

## Diseño de terraplenes reforzados sobre suelos blandos: Determinación de la deformación compatible admisible en el refuerzo

E.F. Ruiz & C.F. Schmidt

*fernando@huesker.com.br & cristina@huesker.com.br  
HUESKER Ltda. São José dos Campos, SP, Brasil*

A.P. Cappadoro

*apcappadoro@gmail.com  
Facultad Regional Santa Fe - Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*

RESUMEN: El uso de geomallas como refuerzo de base en terraplenes construidos sobre suelos blandos ofrece grandes ventajas desde el punto de vista técnico y económico, en el sentido de aumentar la estabilidad de la estructura, favorecer la reducción de desplazamientos horizontales en la fundación, homogenizar los asentamientos diferenciales, y disminuir el tiempo y material de construcción. Un diseño adecuado deberá incluir el análisis de varios mecanismos de falla y diferentes estados límite, incorporando las condiciones de serviciabilidad del proyecto y la influencia de la interacción suelo-geosintético. La consideración de este último aspecto es fundamental para determinar el nivel máximo de deformación desarrollada en el refuerzo, evitando estimativas incorrectas en la estabilidad del terraplén. Con el objetivo de abordar estos aspectos y ofrecer recomendaciones generales para emplear en diseño y en la correspondiente especificación de las propiedades del refuerzo geosintético, este artículo presenta un ejemplo de dimensionamiento de un terraplén reforzado (Análisis de corto plazo). De esta forma, a partir de los resultados de un conjunto de simulaciones numéricas por elementos finitos y de análisis de estabilidad por equilibrio límite, se describe un procedimiento aproximado para la determinación de la deformación admisible en el refuerzo. Igualmente, algunas de las implicaciones de adoptar una deformación límite arbitraria en la geomalla son igualmente discutidas.

*Palabras Clave:* terraplén reforzado – suelos blandos – diseño – estabilidad – deformación admisible

ABSTRACT: The use of geogrids as basal reinforcement in embankments constructed over soft soils provides technical and economical benefits by improving the stability of the structure, enabling the reduction of horizontal displacements in the foundation, homogenizing the differentials settlements and reducing the material and time of construction. An adequate design should include the analysis of various failure mechanisms and different limit states, incorporating the serviceability conditions of the project and the influence of the soil-geosynthetic interaction. The consideration of this last aspect is very important for establishing the maximum level of induced strain in the reinforcement, avoiding incorrect estimations of the embankment stability. To study these aspects and to offer general recommendations and guidelines to employ in design and in the corresponding specification of the reinforcement geosynthetic properties, this article presents a design example of a reinforced embankment (Short term analysis). From the results of a set of finite element simulations and stability analyses by limit equilibrium techniques, an approximate procedure to determinate the allowable strain in the reinforcement is described. Some of the implications of adopting an arbitrary limit strain in the geogrid are also discussed.

*Key Words:* reinforced embankment – soft soils – design – stability – allowable strain

## 1 INTRODUCCIÓN

El efecto benéfico de la inclusión de geosintéticos en terraplenes dispuestos sobre suelos de baja capacidad de soporte y alta deformabilidad ha sido demostrado tanto teórica como experimentalmente por varios investigadores en los últimos cincuenta años. Ref. [1].

El diseño de este tipo de estructuras consiste en garantizar la estabilidad de todos sus componentes durante el periodo de construcción y a lo largo de su vida útil, envolviendo el análisis simultáneo o independiente de todos los estados límite (últimos y de servicio) susceptibles a presentarse. Como resultado del análisis, se deberá seleccionar el geosintético de refuerzo más apropiado para que los requerimientos de proyecto sean alcanzados.

La mayoría de enfoques y propuestas para su análisis y diseño están basados en métodos de cálculo por equilibrio límite (EL), y de manera general, la extensión de estos métodos para considerar la presencia del refuerzo como una fuerza estabilizadora adicional, es aceptada en los cálculos de estabilidad. Ref. [2].

No obstante, estos métodos no proporcionan información concerniente a las deformaciones del terraplén ni a la elongación del refuerzo, desconsiderando la influencia de esta interacción suelo-estructura en la movilización de la fuerza en el geosintético, e imposibilitando la adecuada reproducción del comportamiento del sistema: terraplén, refuerzo y suelo de fundación. Ref. [3].

