $\alpha$  es el coeficiente directo de

deslizamiento. La magnitud del coeficiente directo está restringido a  $\alpha < \phi_f$ . Para las geomallas Miragrid® en combinación con suelos granulares bien compactados, los productos para construcción de Mirafi® recomiendan un valor  $\alpha=0.9$  para propósitos de diseño preliminar. Para un diseño final y análisis se puede determinar un valor representativo del coeficiente de deslizamiento directo a partir de los resultados de pruebas de cortante directa. Estas pruebas deben usar los geosintéticos propuestos para refuerzo y taludes con suelo preparado para las mismas condiciones que en campo.

### **FACTOR DE SEGURIDAD**

Un factor de seguridad mínimo para taludes con refuerzo en suelos friccionantes es  $FS = 1.5$  aplicado en la ecuación 1. La elección actual para el factor de seguridad debe estar basado en la recomendación de un ingeniero geotécnico que esté familiarizado con los suelos del sitio, función del talud, cargas adicionales, material de refuerzo propuesto y método de construcción.

### **ANÁLISIS DE DESLIZAMIENTO CIRCULAR**

Esta sección presenta métodos de deslizamiento circulares para el diseño y análisis de taludes semi-verticales y terraplenes sobre cimentaciones estables. Para propósitos de diseño, se asume que los taludes están asentados en cimentaciones competentes de suelo o roca, los cuales son incompresibles. Las superficies portenciales de falla son asumidas como restringidas para el relleno en taludes y terraplenes sobre la cimentación estabilizada.

El método de análisis descrito en el manual se basa en el método simplificado de Bishop, en el cual la relación del factor de seguridad contra la falla del talud está descrita por el resultado de la suma de los momentos resistentes sobre los momentos motores que fueron calculados usando el método de las dovelas. Los momentos motores son ocasionados por el peso propio del suelo y cualquier carga sobre a superficie de la estructura. Los momentos resistentes son proporcionales a la resistencia cortante del suelo en movimiento desarrollado a lo largo de la superficie de falla. Este método de análisis convencional y ampliamente utilizado puede ser fácilmente modificado para incluir el momento resistente debido a las capas de refuerzo que intersectan la superficie de falla. La metodología descrita en esta sección sigue las recomendaciones integradas en la guía de FHWA para taludes reforzados.

En los ejemplos siguientes, el suelo se asumirá como material granular y los cálculos de estabilidad están basados en un análisis de esfuerzo efectivo. Este análisis es por lo tanto apropiado para suelos drenados.

### **TALUD SIN REFUERZO**

El factor de seguridad  $FS_u$  para un talud sin refuerzo es expresado como:

$$FS_u = \frac{\text{Resisting Moment}}{\text{Driving Moment}} = \frac{M_r}{M_d} \quad (\text{Eqn 5})$$

El talud puede ser dividido en un número conveniente de dovelas ó “rebanadas” como se ilustra en la figura 6 para un centro de rotación pre-escrito ó un radio R. El factor de seguridad en la ecuación 5 puede ser expandido a lo mostrado en la ecuación 6. Aquí los símbolos de sumatoria están en función a las dovelas verticales.

Los parámetros mostrados en la figura 6 y en la ecuación 6 son:

W = peso total de la dovela sobre la unidad de peso más grande del suelo, más la sobrecarga (q x b) sí está presente.

q = sobrecarga uniformemente distribuida actuante en la cresta del talud.

b = el ancho horizontal de la dovela.

Ψ = el ángulo formado por la tangente entre el medio punto de la dovela y la horizontal.

C' = cohesión del suelo en la base de la dovela.

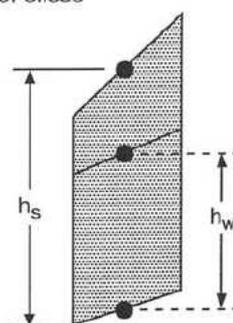
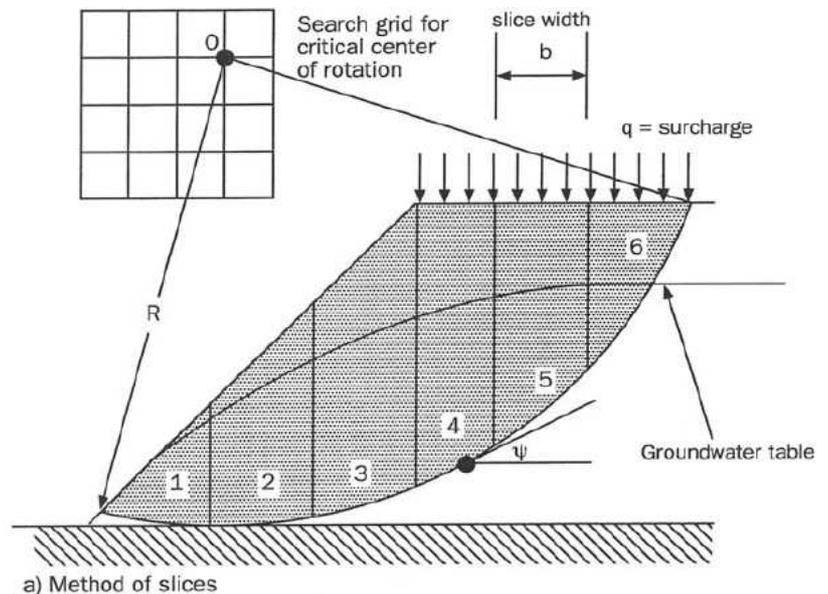
ϕ' = ángulo de fricción pico en la base de la dovela.

r<sub>u</sub> = coeficiente adimensional de presión de poro del agua.

$$FS_u = \frac{1}{\sum W \sin \psi} \sum \left[ \frac{\{c' b + W(1 - r_u) \tan \phi'\} \frac{\sec \psi}{1 + \tan \psi \tan \phi'}}{FS_u} \right] \quad (\text{Eqn 6})$$

El coeficiente de presión de poro r<sub>u</sub> puede ser aproximado usando la propuesta ilustrada en la figura 6. El resultado podría tener un pequeño error que se considera conservador. Para cualquier dovela que no intersecta en flujo del agua r<sub>u</sub> = 0.

