

Autor: Ing. J. Roberto Montalvo, MSCE

1. Introducción

Terraplenes contruidos sobre capas de suelos blandos tienen la tendencia de desplazarse lateralmente debido a las presiones horizontales que actúan dentro de los mismos. Estas presiones causan esfuerzos cortantes horizontales en la base del terraplén los cuales deben ser resistidos por la capa de suelo que lo soporta. Si esta capa de suelo no tiene una resistencia adecuada al esfuerzo cortante, el resultado puede ser la falla. El uso de geosintéticos de alta resistencia, geotextiles o geomallas, pueden proporcionar refuerzo para aumentar la estabilidad y prevenir este tipo de fallas. Ambos geosintéticos pueden ser usados, asegurándonos que los mismos cumplan con los requisitos de diseño. Sin embargo, hay algunas diferencias en la forma que ellos se instalan, especialmente con respecto a la forma de coserse y como se manejan en el campo. También, en lugares con suelos muy finos y blandos, donde no se encuentren matrices formadas por raíces o capas vegetativas, el uso de geomallas puede requerir la colocación de un geotextil como medio de separación y filtración que prevenga la contaminación de la primera capa, especialmente si esta capa es un agregado abierto o suelo de este tipo.

El uso de refuerzo en la construcción de terraplenes permite:

- * Un aumento en el factor de seguridad de diseño;
- * Un aumento en la altura del terraplén;
- * Una reducción en los desplazamientos durante la construcción, por consiguiente, una reducción del relleno requerido; y
- * Un mejoramiento del funcionamiento del terraplén debido a la uniformidad de los asentamientos después de la construcción.

2. Consideraciones de Diseño

Actualmente abundan los métodos de análisis acerca de la estabilidad de terraplenes. Los que más se usan están basados en el método de análisis del esfuerzo total (análisis del equilibrio límite), muy similares a los análisis comunes de la mecánica del suelo para el análisis de la capacidad de carga y estabilidad de taludes y son los que de una forma modificada se usan regularmente en el diseño de terraplenes reforzados con geosintéticos.

La forma típica que los terraplenes contruidos sobre suelos blandos pueden fallar se presenta en la Figura No. 1. Estas formas de fallas han sido descrita y evaluada por muchos investigadores como son Terzaghi y Peck (1967); Christopher y Holtz (1985); Koerner (1990), etc. Estos tres modos de fallas indican los tipos de análisis de estabilidad requeridos. Además, el asentamiento y deslizamiento del terraplén así como la fluencia potencial del refuerzo, forman parte integral del diseño y lógicamente la evaluación de éstos debe tomarse en cuenta, aún la fluencia solamente es un factor si la velocidad de la misma en el refuerzo es mayor que el aumento de la resistencia en la capa de apoyo del terraplén debido a la consolidación.

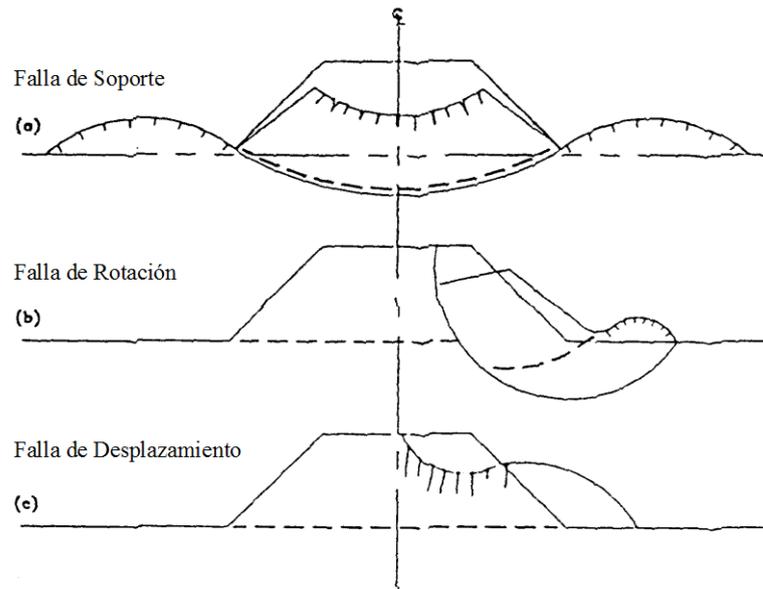


Figura No. 1 - Modos de Fallas de Terraplenes Reforzados (Haliburton, Anglin y Lawmaster, 1978).