El desarrollo de la modelación numérica por elementos finitos abrió la posibilidad de estudiar la importancia de ésta interacción en el desempeño de terraplenes reforzados, permitiendo analizar la completa respuesta del conjunto hasta la ruptura, simular diferentes procedimientos constructivos, y examinar la influencia de cambios en algunos de sus elementos (i.e., las propiedades del geosintético). Un número importante de ejemplos de su aplicación en el análisis de este tipo de estructuras puede ser encontrado en la literatura. Ref. [3].

A pesar de la enorme potencialidad del método de los elementos finitos (MEF), en muchas situaciones prácticas existen diversas limitaciones que impiden garantizar tal grado de sofisticación en diseño.

Rowe & Soderman (Ref. [2]) y Hinchberger & Rowe (Ref. [4]) propusieron metodologías aproximadas para estimar la estabilidad no drenada de terraplenes reforzados, incorporando la influencia de la interacción suelo-estructura derivada del

análisis por elementos finitos (en términos de la estimación de la deformación o elongación del refuerzo), pero conservando la simplicidad y versatilidad del análisis por equilibrio límite.

Este artículo presenta un ejemplo de diseño de un terraplén reforzado sobre suelos de fundación blandos y de resistencia no drenada creciente con la profundidad, considerando algunos de los estándares descritos en la norma británica BS 8006. A partir de los resultados de simulaciones numéricas, fue determinada la deformación admisible en el refuerzo, siendo comparada con el valor obtenido mediante la aplicación del método racional propuesto por Hinchberger & Rowe (Ref. [4]). De igual forma, algunos de los elementos de la interacción suelo-refuerzo, de la definición de ruptura a partir de criterios de deformabilidad, y del desarrollo y limitación de la elongación en el refuerzo geosintético son analizados.

## 2 CASO EN ESTUDIO

### 2.1 Geometría analizada

Para el ejemplo de análisis se consideraron las características geométricas típicas de un terraplén para fines viales. Fig. 1. Fue definido un ancho de coronamiento  $b = 18$  m, una altura de diseño requerida  $h = 2.30$  m, y una pendiente para los taludes laterales 2H:1V. Para la fundación del terraplén fue adoptado un perfil compuesto por un depósito de suelo arcilloso de espesor  $D = 8$  m, y por un estrato inferior de suelo competente.

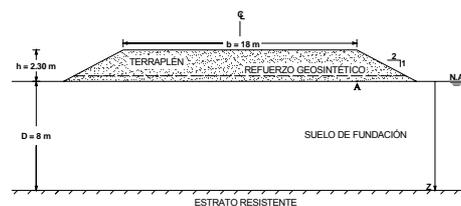


Figura 1. Geometría general del terraplén en estudio

### 2.2 Modelación numérica

Con el objetivo de evaluar la respuesta del terraplén en la situación de corto plazo (final de la construcción), y de estimar la deformación máxima en el refuerzo en condiciones de ruptura, fueron

conducidas una serie de simulaciones con el programa de elementos finitos Plaxis.

El suelo de fundación fue modelado como un suelo arcilloso muy blando y compresible, con resistencia no drenada creciente con la profundidad desde un valor inicial  $c_{u0}$  en la superficie del terreno. Su comportamiento mecánico fue asumido como isotrópico elasto-plástico perfecto, con superficie de fluencia fija y regla de flujo no asociado (modelo constitutivo *Mohr-Coulomb*). Ref. [5]. De igual forma, fue simulada una condición no drenada, asumiendo una velocidad de construcción rápida (aplicación de toda la carga del terraplén en una sola etapa, e impedimento de la disipación de presión de poros en el suelo blando).

El material que compone el terraplén correspondió a un suelo arenoso compactado. Este tipo de suelos presentan típicamente características de rigidez dependientes del estado de esfuerzos, exhibiendo endurecimiento por fricción en estado plástico. Para representar dicha repuesta, fue empleado el modelo constitutivo *Hardening soil* en este caso.

Como refuerzo fue considerada una geomalla (modelada como una estructura esbelta y flexible provista de rigidez axial) dispuesta a 0.40 m de la base del terraplén, evaluando distintos valores de módulo de rigidez a tracción, J.