La presencia del factor de seguridad en ambos lados de la ecuación 6 quiere decir que para una falla circular se requiere un proceso de iteraciones sucesivas hasta que la solución converge con un valor único de FS<sub>u</sub>. Claramente, los cálculos requeridos para hacer



$$r_u = \frac{u}{W/b} \approx \frac{h_w \gamma_w}{W/b}$$

u = porewater pressure at base of slice

γ<sub>w</sub> = unit weight of water (62.4 lbs/ft<sup>3</sup>)

b) Pore water pressure coefficient

Figure 6: Circular Slip Analysis and Method of Slices for Unreinforced Slope

estas ecuaciones y para inspeccionar un gran número potencial de círculos de deslizamiento crítico hacen referencia a que se obtiene un mejor análisis utilizando un software.

Los software comercialmente disponibles son G Slope de Mitre Software Corporation, RSS de FHWA, ReSSA y ReSlope de ADAMA Ingeniería, STABL de la universidad Purdue y UTEXAS4 de la universidad de Texas, así como otros pueden ser utilizados para este mismo propósito.

## TALUDES REFORZADOS

Es factor de seguridad  $FS_r$  para taludes reforzado está expresado como:

$$FS_r = FS_u + \frac{\text{resisting movement due to reinforcement}}{\text{driving moment}} \quad (\text{Eqn 7})$$

El término de la derecha representa el factor de seguridad adicional contra la falla del talud debido al efecto estabilizador de la tensión del geosintético de refuerzo. Refiriéndose a la figura 7, la expresión del factor de seguridad para un caso de talud reforzado puede ser expresada como:

$$FS_r = FS_u + \left( \frac{\sum T_i R_{T_i} / \cos \psi_i}{M_D} \right) \quad (\text{Eqn 8})$$

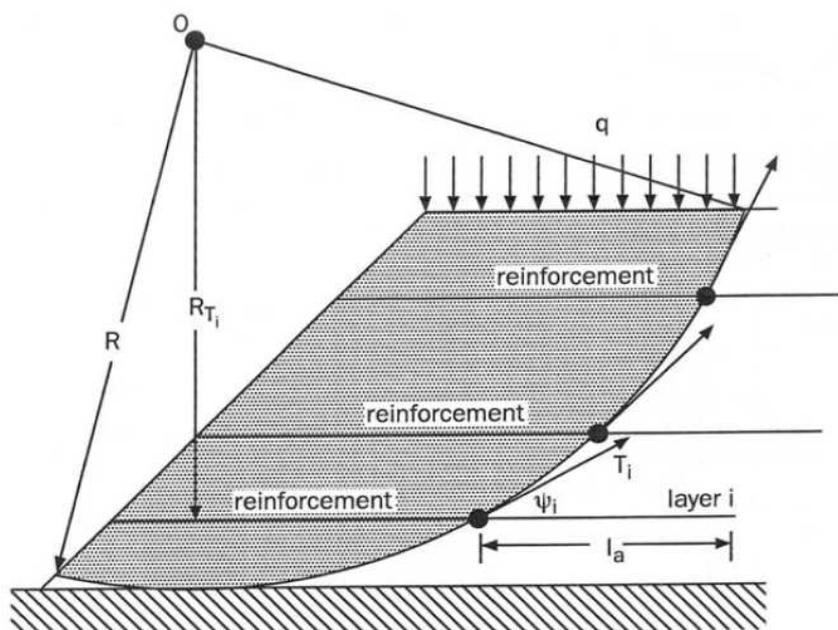


Figure 7: Circular Slip Analysis and Method of Slices for Reinforced Slope



**MÉTODO APROXIMADO PARA EL CÁLCULO DE FACTOR DE SEGURIDAD EN PRUEBAS DE TALUDES REFORZADOS.**

Para propósitos de diseño preliminar, el factor de seguridad en un análisis de estabilidad de taludes sin refuerzo puede ser modificado para estimar el factor correspondiente al talud reforzado usando reforzamiento extensible (referencia a la figura 8).

**Paso 1:** Calcule  $FS_u$  para el talud sin refuerzo y determine la geometría correspondiente al círculo de falla crítico.

**Paso 2:** Calcule la fuerza de recuperación total  $\Sigma T_i$  disponible, basado en la sumatoria del LTDS de todas las capas de refuerzo que intersectan el círculo de falla crítico del paso 1.

**Paso 3:** Asuma que  $\Sigma T_i$  actúa paralelo al círculo de falla crítico sin refuerzo y calcule el factor de seguridad para un talud reforzado como sigue:

$$FS_r = FS_u + R \times \frac{\Sigma T_i}{M_D} \quad (\text{Eqn 9})$$

**ESTABILIDAD EXTERNA DE UNA MASA DE SUELO REFORZADA SOBRE UNA CIMENTACIÓN ESTABLE.**

Las guías de instalación de la FHWA contienen recomendaciones para el análisis de estabilidad de deslizamiento externo de una masa de suelo sin refuerzo sobre una cimentación estable. El mecanismo de deslizamiento asumido en estos cálculos es conceptualmente idéntico al mecanismo ilustrado en la figura 5d. La masa de suelo reforzada es tratada como una estructura de gravedad equivalente con una masa igual a la perteneciente a la zona reforzada sobre la base. El factor de seguridad contra la base de deslizamiento es calculada como la relación de la resistencia en la base de deslizamiento (fuerza/unidad por ancho del talud) sobre la fuerza motora resultante de los materiales de retención del talud.

Los límites del refuerzo de la masa de suelo puede ser estimados usando el método de diseño gráfico descrito en la siguiente sección ó de los resultados del análisis de superficie circular descrito en la sección previa.

## **GRÁFICOS PARA DISEÑO PRELIMINAR DE TALUDES SEMI-VERTICALES Y TERRAPLÉNES SOBRE CIMENTACIONES ESTABLES.**

Esta sección describe como el diseñador puede usar una serie de gráficos para conformar un diseño preliminar del talud reforzado o terraplén. Los diseños preliminares que resultan de esta propuesta están restringidos a taludes o terraplenes compuestos de suelos granulares drenantes y construidos sobre cimentaciones estables. Los gráficos han sido generados usando métodos de análisis de equilibrio límite de la cuña de dos partes y cubriendo una geometría simple con un rango de taludes entre los 90 (verticales) a los 30 grados y un rango de ángulos de fricción entre 15° y 50°. Un ángulo de fricción factorizado  $\phi'_1$  (Ecuación 1) debe ser utilizado con las gráficas de diseño para representar las variaciones de las propiedades del suelo e incertidumbre en la geometría del talud y sus cargas.