En la mayoría de las situaciones prácticas se ha demostrado que el método basado en el análisis total de esfuerzos es un análisis conveniente y convencional y se recomienda en muchas situaciones. La condición más crítica para la estabilidad del terraplén es al final de la construcción, por eso el refuerzo solo tiene que desarrollar su función hasta que la capa de suelo apoyando el terraplén haya alcanzado suficiente resistencia para soportarlo. En general, el diseño con geosintéticos se encuentra dentro del lado conservador. Los procedimientos tradicionales para el diseño de un terraplén sobre suelo blando, deben ir acompañados de una investigación completa del subsuelo, como son evaluación de las presiones de poros, muestreos y ensayos de consolidación, etc.

3. Procedimiento de Dimensionamiento del Terraplén (Paso por Paso).

A continuación se presenta, paso a paso, el método de diseño de terraplenes reforzados con geosintéticos.

Paso No. 1 - Definir las Dimensiones y Condiciones de Cargas del Terraplén. Altura (H), Largo (L), Ancho (B), las pendientes de los taludes (b/H), Cargas Externas (q), Consideraciones Ambientales (drenaje, erosión, etc.), Velocidad de Construcción del Terraplén.

Paso No. 2 - Definir el Perfil del Subsuelo y Determinar las Propiedades de Ingeniería de las Capas del Subsuelo.

- A. Estratigrafía y Perfil del Subsuelo.
- B. Propiedades de Ingeniería del Subsuelo:

1. C_u : Esfuerzo Cortante (Cohesión), No drenada del suelo para el final de la construcción.
2. Parámetros de la cohesión drenada del suelo, C' y ϕ' , para las condiciones de largo plazo.
3. Parámetros de Consolidación: C_c , C_r , c_v , σ_p' .
4. Factores químicos y biológicos que pueden ser dañinos para el refuerzo.

C. Variación de las propiedades con la profundidad y sus alrededores.

Paso No. 3 - Determinar las Propiedades de Ingeniería de los Materiales de Relleno del Terraplén.

- A. Propiedades de Clasificación del Relleno.
- B. Relación Densidad-Contenido de Humedad .
- C. Propiedades de la Resistencia al Esfuerzo Cortante (Cohesión).
- D. Factores Químicos y Biológicos, dañinos al refuerzo.

Paso No. 4 - Establecer los Factores de Seguridad Mínimos y Criterios de Manejos de los Asentamientos del Terraplén.

Los siguientes son recomendaciones para los factores de seguridad mínimos:

- A. Capacidad de Soporte: 1.5 a 2.
- B. Estabilidad Global (Talud y Cimiento) al final de la Construcción: 1.3.
- C. Estabilidad Interna, a largo plazo: 1.5
- D. Estabilidad al Deslizamiento (Falla por Extensión): 1.5
- E. Carga Dinámica: 1.1
- F. Criterios de Asentamientos: depende de los requerimientos del proyecto.

Paso No. 5. - Calcular la Capacidad de Soporte.

- A. Cuando el espesor de la capa de suelo blando es mucho más grande que el ancho del terraplén, use la teoría de capacidad portante clásica:

$$q_{ult} = \gamma_{relleno} \cdot H = c_u \cdot N_c$$

donde: q_{ult} = Presión a la rotura (o última).