### 2.3 Propiedades de los materiales

En la Tabla 1. se presentan los parámetros básicos de los suelos considerados en las simulaciones y en los análisis necesarios para el diseño del terraplén.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos considerados

Suelo de fundación	
Resistencia al corte no drenada inicial ( $c_{u0}$ )	5.0 kPa
Incremento de $c_{u0}$ con la profundidad ( $\rho_c$ )	1.50 kPa/m
Ángulo de fricción interna total ( $\phi$ )	0°
Peso unitario saturado ( $\gamma_{sat}$ )	15 kN/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson no drenada ( $\nu_u$ )	0.48
Módulo de Young no drenado ( $E_u$ )	$E_u/c_u = 125$
Coef. de presión de tierras en reposo ( $K'_0$ )	0.65
Terraplén	
Ángulo de fricción interna efectivo ( $\phi_{ev}$ )	32°
Cohesión efectiva ( $c'$ )	1.0 kPa
Peso específico natural ( $\gamma$ )	20 kN/m <sup>3</sup>
Relación de Poisson carga-descarga ( $\nu_{ur}$ )	0.20
Módulo de rigidez secante triaxial ( $E_{s0}$ )	25.000 kPa
Módulo de rigidez carga-descarga ( $E_{ur}$ )	75.000 kPa
Módulo de rigidez edométrico ( $E_{oed}$ )	25.000 kPa
Coef. de presión de tierras en reposo ( $K'_0$ )	0.47
Constante de Janbu ( $m$ )	0.50

Las características adoptadas están basadas en valores representativos determinados para suelos utilizados en estudios similares. Ref. [4] y [6].

## 3 METODOLOGÍA DE DISEÑO

### 3.1 Consideraciones preliminares

#### 3.1.1 Reducción de los parámetros de resistencia del suelo de fundación

El primer paso en el procedimiento de diseño de un terraplén reforzado es aplicar un factor parcial conveniente sobre los parámetros de resistencia no drenada del suelo de fundación. Para el caso de terraplenes no reforzados, la consideración de un factor parcial,  $FP = 1/1.3 = 0.77$ , es equivalente a adoptar un factor de seguridad global contra la falla de 1.30. Ref. [4]. La utilización de esta metodología facilita la definición de estados límite y el correspondiente análisis de los resultados obtenidos en el dimensionamiento. Para el ejemplo en análisis,  $c_{u0}^* = FP \times c_{u0}$  y  $\rho_c^* = FP \times \rho_c$ , por lo tanto  $c_{u0}^* = 3.85$  kPa,  $\rho_c^* = 1.2$  kPa / m.

#### 3.1.2 Determinación de la altura crítica, $H_c$ , para terraplén no reforzado

A partir de un análisis por equilibrio límite (*Bishop* modificado) fue estimada la altura de falla para el terraplén sin refuerzo usando los parámetros reducidos para el suelo de fundación (la altura crítica hace referencia a la altura en la cual el momento actuante es igual al momento resistente). De este modo, fue obtenida una altura de falla  $H_c = 1.40$  m. Dado que ésta altura es mucho menor que la altura de diseño,  $h = 2.30$  m, se establece que el uso de refuerzo es requerido.

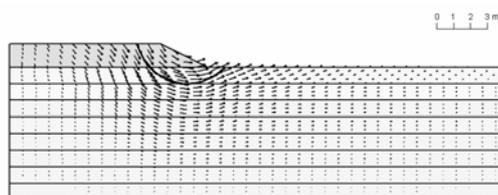


Figura 2. Mecanismo de ruptura para terraplén no reforzado (Comparación MEF y LE)

La Fig. 2. muestra el círculo de falla obtenido del análisis por equilibrio límite en comparación con los vectores de desplazamientos obtenidos mediante la

modelación por elementos finitos. Los dos métodos de análisis concedieron alturas de falla y mecanismos de ruptura similares.

### 3.1.3 Cálculo de la altura máxima de colapso, $H_m$ , para terraplén altamente reforzado

Mediante la aplicación de la teoría de la plasticidad y de los factores de capacidad de carga propuestos para zapatas y modificados para el análisis de terraplenes, es posible determinar el límite teórico en el mejoramiento de la estabilidad que puede ser conseguido usando refuerzos de alta resistencia. Considerando que el máximo desempeño de un terraplén reforzado ocurriría si se este se comportara como una zapata rígida (terraplén altamente reforzado), la altura de colapso,  $H_m$ , corresponde a la altura máxima determinada en esta condición, y calculada a partir de los parámetros de resistencia del suelo de fundación reducidos.