### **SUPUESTOS PRINCIPALES**

Las suposiciones básicas usadas para generar los gráficos son las siguientes:

- 1.- El suelo de cimentación debajo del pie del Talud son estables y cualquier inestabilidad potencial es restringida a las masas de suelo granulares sin cohesión y libre drenaje sobre la elevación del pie.
- 2.- El nivel de aguas subterráneas está muy por debajo del pie del Talud.
- 3.- Las propiedades del suelo son unicamente descritas por una unidad de peso uniforme  $\lambda$  y un ángulo de fricción pico  $\phi'$  (grados).
- 4.- La intersección de la superficie de falla con los límites del talud ocurre al pie del mismo y en los puntos detrás de la cresta.
- 5.- Las fuerzas entre dovelas ó “rebanadas” han sido asumidas para actuar en un ángulo  $\lambda=\phi'$  a la horizontal.
- 6.- Ninguna carga adicional del Talud debida a fuerzas sísmicas está presente.
- 7.- El refuerzo primario utilizado es el de productos Mirafi®.

### **CÁLCULO DE ÁNGULO DE FRICCIÓN FACTORIZADO PARA DISEÑO**

Un factor de seguridad FS debe ser aplicado al ángulo de fricción pico del suelo para representar la variación en las propiedades del suelo y la incertidumbre de la geometría del Talud y sus cargas. Para taludes en general el valor FS = 1.5 es típico. Sin embargo, es responsabilidad del ingeniero geotecnista el recomendar un factor de seguridad apropiado basado en las condiciones del sitio, cargas externas y la función del talud. El ángulo de fricción factorizado del suelo  $\phi'_f$  es utilizado en los cálculos descritos en el siguiente texto. Dicho ángulo es calculado como se muestra a continuación:

$$\phi'_f = \tan^{-1}\{(\tan\phi') / FS\}$$

(Eqn 10)

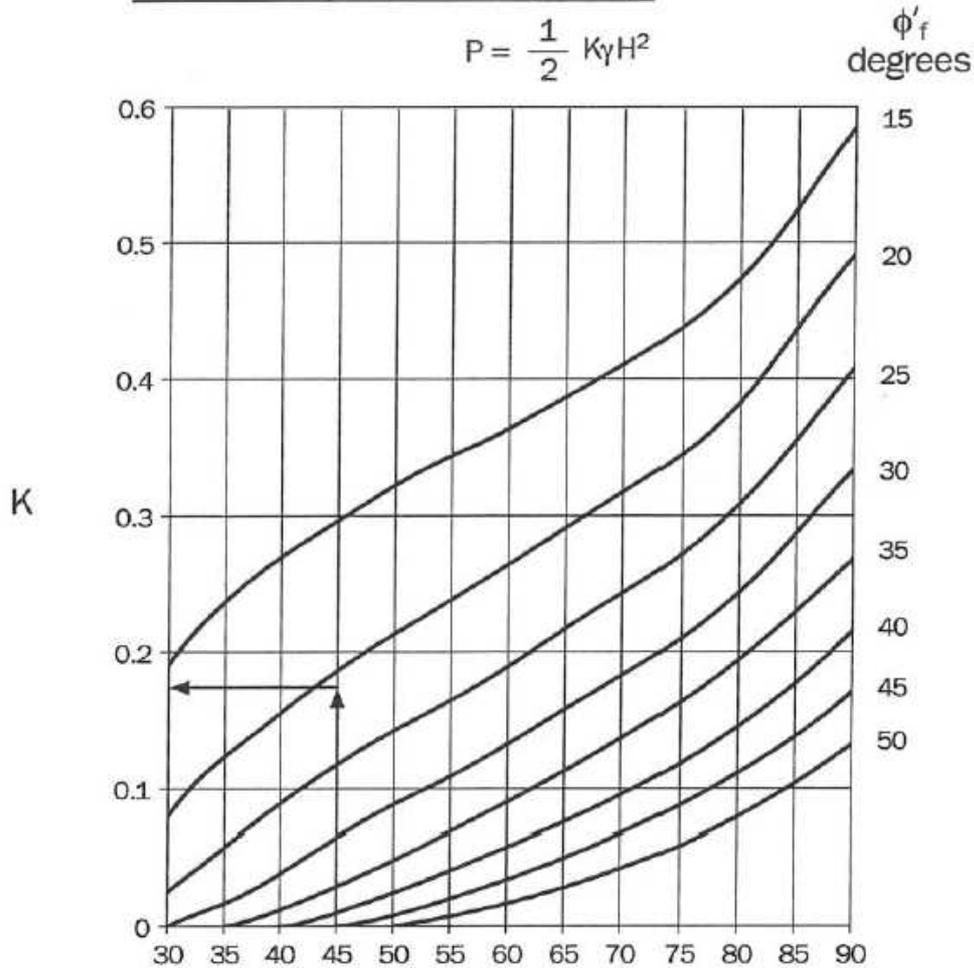
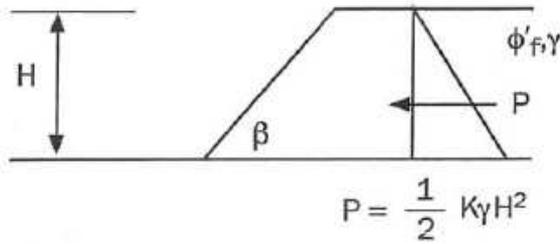


Chart 1: Equivalent Coefficient of Earth Pressure,  $K = f(\phi'_f, \beta)$

## GRÁFICOS DE DISEÑO COEFICIENTE DE PRESIÓN DE TIERRA (GRÁFICO 1)

Para estimar el número mínimo de capas de refuerzo primario en un Talud es necesario calcular la red de fuerza horizontal "P" requerida para mantener el Talud en su límite de equilibrio. El enfoque adoptado para generar el gráfico de diseño es para determinar la cuña crítica de dos partes que rinde el máximo requerido de fuerza horizontal "P". La geometría usada en el análisis de la cuña de dos partes está ilustrada en la Figura 9.