γ_{rell} = Densidad del Relleno

H = Altura del Terraplén

c_u = Cohesión, no drenada

N_c = Factor de Capacidad de Soporte

- B. Cuando la capa de suelo blando tiene una profundidad limitada, haga un análisis de estrechamiento lateral. Este análisis es aproximado y en este momento no existe un método el cual es aceptado por los ingenieros de suelos.

Paso No. 6 - Calcular la Estabilidad Global (Rotación) de los Taludes y Cimientos.

Realice un análisis de la superficie de rotación sobre el terraplén y el cimiento no reforzado para determinar la superficie crítica de falla y el factor de seguridad contra la inestabilidad de esfuerzo cortante local, Figura 2 (a).

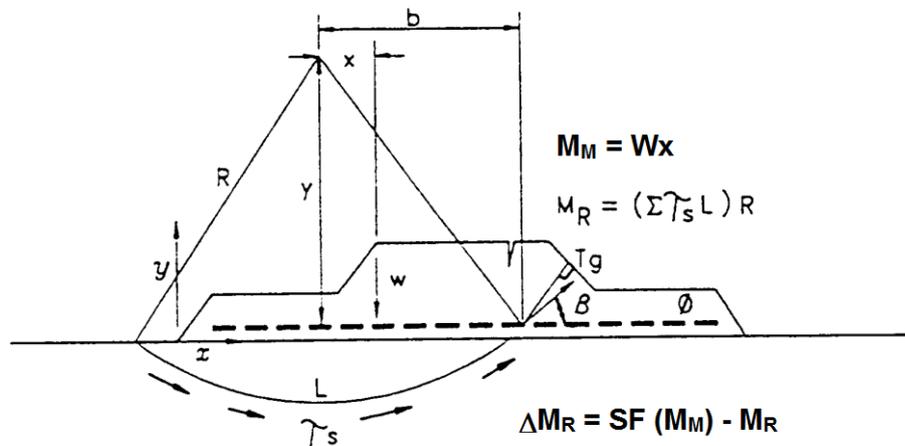
- A. Si el factor de seguridad calculado es mayor que el valor requerido mínimo, el refuerzo no es necesario. Entonces evalúe la estabilidad al deslizamiento (falla por extensión).
- B. Si el factor de seguridad es menor que el valor requerido mínimo, calcule la resistencia requerida del refuerzo, T_g , para obtener un factor adecuado a la seguridad usando la Figura 2 (b).

$$T_g = [FS (M_M) - M_R] / [R \cos (\theta - \beta)]$$

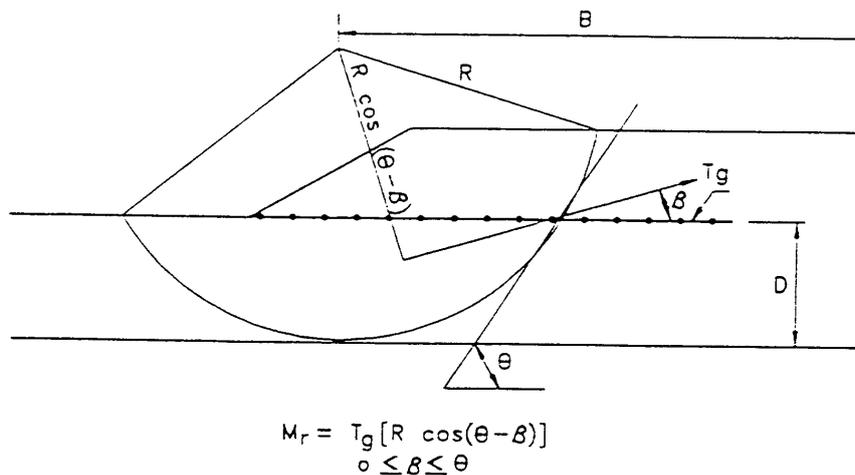
donde:

- T_g = Resistencia requerida del refuerzo
- FS = Factores de seguridad
- M_M = Momento Motor
- M_R = Momento Resistente del suelo
- R = Radio de la Superficie de deslizamiento supuesta.