Con base en los procedimientos propuestos y descritos en Ref. [3] y [7], la altura máxima de colapso para la situación en estudio es aproximadamente  $H_m = 2.50$  m. Dado que la altura máxima  $H_m$  es superior a la altura de diseño  $h$  ( $H_m > h$ ), se establece que la altura requerida puede ser alcanzada mediante refuerzo geosintético.

## 3.2 Análisis de estados límite últimos

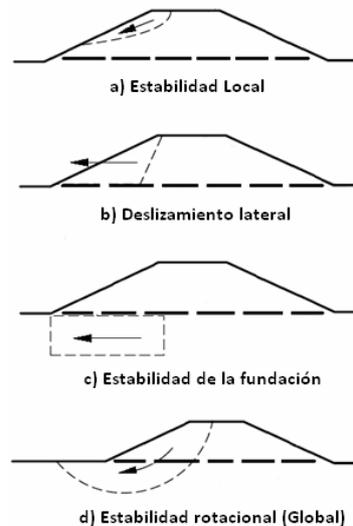
El refuerzo geosintético de base deberá estabilizar la estructura previniendo el deslizamiento del material del terraplén, la expulsión del suelo de fundación y la falla global del conjunto, ofreciendo una adecuada resistencia, capacidad de anclaje y adherencia. Cada una de estas situaciones es caracterizada por un estado límite último que debe verificarse en diseño.

Los procedimientos de análisis propuestos en la norma británica BS 8006 consideran la aplicación de factores parciales para definir y evaluar estos estados límite en la estructura (de manera general las cargas vivas y el peso del suelo son incrementados, en tanto que las propiedades de resistencia del suelo y del refuerzo son reducidas). Ref. [8]. A continuación se presentan los principales elementos para cada de los estados límite últimos a considerarse en el dimensionamiento de terraplenes reforzados (Ver Fig. 3), describiendo los resultados obtenidos para el ejemplo en análisis.

### 3.2.1 Estabilidad Local

Aunque el refuerzo de base no tiene influencia en el desarrollo de éste mecanismo, la estabilidad local de

los taludes laterales del terraplén debe ser comprobada mediante la comparación de la pendiente del talud ( $S_t$ ), con la tangente del ángulo de fricción efectivo  $\phi'_{cv}$  (para un estado de deformación a volumen constante) del material del terraplén. Considerando los factores parciales establecidos en la norma BS 8006, para la situación en estudio se verificó una condición adecuada de estabilidad ( $S_t \leq \tan\phi'_{cv} = 0.50 \leq 0.62$ ).



**Figura 3.** Estados límite últimos en terraplenes reforzados sobre suelos blandos (Modf. de Ref. [8])

### 3.2.2 Estabilidad Interna / Deslizamiento lateral del material de terraplén

Para evaluar la estabilidad de probables mecanismos de deslizamiento entre el terraplén y la superficie superior del refuerzo de base, deberá estimarse la fuerza de tracción necesaria en la geomalla ( $T_{ds}$ ) para resistir el empuje exterior generado por el material del terraplén.

De igual forma, se deberá calcular la longitud mínima de adherencia para el refuerzo ( $L_e$ ) requerida para prevenir tal deslizamiento horizontal.

Asumiendo que la fuerza máxima en la geomalla ocurre en la frontera definida por el extremo superior del talud, y considerando de nuevo los factores parciales y procedimientos de análisis de BS 8006, la fuerza de tracción calculada para el refuerzo correspondió a  $T_{ds} = 21.1$  kN/m, con una longitud mínima de desarrollo  $L_e = 2.34$  m.

En el cálculo fue considerado un valor para el coeficiente de interacción de la interfase suelo de terraplén-refuerzo  $a' = 0.90$ .

### 3.2.3 Estabilidad de la fundación /Expulsión del suelo blando

La configuración geométrica del terraplén induce esfuerzos de corte dentro de la fundación que podrían generar la extrusión lateral del suelo blando. Para prevenir el desarrollo de este mecanismo y la movilización de estos esfuerzos externos, deberá calcularse un ancho mínimo de talud,  $L_s$  (distancia horizontal entre el extremo superior e inferior del talud). De igual forma, deberá garantizarse que las fuerzas resistivas totales en la parte inferior de la interfase suelo-refuerzo sean adecuadas para estabilizar los esfuerzos laterales desarrollados en el suelo de fundación, y que la geomalla de base tenga suficiente resistencia a la tracción para soportar las solicitaciones inducidas por esfuerzos transmitidos por el suelo blando subyacente ( $T_{rf}$ ).