El gráfico 1 da el coeficiente equivalente máximo de la presión activa “K” del suelo, basado en una búsqueda de todas las dos partes de cuña potenciales para un  $\beta$  y un ángulo de fricción ( $\phi' = \phi'_{f}$ ). La magnitud de la fuerza P es determinada examinando un gran número de geometrías de cuñas definidas por una malla de puntos sobrepuestos en la sección transversal del Talud. Para cada punto el ángulo  $\theta_2$  fue variado para determinar el máximo de fuerza P fuera de balance. El análisis asumió que las fuerzas entre dovelas actúan a 1/3 de la altura del límite de esta unión (el punto de aplicación es una variante importante en el cálculo de excentricidad descrito en la siguiente sección).

La restricción que el ancho L de la zona de refuerzo debe ser suficiente para capturar ambas partes de la cuña está ilustrada en la figura 10. El cálculo para el ancho adecuado de la zona de refuerzo para prevenir el deslizamiento de la base puede ser referido a la figura 11. Los cálculos para determinar el mínimo de ancho de base tiene como planteamiento la siguiente relación de factor de seguridad:

$$FS = \frac{S}{P_2 \cos \lambda} \tag{Eqn 11}$$

$$= \frac{\alpha (W_1 = P_2 \sin \lambda) \tan \phi'}{P_2 \cos \lambda} = 1$$

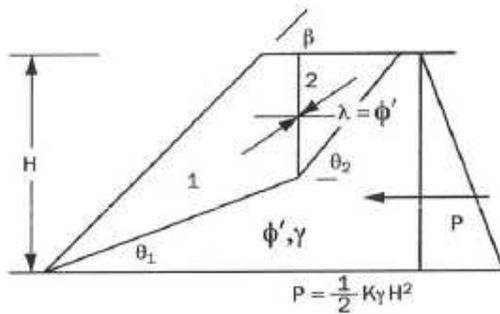


Figure 9:  
Two-Part Wedge Analysis to Calculate Unbalanced Horizontal Force P.

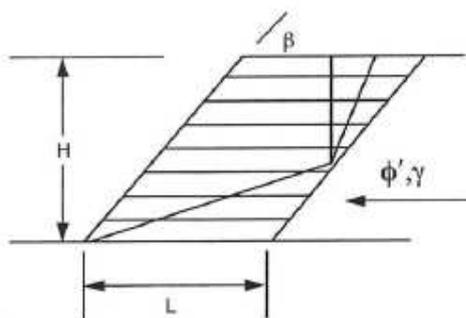


Figure 10:  
Reinforced Zone Containing Critical Two-Part Wedge

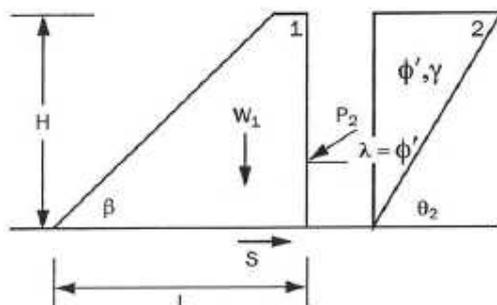


Figure 11:  
Free Body Diagram for Calculation of Base Sliding

## LONGITUD DE REFUERZO MÍNIMO (GRÁFICO 2)

El cálculo de la longitud mínima de refuerzo está basado en el siguiente criterio:

- 1.- Todas las longitudes de refuerzo son iguales (es decir, truncan paralelamente a la cara del Talud).
- 2.- La zona de refuerzo debe tener suficiente longitud "L" para contener la cuña crítica de dos partes sin refuerzo.
- 3.- La zona de refuerzo debe tener suficiente longitud "L" para que el Talud no se desplace por arrancamiento.
- 4.- La zona de refuerzo debe tener suficiente longitud "L" para que los esfuerzos verticales tensionantes se desarrollen a lo largo de la superficie del suelo de cimentación (es decir, la excentricidad de la base debe caer dentro del medio tercio del ancho de la base L).

Aquí el parámetro "S" es la resistencia a cortante actuante en la base del talud y es controlada por el ángulo de fricción de los tipos de suelo del Talud  $\phi'$ , el peso del material  $W_1$  (por consiguiente el ancho de la zona L reforzada) y el coeficiente de deslizamiento directo (el cual ha sido tomado como  $\alpha = 0.9$ ). La cuantía  $P_2$  es la fuerza balanceada entre dovelas actuante en la porción 1 de la cuña debida al lado derecho de la porción 2.

La figura 12 hace referencia al cálculo para la excentricidad de la base. El análisis involucra un incremento progresivo de la dimensión "L" hasta que la distribución lineal de la presión vertical  $\sigma'_v$  es la compresión para todos los valores máximos de  $P_2$ .

El resultado del análisis es presentado en la forma normalizada de L/H en el gráfico 2 para la condición  $\lambda = \phi'$  (dónde  $\phi' = \phi'_1$ ). Aquí, "L" es la longitud de refuerzo y "H" es la altura del Talud.

## CÁLCULO DEL MÍNIMO DE CAPAS DE REFUERZO

El coeficiente equivalente de presión "K" para el diseño es obtenido del gráfico 1 usando  $\phi'_1$ . El número mínimo de capas de refuerzo  $N_{min}$  se puede calcular con lo siguiente:

$$N_{min} \geq \frac{P}{LTDS} = \frac{(1/2) K\gamma H^2}{LTDS} \quad (\text{Eqn 12})$$

Aquí el término LTDS denota la fuerza de diseño a largo plazo (esfuerzo de trabajo permisible) de los productos de refuerzo Mirafi®.