a) Modelo de Falla Rotacional ($\beta = 0$)



b) Modelo de Falla Rotacional ($\beta \neq 0$)

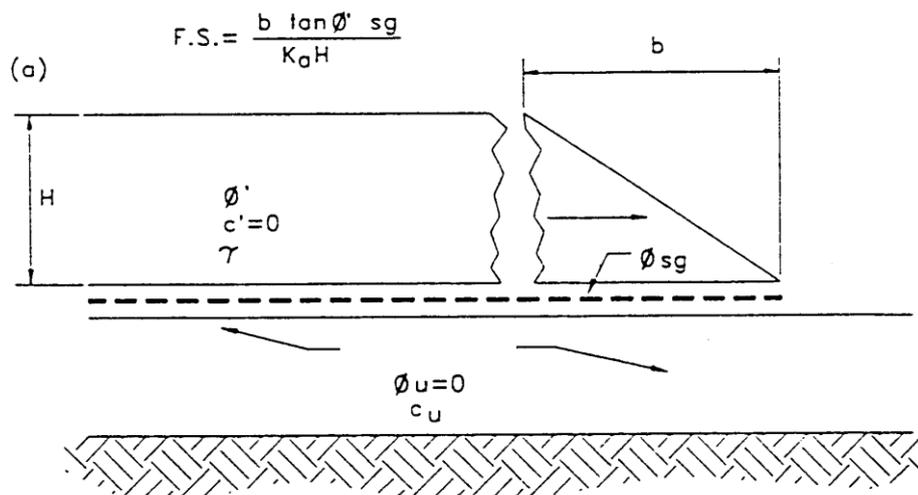


Paso No. 7 - Calcular la Estabilidad al Desplazamiento (Falla por Extensión)

Realice un análisis de la estabilidad al desplazamiento lateral de la cuña del terraplén, Figura No. 3.

- A. Si el factor de seguridad calculado es mayor que el requerido mínimo, el refuerzo no es necesario para esta posibilidad de falla.
- B. Si el factor de seguridad no es adecuado, calcule la resistencia requerida al desplazamiento lateral del refuerzo, T_{ls} , Figura 3 (b). La cohesión del suelo debe ser asumida igual a cero (0) para suelos extremadamente blandos y terraplenes bajos. Un valor de la cohesión debe incluirse con la colocación de la segunda capa y otras capas de relleno en la construcción por etapa.
- C. Evalúe el desplazamiento encima del refuerzo, Figura 3 (a).

a) Deslizamiento



b) Rotura

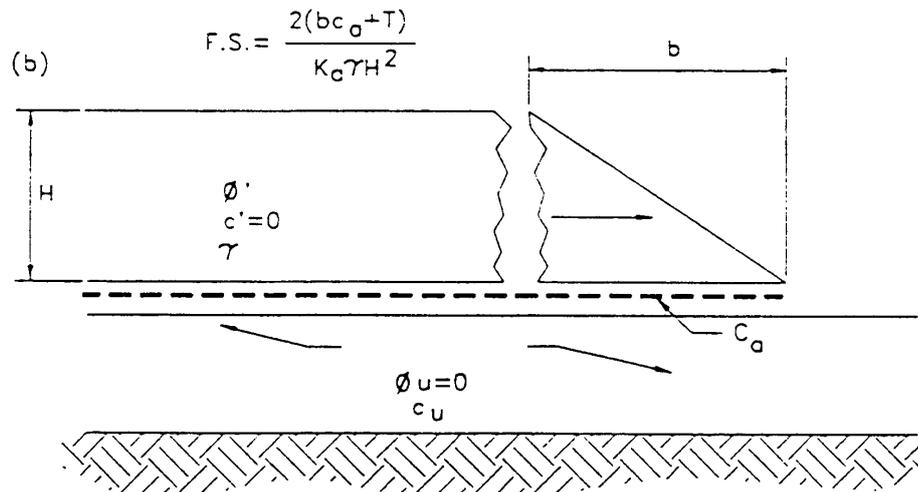


Figura No. 3 - Refuerzo Requerido para limitar el Desplazamiento Lateral del Terraplén.