De esta manera, a través de un análisis de sensibilidad fue estimada una profundidad crítica  $Z_c = 4.60$  m, indicando la profundidad potencial en la que se desenvolvería el mecanismo (Según Ref. [8]). Fue determinada la distancia mínima para prevenir la expulsión del material de fundación,  $L_s = 3.67$  m, y la fuerza de tracción en la geomalla de refuerzo  $T_{rf} = 14.7$  kN/m. En el análisis fue considerado un valor para el coeficiente de interacción de la interfase suelo de fundación-refuerzo  $a_{bc}' = 0.80$ , y una resistencia no drenada media para el estrato de fundación  $c_u = 11$  kPa.

Es importante resaltar que las longitudes para el refuerzo determinadas en los cálculos anteriores, nunca excedieron el valor límite de 4.60 m, correspondiente al ancho del talud, por lo que la disposición de la geomalla a lo largo de la base del terraplén garantizaría dicho requerimiento.

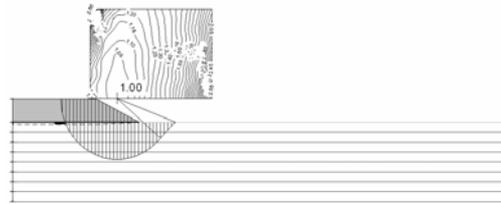
### 3.2.4 Estabilidad rotacional global/ Análisis a corto plazo

De manera general, en el caso de terraplenes sobre suelos blandos, es considerado que el período crítico respecto a su estabilidad ocurre durante y al final de su construcción. En ésta etapa preliminar el refuerzo es fundamental para evitar el colapso de la estructura, pues con el desarrollo del proceso de consolidación, el suelo de fundación incrementará su resistencia con el tiempo, reduciendo su solicitación en el refuerzo Ref. [9].

De igual forma, ha sido reconocido en numerosos análisis y experiencias que el mecanismo de estabilidad global que pasa a través de la fundación es en la mayoría de los casos el mecanismo dominante que gobierna la estabilidad del terraplén.

Para el caso en estudio, fue desarrollado un análisis por equilibrio límite (método modificado de cuñas circulares de *Bishop*), considerando los parámetros de resistencia del suelo de fundación reducidos ( $c_{u0}^*$  y  $\rho_c^*$ ), con el objetivo de establecer la fuerza a la tracción necesaria en el refuerzo para lograr un adecuado margen de estabilidad (Un factor de seguridad igual a la unidad en un análisis considerando los parámetros reducidos, corresponde a un factor de seguridad global de aproximadamente 1.30, Ver Fig.4.)

De este modo, la fuerza en la geomalla calculada para una altura de diseño  $h = 2.30$  m correspondió a  $T_{r0} = 55.0$  kN/m. La Fig. 4 muestra el círculo de falla crítico obtenido del análisis.



**Figura 4.** Análisis de estabilidad global por equilibrio límite.

Dado que el refuerzo debe alcanzar una adecuada adherencia con el suelo adyacente para asegurar que la fuerza  $T_{r0}$  pueda movilizarse, deberá determinarse la longitud de anclaje mínima dentro y fuera la superficie de falla potencial.

De este forma, y según los procedimientos descritos en la norma BS 8006 (Ref. [8]), fue verificado con base en la configuración del mecanismo de ruptura, que una longitud de anclaje interna  $L_j = 8.0$  m, y una longitud de anclaje externa  $B - L_j = 19.20$  m son suficientes para prevenir una falla por anclaje insuficiente o arrancamiento.

### 3.2.5 Determinación de la máxima fuerza de tracción de estado límite en el refuerzo

De los análisis realizados, puede determinarse la máxima fuerza de tracción,  $T_r$ , que debe presentar el refuerzo de base, seleccionándose el valor mayor de: a) La fuerza máxima de tracción solicitada para resistir el estado límite rotacional,  $T_{r0}$ , ó b) La suma

de la fuerza máxima de tracción necesaria para resistir deslizamiento lateral,  $T_{ds}$ , y la máxima fuerza de tracción requerida para evitar la expulsión del suelo de fundación,  $T_{rf}$ . ( $T_r = T_{r0}$  ó  $T_r = T_{ds} + T_{rf}$ ). En este caso, la fuerza de tracción máxima en la geomalla para el terraplén en análisis corresponde a  $T_r = 55,0$  kN/m.