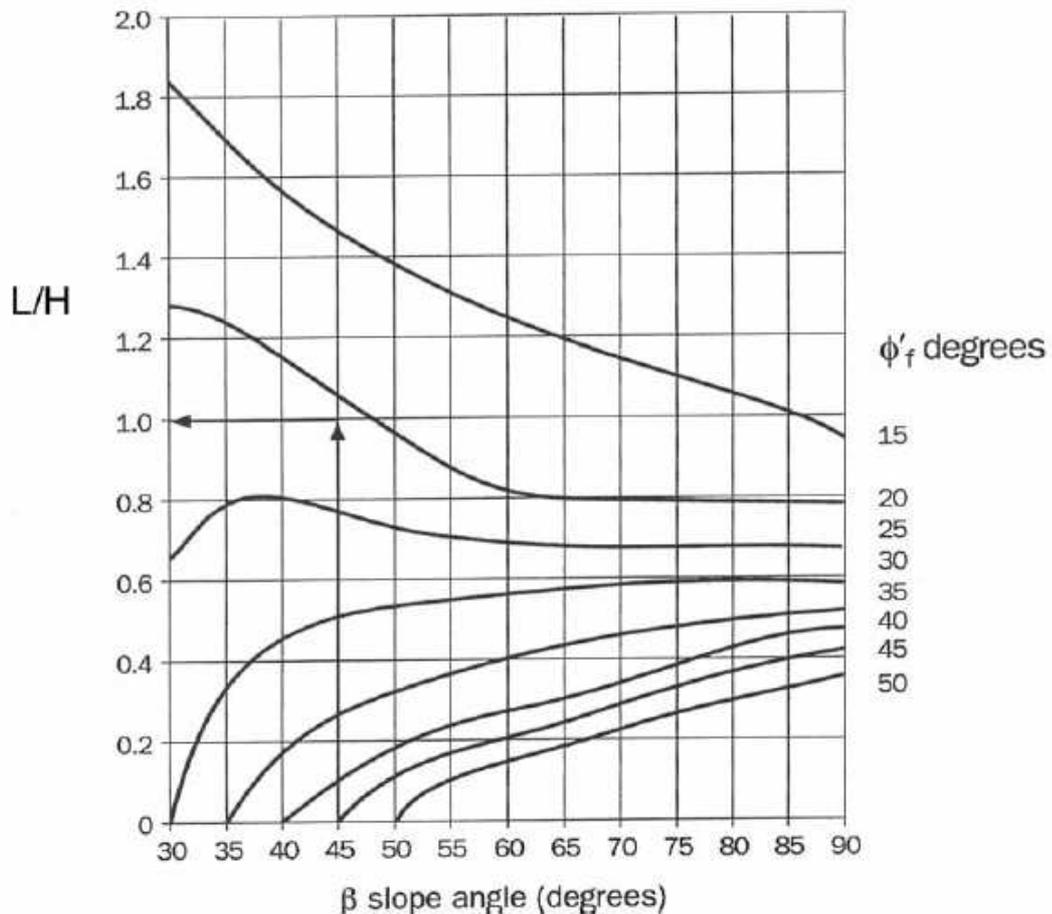
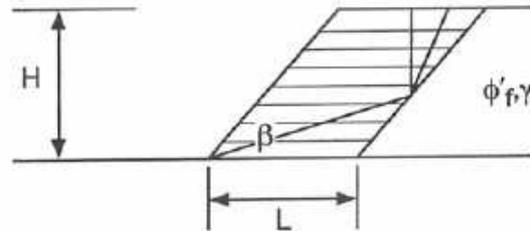


Chart 2: Minimum Ratio of Reinforcement Length to Slope Height  $L/H$  to contain Critical Two-Part Wedge and Satisfy Sliding and Eccentricity Criteria.

## CÁLCULO DE LA LONGITUD MÍNIMA DE REFUERZO

La longitud mínima de refuerzo "L" se calcula a partir del Gráfico 2, basado en  $\phi'$ ,  $\beta$  y de la altura del Talud "H".



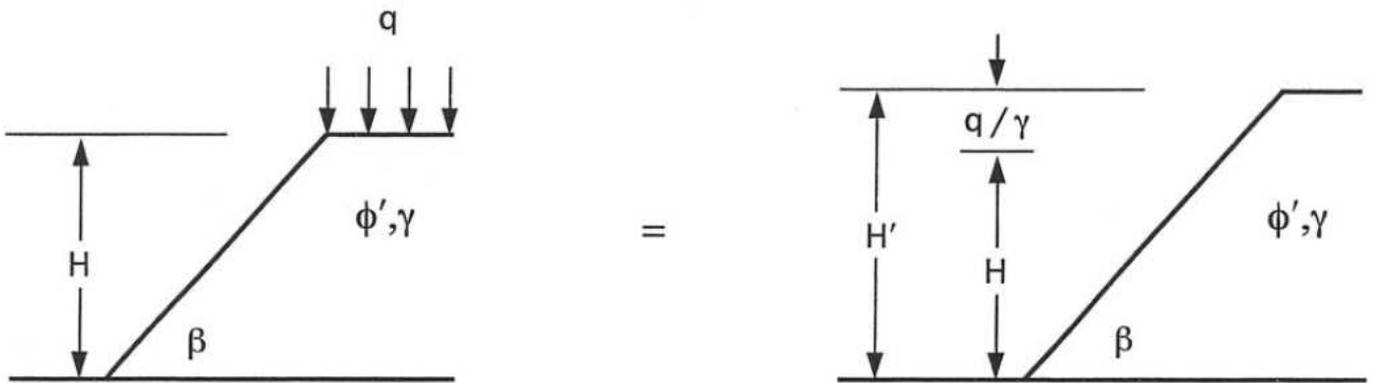
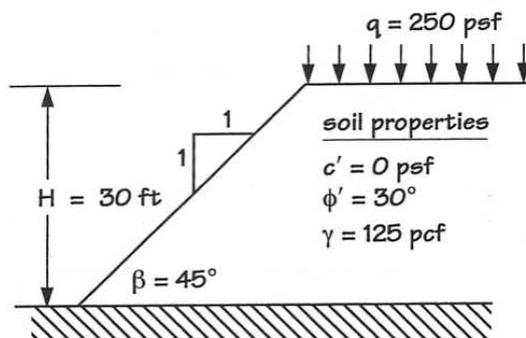


Figure 13: Modified Slope Height to Incline Influence of Uniformly Distributed Surcharge

## EJEMPLO DE DISEÑO

El siguiente diseño está relacionado con la geometría del talud y parámetros del sitio mostrado en el ejemplo de la figura 1. Se requiere que el ingeniero recomiende una capa de refuerzo usando productos de refuerzo con Geomalla Miragrid®.