Paso No. 8 - Establezca los requerimientos de la deformación tolerable del geosintético y calcule el módulo requerido del mismo, E, basado en el ensayo de la resistencia a la tensión, muestra ancha (ASTM D 4595).

Recomendaciones basadas en el tipo de materiales de relleno y la construcción sobre turbas;:

$$\begin{aligned} \text{Módulo del Refuerzo: } E &= T_{ls} / \epsilon_{\text{geos}} \\ \text{Suelos no Cohesivos: } \epsilon_{\text{geos}} &= 5 \text{ a } 10 \% \\ \text{Suelos Cohesivos: } \epsilon_{\text{geos}} &= 2 \% \\ \text{Turbas: } \epsilon_{\text{geos}} &= 2 \text{ a } 10 \% \end{aligned}$$

Paso No. 9 - Establecer los Requerimientos de la Resistencia del Refuerzo en la Dirección Longitudinal.

- A. Evalúe la capacidad de soporte y la estabilidad rotacional del talud en los extremos del terraplén.
- B. Use la resistencia a la tensión y la elongación calculada en los pasos No. 7 y 8 para controlar el desplazamiento del terraplén durante la construcción y para controlar las deformaciones siguiendo la etapa de construcción.
- C. Como la resistencia de las costuras transversa controlan, los requerimientos de las mismas son las resistencia más altas calculada en los pasos 6 o 7.

Paso No. 10 - Establecer las Propiedades del Geosintético

- A. Resistencias y Módulos de Diseño basado en ASTM D 4595, método de Resistencia a la Tensión, muestra ancha.
- B. La resistencia a la costura basado en ASTM D 4884, y es igual a la resistencia requerida en la dirección principal.
- C. El ángulo de fricción del suelo-geosintético, ϕ_{sg} , basado en ASTM D 5321 con suelos del lugar.
- D. La rigidez del geotextil basada en las condiciones y experiencias del lugar.
- E. Seleccione los requerimientos de sobrevivencia y de construcción para el geosintético basado en las condiciones del lugar, materiales de relleno, y del equipo de construcción (AASHTO M 288-96).

Paso No. 11 - Estimar la Magnitud y Velocidad de Asentamiento del Terraplén.

Use procedimientos convencionales y prácticos de mecánica de suelos.

Paso No. 12 - Establecer Procedimientos y Secuencias de la Construcción.

Ver sección 4.

Paso No. 13 - Establecer los Requerimientos de Monitoreo de la Construcción.

4. Método de Construcción

Los procedimientos para la construcción de terraplenes reforzados sobre suelos blandos son extremadamente importantes. Un procedimiento inapropiado para la colocación del material de relleno puede producir daños en el geosintético, asentamientos no uniforme y eventualmente falla del terraplén. A continuación presentamos algunas pautas a seguir para asegurar una instalación correcta del geosintético y del material de relleno.

A. Preparación de la Subrasante:

1. Corte árboles y troncos a nivel de la superficie del terrero.
2. No remueva o distorba las raíces o manta de pasto, dejando en su lugar capas vegetativas pequeñas.
3. En lugares ondulados o donde hay muchos tocones y árboles caídos, considere el uso de una plataforma de trabajo para la colocación del refuerzo. En estos casos, un geosintético de resistencia baja puede ser usado como capa de sacrificio y diseñada para asistir solamente en la construcción y como plataforma de trabajo.