### 3.3 Determinación de la deformación compatible admisible

Los mecanismos de falla examinados anteriormente corresponden a análisis por equilibrio límite, considerando el efecto del refuerzo como una fuerza estabilizadora adicional con punto de aplicación y orientación definidos.

No obstante, y a pesar de que algunos autores sugirieron que la magnitud de la fuerza en el refuerzo dependía únicamente de las propiedades del geosintético. Ref. [10], recientemente ha sido unánimemente reconocido que la interacción suelo-estructura juega un papel fundamental en la movilización de ésta fuerza, por lo que su efecto no puede ser ignorado. Ref. [2].

En adición, las geomallas son materiales geosintéticos flexibles que presentan una resistencia dependiente del estado de deformación o elongación al que son sometidos. Así, en el caso de un terraplén reforzado, el desarrollo de la fuerza a tracción en el refuerzo dependerá de las deformaciones inducidas por el conjunto terraplén-suelo de fundación, y como se describió antes, de una adecuada adherencia con el suelo adyacente.

Para incorporar la influencia de la interacción suelo-refuerzo en el procedimiento de diseño, Hinchberger & Rowe (Ref. [4]) establecieron que la fuerza en el estado límite último requerida en proyecto,  $T_r$ , debe ser limitada por una determinada deformación máxima denominada *deformación admisible compatible*:

$$T_r = J_{min} \epsilon_a \quad (1)$$

La estimación de la deformación máxima en el refuerzo no es un ejercicio trivial. Para propósitos de diseño, se suelen adoptar valores arbitrarios, y en muchas ocasiones, se establece que la resistencia a la tracción requerida en el refuerzo es el parámetro único o el más importante en la especificación de producto, desconsiderando el nivel de elongación en el cual es movilizada dicha resistencia.

Así por ejemplo, terraplenes construidos rápidamente sobre suelos arcillosos muy blandos pueden fallar por exceso de deformaciones mucho antes de que la resistencia a la tracción última en el refuerzo sea movilizada. Ref. [4].

Por otro lado, utilizando los parámetros de resistencia del suelo de fundación reducidos por el factor parcial  $PF$ , puede ser modelada la situación de estado límite de falla (último) para el terraplén reforzado, usando el método de los elementos finitos para establecer la deformación máxima del refuerzo en la ruptura.

El procedimiento parte de la base de que si un terraplén es reforzado con una geomalla de módulo de rigidez tan bajo como para desarrollar niveles de sollicitación considerablemente pequeños en la situación de ruptura, se establecería que las deformaciones desarrolladas en el refuerzo estarían limitadas al estado deformacional correspondiente al de un terraplén sin refuerzo (situación no reforzada). Por consiguiente, en el caso de un terraplén reforzado, la máxima deformación generada en la geomalla justo antes de la ruptura corresponderá a la *deformación admisible compatible*,  $\epsilon_a$ . Ref. [2].

De esta forma, para determinar dicha deformación para la situación en estudio, se realizó cuatro análisis numéricos, seleccionando los siguientes valores para el módulo de rigidez  $J$  en la geomalla: 500, 800, 1.000, 1.500 kN/m.

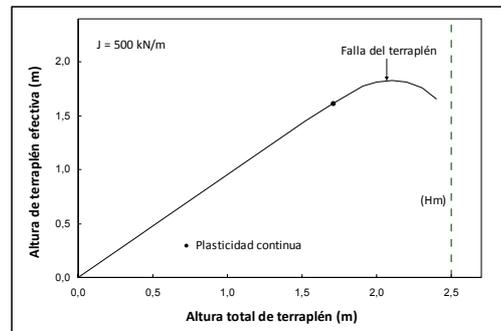
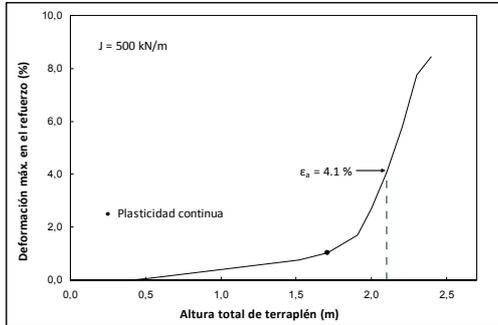