Example Figure 1:  
Proposed slope geometry and soil parameters for design example.

**Paso 1.-** Seleccione los parámetros de diseño para el suelo y las propiedades de Miragrid.

### Propiedades del suelo:

Peak friction angle,  $\phi' = 30^\circ$   
 Cohesion,  $c' = 0 \text{ psf}$   
 bulk unit weight,  $\gamma = 125 \text{ pcf}$   
 Slope factor-of-safety,  $FS = 1.5$

Slope height,  $H = 30 \text{ ft}$   
 Uniform surcharge pressure,  $q = 250 \text{ psf}$   
 Slope angle,  $\beta = 45^\circ$

### Propiedades de la Geomalla:

Long term design strength (LTDS), in Type 3 backfill: sand, silt, clay:

Miragrid 2XT = 949 lb/ft  
 Miragrid 3XT = 1558 lb/ft  
 Miragrid 5XT = 2234 lb/ft  
 Miragrid 7XT = 2961 lb/ft  
 Miragrid 8XT = 3636 lb/ft  
 Miragrid 10XT = 4312 lb/ft

**Paso 2.-** Calcule el ángulo de fricción factorizado  $\phi'_f$ .

$$\phi'_f = \tan^{-1} \{ (\tan\phi') / FS \}$$
$$\phi'_f = \tan^{-1} \{ (\tan 30^\circ) / 1.5 \} = 21.0^\circ$$

**Paso 3.-** Calcule la altura de Talud equivalente H.

$$H' = H + (q/\gamma)$$
$$H' = 30 + (250/125) = 32 \text{ ft}$$

**Paso 4.-** Determine la fuerza del coeficiente K con ayuda del gráfico 1 usando un ángulo de talud  $\beta$  y ángulo de fricción interna  $\phi'_f$ .

$$K = 0.18$$

**Paso 5.-** Determine la fuerza total horizontal "P" que debe resistir el Miragrid®

$$P = (1/2) K \gamma (H')^2$$
$$P = (1/2) 0.18 (125) (32)^2 = 11520 \text{ lb/ft}$$

**Paso 6.-** Calcule el número mínimo de capas de Miragrid® ( $N_{\min}$ ) requerida para la fuerza "P".

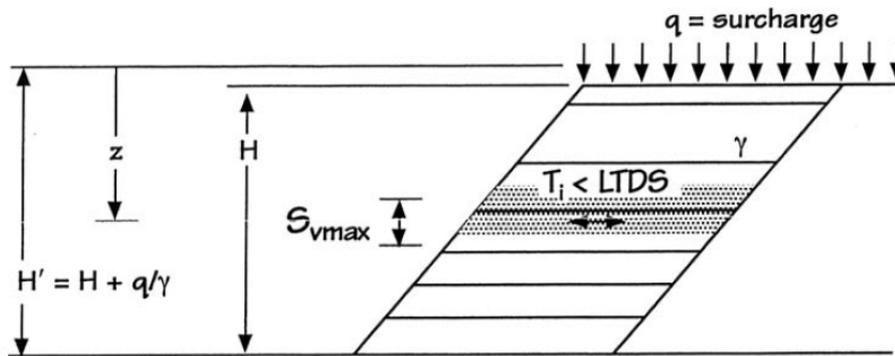
$$N_{\min} = P / (LTDS)$$
$$N_{\min} = \text{para Miragrid 2XT} = 11520 / 949 = 12.1 \text{ capas} - \text{use } 13 \text{ capas}$$
$$N_{\min} = \text{para Miragrid 3XT} = 11520 / 1558 = 7.4 \text{ capas} - \text{use } 8 \text{ capas}$$
$$N_{\min} = \text{para Miragrid 5XT} = 11520 / 2234 = 5.2 \text{ capas} - \text{use } 6 \text{ capas}$$
$$N_{\min} = \text{para Miragrid 7XT} = 11520 / 2961 = 3.89 \text{ capas} - \text{use } 4 \text{ capas}$$
$$N_{\min} = \text{para Miragrid 8XT} = 11520 / 3636 = 3.2 \text{ capas} - \text{use } 4 \text{ capas}$$

**Paso 7.-** Determine la longitud de embebimiento de la Geomalla primaria con ayuda del gráfico 2, utilizando un ángulo de fricción factorizado  $\phi'_f$ , ángulo de Talud  $\beta$  y altura modificada H'.