B. Procedimientos de Colocación del Geosintético:

1. Orientar el geosintético con la dirección de su esfuerzo principal perpendicular al alineamiento del terraplén. No costuras paralelas al alineamiento deben ser permitidas.
2. Coloque el geosintético transverso al alineamiento lo más liso como sea posible.
3. Si se requiere, el geotextil debe ser cosido con todas las costuras hacia arriba y todas las puntadas revisadas. Las geomallas pueden ser unidas positivamente con cables, tubos, grapas, etc.
4. El geosintético debe ser manualmente estrechado para remover pliegues.
5. Antes de colocar el relleno, el ingeniero debe revisar el geosintético para asegurar que el mismo está libre de hoyos, desgarre, etc. Todo defecto debe ser reparado por recomendación del ingeniero.

C. Procedimientos de Colocación, Distribución, y Compactación del Relleno.

- I. Secuencia de construcción para subrasante extremadamente blandas (cuando la ola de lodo se forma), Figura 4.
 - a. Coloque el relleno a lo largo de las orillas del geosintético para formar la berma o caminos de accesos.
 - b. Después de construir las bermas, distribuya el relleno en el área entre las bermas. La colocación debe ser paralela al alineamiento y simétricamente desde la berma hacia dentro para mantener una cóncava centrífuga que contenga la ola de lodo, Figura No. 5.
 - c. El tráfico en la primera capa debe ser paralelo al alineamiento del terraplén; no doblaje del equipo de construcción debe ser permitido.
 - d. La primera capa debe ser compactada solamente por el paso del equipo de construcción, tractores y cargadores.
 - e. Una vez que el terraplén este por lo menos de 600 mm sobre el nivel original de terrero, las capas subsecuente pueden ser compactada con un compactador vibratorio liso o con el compactador adecuado.

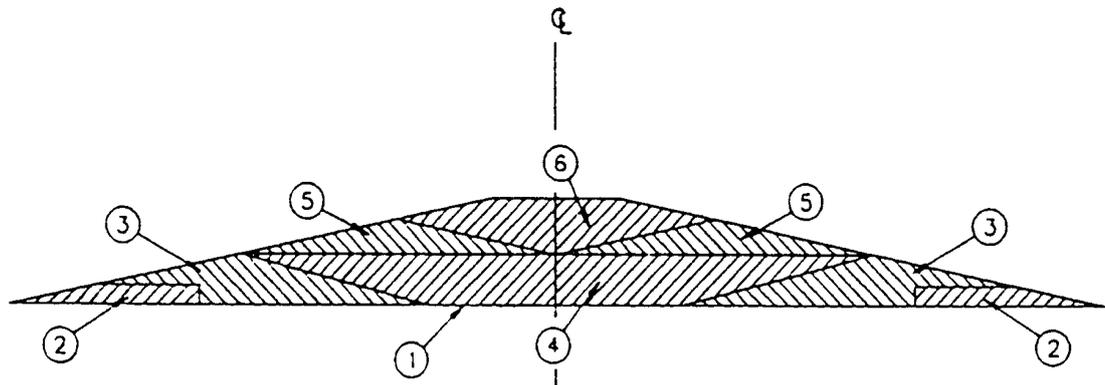


Figura No. 4 - Secuencia de la Construcción

1. Coloque el geosintético en paneles transversos continuos. Cosa los paneles juntos.
2. Descargue por el extremo los caminos de accesos o bermas.
3. Construya las secciones de exterior para anclar en geosintético.
4. Construya las secciones del interior para asentar el geosintético.
5. Construya las secciones del interior para tensionar el geosintético.
6. Construya la sección central final.

II. El geosintético debe ser cubierto dentro de las 48 horas después de su colocación.

Para subrasante con condiciones menos extremas (i.e. cuando so se forman las olas de lodo).

- a. Coloque el geosintético sin pliegues o dobleces.
- b. Coloque el relleno simétricamente desde el centro hacia fuera en forma de una "U" invertida. Figura No. 6. Use la colocación del relleno para mantener la tensión en el geosintético.
- c. Limite el tamaño y peso del equipo de construcción para las roderas no sean mayores de 75 mm en la capa inicial.
- e. El uso de compactadores lisos o de cauchos podrían ser considerados para la compactación de la primera capa; sin embargo, no sobre compacte.