Figura 5. Altura máxima de terraplén efectiva

Las Figuras 5 y 6 presentan la altura de terraplén efectiva y la deformación máxima en el refuerzo calculadas a partir de las de las modelaciones con módulo de rigidez  $J = 500$  kN/m. La falla del terraplén ocasionada por exceso de deformaciones ocurre en una altura total igual a 2,10 m, con una elongación máxima en la geomalla de 4,1 %.



**Figura 6.** Estimación de la deformación admisible compatible ( $J = 500 \text{ kN/m}$ )

Como puede observarse, la construcción del terraplén más allá de una altura de 2.10 m afectará el desempeño del conjunto impidiendo el aumento de la altura respecto a la superficie original del terreno. Por tal motivo, es importante definir el nivel de ruptura del terraplén reforzado como la altura de construcción correspondiente a la máxima altura efectiva alcanzada (calculada de la diferencia entre la altura total de construcción y la deflexión vertical en el punto A. Ver Fig. 1).

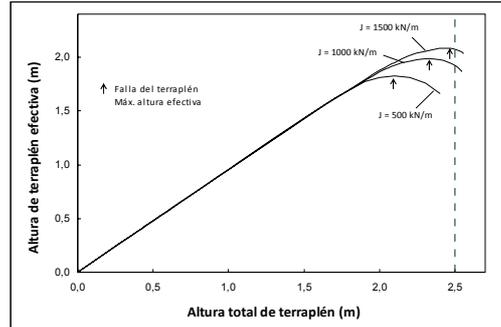
En la Fig. 6 se aprecia igualmente, que a partir de una altura de construcción determinada, las zonas de plastificación dentro del suelo de fundación se tornan continuas, (definición de plasticidad continua o *contiguous plasticity*), observándose que a bajos de niveles de carga (suelo en estado elástico), la deformación inducida en el refuerzo es relativamente pequeña. De esta manera, la mayor parte de la deformación en la geomalla sólo es desarrollada a partir de la generación de la plasticidad continua en el suelo de fundación. Se establece entonces, que para niveles de carga mayores a este límite, el refuerzo es el único elemento que controla la estabilidad y ruptura del terraplén. Ref. [2].

La definición de la ruptura relacionada con las características de deformabilidad del terraplén (altura efectiva máxima) obtenida para refuerzos con módulos de rigidez bajos, permite obtener la deformación máxima desarrollada en ese estado característico de falla. De este modo, se presentan en la Tabla 2 y en las Figuras 7 y 8 los resultados de los análisis y la estimación de deformación máxima admisible  $\epsilon_a$ .

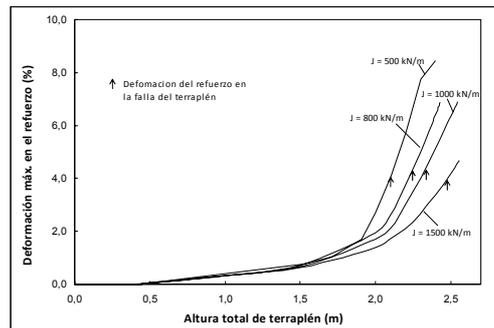
**Tabla 2.** Resultados de las simulaciones

Módulo de rigidez $J$ (kN/m)	Deformación del refuerzo en la falla (%)
500	4.1
800	4.4
1000	4.4
1500	4.0

Deformación compatible admisible adoptada  $\epsilon_a$ : 4.2 %



**Figura 7.** Determinación de la altura efectiva máxima



**Figura 8.** Cálculo de la deformación desarrollada en el refuerzo en la ruptura

### 3.4 Propiedades requeridas en el refuerzo

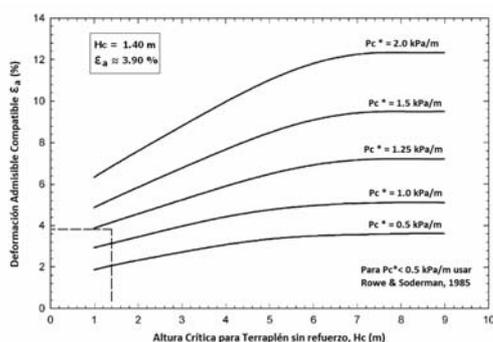
A partir de la fuerza de tracción máxima  $T_r$ , y de la deformación admisible compatible estimada  $\epsilon_a$  (promedio entre los cuatro análisis realizados), puede ser definido el módulo de rigidez mínimo de diseño requerido en la geomalla:  $J_{min} = T_r / \epsilon_a = 55.0 \text{ kN/m} / 0.042 = 1310 \text{ kN/m}$ .