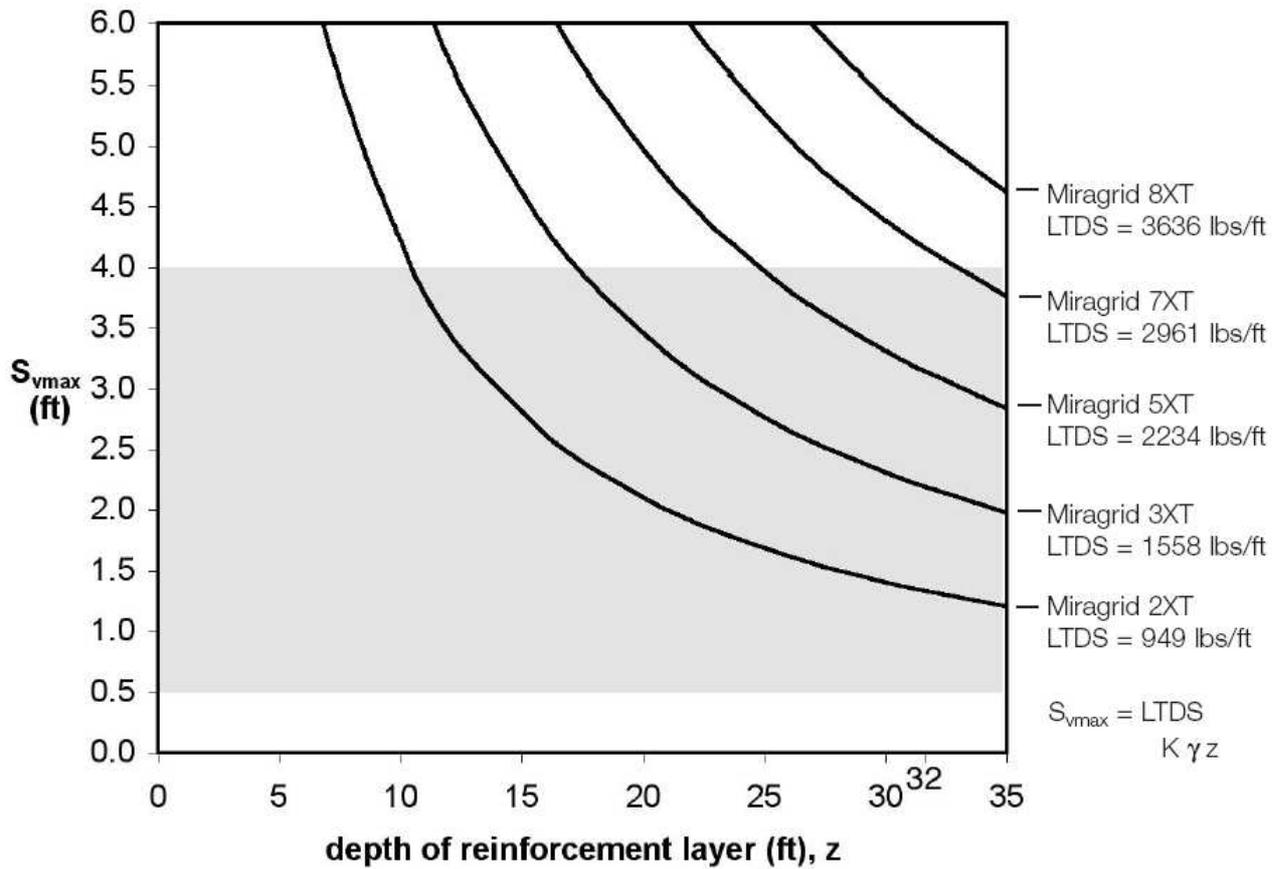
$$L/H' \text{ del gráfico 2} = 1.0$$
$$L = (L/H') (H')$$
$$L = (1.0) (32) = 32.0 \text{ ft}$$

**Paso 8.-** Calcule el espaciamiento vertical máximo permisible para cada producto de Miragrid usando:

$$S_{v\max} = (LTDS) / (K\gamma z)$$



**Example design problem - Calculation of maximum spacing for primary reinforcement**  
**( $K = 0.18$ ,  $\gamma = 125 \text{ lbs/ft}^3$  and  $H' = 32 \text{ ft}$ )**



Example Figure 2: Example Design Problem  
 Calculation of maximum spacing for primary reinforcement  
 ( $K = 0.18$ ,  $\gamma = 125 \text{ lbs/ft}^3$  and  $H' = 32 \text{ ft}$ )

En donde “z” es la distancia desde la parte superior del Talud con una altura H'. Podría ser conveniente desarrollar un gráfico como el que es mostrado en el ejemplo de la figura 2. Seleccione el espaciamiento de las capas de geomalla empezando desde el fondo del Talud y avanzando hacia arriba. Por ejemplo: el gráfico de espaciamiento ilustra que el producto Miragrid® 7XT, 8XT y 10 XT no serían recomendados ya que son demasiado fuertes para cualquier nivel del Talud y el espaciamiento estaría controlado por el criterio de 4 pies de espaciamiento máximo recomendado en las guías de instalación de FHWA. Una selección más razonable sería Miragrid® 2XT, 3XT, 5XT o alguna combinación de estos productos.

**Paso 9.- Opción 1:** Seleccione Miragrid® 2XT y calcule el espaciamiento máximo de geomalla en el fondo de la zona de terraplen.

$$S_{vmax} = LTADL / K\gamma H'$$

$$S_{vmax} = 949 / (0.18 \times 125 \times 32) = 1.3; \text{ use } S_{vmax} = 1.3 \text{ ft}$$

Continúe con Miragrid® 2XT. Para capas dentro de los 12 pies de la cresta modificada del Talud, el espaciamiento entre capas será controlado por el criterio de espaciamiento máximo de 4 pies.

Opción 2: Seleccione Miragrid® 3XT y calcule el espaciamiento máximo de geomalla en el fondo de la zona de terraplen.

$$S_{vmax} = LTDS / K\gamma H'$$

$$S_{vmax} = 1558 / (0.18 \times 125 \times 32) = 2.2; \text{ use } S_{vmax} = 2.0 \text{ ft}$$

Continúe con Miragrid® 3XT. Para capas dentro de los 18 pies de la cresta modificada del Talud, el espaciamiento entre capas será controlado por el criterio de espaciamiento máximo de 4 pies.

Opción 3: Seleccione Miragrid® 5XT y calcule el espaciamiento máximo de geomalla en el fondo de la zona de terraplen.

$$S_{vmax} = LTDS / K\gamma H'$$

$$S_{vmax} = 2234 / (0.18 \times 125 \times 32) = 3.1; \text{ use } S_{vmax} = 3.0 \text{ ft}$$

Continúe con Miragrid® 5XT. Para capas dentro de los 26 pies de la cresta modificada del Talud, el espaciamiento entre capas será controlado por el criterio de espaciamiento máximo de 4 pies.

Opción 4: “rompa” el terraplen en tres zonas: superior, medio e inferior y reduzca la fuerza del reforzamiento en cada capa comenzando con el reforzamiento más fuerte que se encuentra en la parte inferior. (ejemplo: 5XT). La zona del fondo puede ser asumida a tener un espesor de 12 pies, la zona media 10 pies y la zona

superior también 10 pies. Redefina el espaciamiento de refuerzo para minimizar el número de capas de refuerzo primario y simplificar la construcción.