D. Monitoreo de la Construcción.

1. El monitoreo debe incluir el uso de piezómetros para evaluar la magnitud del exceso de presión de poros que se desarrolla durante la construcción. Si las presiones de poros son muy excesivas, la construcción debe pararse hasta que las presiones bajen a valores de seguridad predeterminados.
2. Platos de mediciones de asentamientos deben ser instalados al nivel del geosintético para monitorear los asentamientos durante la construcción y para ajustar los requerimientos del relleno apropiado.

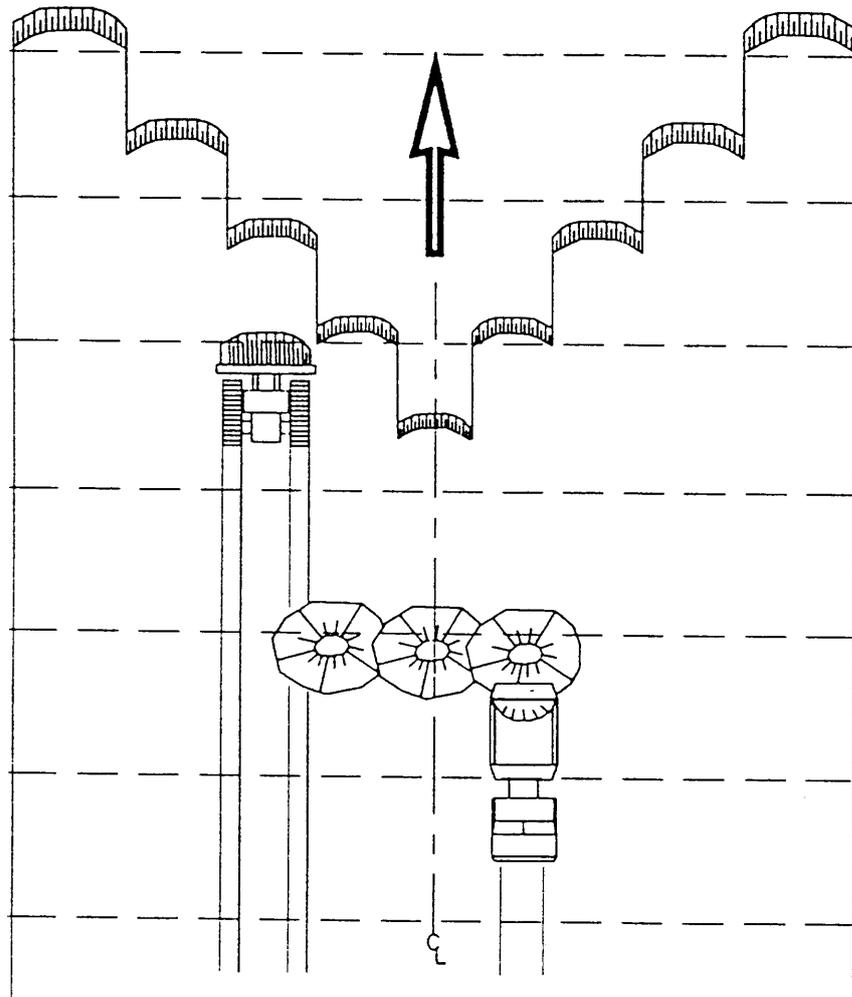


Figura No. 5 - Colocación del Relleno entre las Bermas sobre Subrasantes Extremadamente Blandas ($CBR < 1$) y con la Anticipación de la Ola de Lodo.