De esta manera, la geomalla de refuerzo a ser seleccionada deberá tener los siguientes requerimientos mínimos: a) un módulo secante mínimo de 1310 kN/m entre 0-4% b) ser adecuado para aplicaciones de refuerzo.

### 3.5 Comparación con el método aproximado

Dada la complejidad de los análisis numéricos por elementos finitos, en la mayoría de procedimientos prácticos de diseño no es considerado tal grado sofisticación.

De esta manera, Hinchberger & Rowe (Ref. [4]) presentaron un método aproximado para la determinación de la elongación admisible en el refuerzo a partir del uso del ábaco mostrado en la Fig. 9.



**Figura 9.** Gráfico de diseño para la determinación de  $\epsilon_a$  (Modificado de Ref. [4])

A partir de la altura crítica de falla para el caso no reforzado (numeral 3.1.2),  $H_c = 1.40$  m, y del incremento en resistencia no drenada con la profundidad del suelo de fundación  $p_c^* = 1.2$  kPa / m, fue determinada una deformación compatible  $\epsilon_a = 3.9$  %. La proximidad entre las dos metodologías representa una validación preliminar de su aplicabilidad, siendo una alternativa aproximada para emplear en diseño.

### 4 CONCLUSIONES

Fue presentado un ejemplo de diseño de un terraplén reforzado con suelos de fundación blandos. El trabajo incluyó el análisis de varios estados límite últimos (según lo descrito en BS8006), incorporando los resultados de simulaciones numéricas para considerar la interacción suelo-estructura en términos de la deformación admisible compatible. El método racional propuesto para la estimación de este parámetro fue comparado con los análisis numéricos efectuados, demostrando ser una excelente aproximación para procedimientos de diseño simplificados.

El desarrollo de la deformación en el geomalla fue analizada, así como la significativa importancia de su adecuada selección en diseño.

Finalmente, el módulo de rigidez mínimo para el refuerzo geosintético fue determinado basado en la consideración simultánea de dos estados límite últimos (resistencia a la tracción máxima en el refuerzo y altura máxima de terraplén efectiva).

### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las empresas Huesker Ltda. y Coripa S.A por el invaluable apoyo brindado para la realización de este trabajo.

### 6 REFERENCIAS

- [1] Study Centre for Road Construction (SCW), Stability of slopes constructed with polyester reinforcing fabric, 1981.
- [2] Rowe, R.K., Soderman, K.L., An approximate method for estimating the stability of geotextile reinforced embankments. Canadian Geotechnical Journal, No. 22, 1985.
- [3] Rowe, R. K. & Soderman, K. L., Stabilization of very soft soils using high strength geosynthetics: the role of the finite element analyses, International Journal of Geotextiles and Geomembranes, No. 6, 1987.
- [4] Hinchberger, S.D. & Rowe, R. K., Geosynthetic reinforced embankments on soft clay foundations: predicting reinforcement strains at failure, International Journal of Geotextiles and Geomembranes, No.21, 2003.
- [5] Bakker, K.J., Bonnier, P.G., Brand, P.J.W., Burd, H.J. & Termaat, R.J., Plaxis 2D User's Manual., 1998.
- [6] Marinho de Moraes, C., Aterros reforçados sobre solos moles – Análise numérica e analítica, Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2002.
- [7] Almeida, M. S. S., Aterros sobre solos moles: da concepção à avaliação do desempenho. Ed. UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
- [8] British Standards Group, BS 8006, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills, 2005.
- [9] Cappadoro, A. P., Porta, R., Turello, D., Análisis de terraplenes reforzados con geogrillas sobre suelos blandos. Modelación numérica, 2007.
- [10] Fowler, J., Theoretical design considerations for fabric reinforced embankments. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, No. 2, 1982.