Zona del fondo: (z = 32 a 20 feet):  
use 5XT  
Svmax = 3.0 ft (como lo anterior)

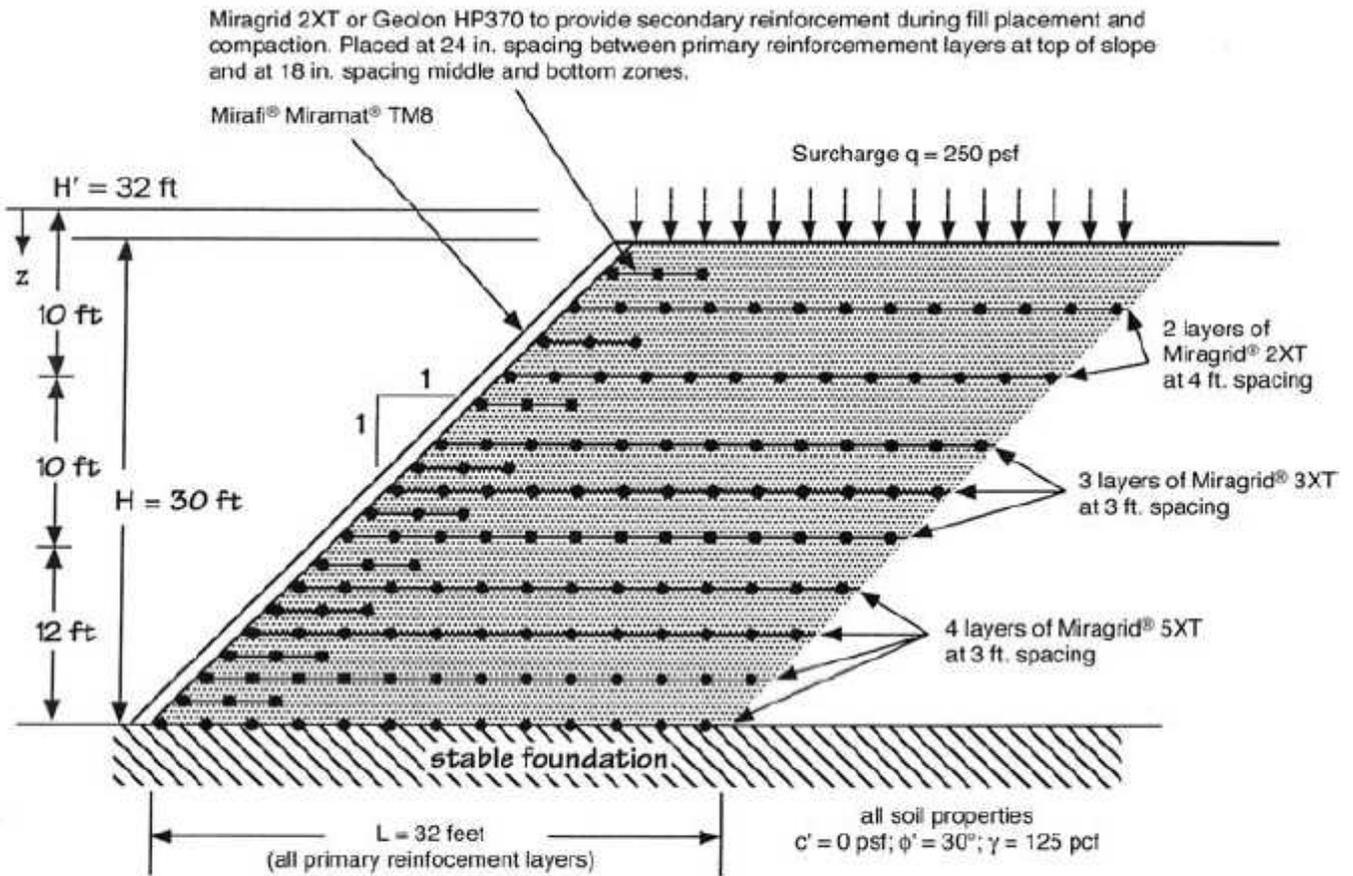
Zona media: (z =20 a 10 feet):  
use 3XT  
Svmax =  $1558 / (0.18 \times 125 \times 20) = 3.5$ ; use Svmax = 3.0 ft

Zona superior: (z = 0 a 10 feet):  
use 2XT  
Svmax =  $949 / (0.18 \times 125 \times 10) = 4.2$ ; use Svmax = 4.0 ft

**Paso 10.-** Agregue detalles para representar la pendiente completa. Si el espaciamiento del refuerzo primario excede las 18 pulgadas, use Miragrid® 2XT en los intervalos de 18 y 24 pulgadas como refuerzo secundario. Si  $\beta > 45^\circ$ , envuelva la cara del talud con geomalla y provea de un control de erosión apropiado o revegetación como protección adicional.

**Paso 11.-** Dibuje el talud mostrando los refuerzos primarios y secundarios como se muestra en la figura ejemplo 3. El diseño final recomendado será basado en una capa que se encuentran entre las propiedades requeridas y el deseo de mantener la capa lo más simple posible para facilitar la construcción.

**Paso 12.-** Verifique la estabilidad interna y calcule la estabilidad externa de la sección transversal usando un método de estabilidad de taludes. Ya que este análisis requiere un a cantidad exhaustiva de cálculos se considera inconveniente realizarlo a mano, el análisis será mejor si es por medio de software. Los módulos de falla incluyen multiples tipos de fallas internas por lo que deben ser considerados bloques de deslizamiento o de transición y modos de falla externos rotacionales o circulares. Las condiciones específicas del sitio controlarán continuamente la elección de esquema de refuerzo para las secciones transversales finales.



Example Figure 3: Example Miragrid® Reinforcement Layout

**References**

1. Carter, M. and S.P. Bentley (1991). *Correlations of Soil Properties*. Pentech Press, London. pp. 46, 90-91.
2. Jewell, R.A. (1991). *Revised Design Charts for Steep Reinforced Slopes*. Reinforced Embankments: Theory and Practice. D.A. Shercliff, Editor, Thomas Telford LTD., London. pp. 1-30.
3. *Geotextile Design and Construction Guidelines (1989a)*. NHI Course No. 13213, Pub. No. FHWA-HI-95-039, Revised April 1998.
4. *Mirafi Miragrid Reinforced Soil Submittal Binder*, TC Mirafi. 1998.
5. Geosyntec Consultants. *Final Report Geosynthetic Pullout Testing - Select Miragrid XT Geogrids with Concrete Sand*, April, 2001.
6. Koutsourais, M., Sandri, D., and Swan, R. *Soil Interaction Characteristics of Geotextiles and Geogrids*. Conference Proceedings from the Sixth International conference of Geosynthetics, vol 2, pp. 739-744.