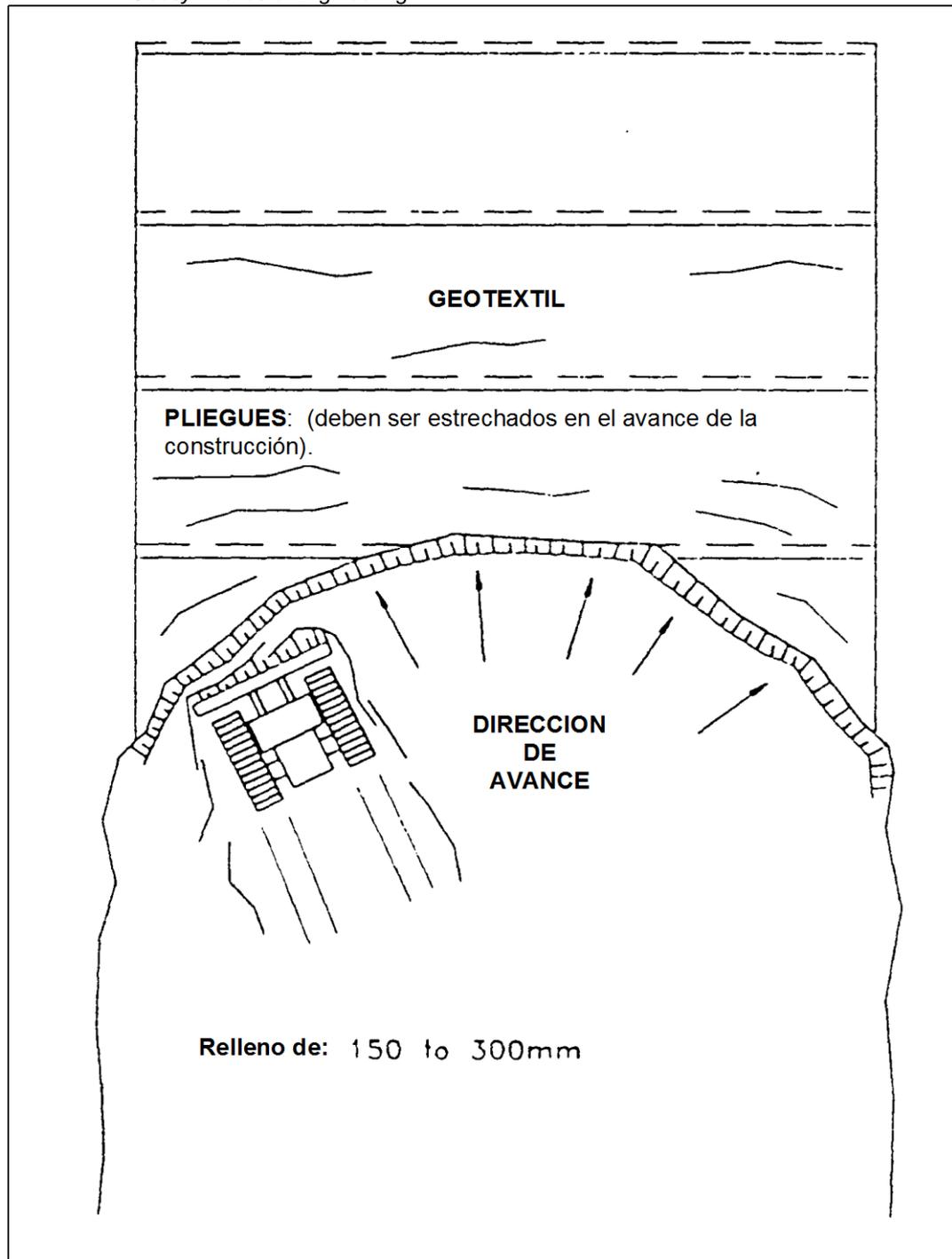


Figura No. 6 - Colocación del Relleno para Tensionar el Geosintético sobre Subrasante de Condiciones Moderadas (CBR > 1); No Formación de la Ola de Lodo.

5. Referencia

Holtz, Robert; Christopher, Barry; and Berg, Ryan; "Geosynthetic Design & Construction Guidelines", US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute, Publication No. FHWA HI-95-038, May 1995.