

El empleo de geotextiles de refuerzo en la base de un terraplén de carreteras

J. L. JUSTO; E. JUSTO (*)

RESUMEN La variante de Los Barrios (Cádiz) está cimentada sobre arcilla blanda hasta una profundidad máxima de 16 m. El coeficiente de seguridad a corto plazo era demasiado pequeño, aunque la estabilidad a largo plazo estaba asegurada. Se decidió comprobar el efecto de un geotextil de refuerzo en la base del terraplén. El efecto del geotextil en la estabilidad fue estudiado mediante el programa de Elementos Finitos Plaxis, modelando el suelo como un material elastoplástico tipo Mohr-Coulomb. La presencia del geotextil de refuerzo incrementa el coeficiente de seguridad de 1,03 a 1,75. Se calcularon las tensiones en el geotextil. La disminución de la resistencia en el geotextil debida a la fluencia, y los diferentes factores de seguridad considerados conducen a un coeficiente de seguridad global de 1,76. Se ha calculado la disminución de las tensiones en el geotextil al pasar de condiciones sin drenaje a condiciones con drenaje.

THE USE OF A GEOTEXTILE REINFORCEMENT AT THE BASE OF A ROAD EMBANKMENT

ABSTRACT The bypass road at Los Barrios (Spain) is founded upon up to 16 m of soft clay. The short term factor of safety was too low, although the long term stability was adequate. It was decided to place a geotextile reinforcement at the base of the embankment. The effect of the geotextile in the stability was considered by the Finite Element program Plaxis, where the soil is modelled as an elastoplastic Mohr-Coulomb material. The presence of the geotextile reinforcement increases the factor of safety from 1.03 to 1.75. The stresses in the geotextile are found. The decrease in the strength of the geotextile produced by creep, and the several factors of safety considered lead to a global safety factor of 1.76. The decrease in the stresses of the geotextile, when we pass from undrained to drained conditions has been calculated.

Palabras clave: Geotextiles; Elementos finitos; Terraplenes; Arcillas.

1. INTRODUCCIÓN

Al construir terraplenes sobre suelos poco resistentes, como es el caso de la arcilla blanda, pueden surgir problemas de estabilidad a corto plazo en forma de deslizamientos o extensión lateral del terraplén. Antes de la aparición de los geotextiles, estos problemas se resolvían construyendo el relleno con pendientes muy tendidas o con bermas; esto puede ser una solución cuando la resistencia sin drenaje aumenta con la profundidad o si la profundidad del suelo blando es pequeña, pero no lo es para suelos profundos con resistencia constante (v. Jiménez Salas et al., 1981). Otras soluciones son mejorar la resistencia del suelo durante la construcción por medio de drenaje (drenes de arena o drenes de banda), o perfeccionar el drenaje con mejora del terreno (columnas de grava).

Se puede alcanzar una solución más económica usando una capa basal de geotextiles de refuerzo, colocada sobre el suelo original antes de la construcción del relleno. Según lo indicado por Ingold and Miller (1988), el geotextil, si se diseña e instala convenientemente, impartirá resistencia a tracción a la base del relleno, resistiendo por tanto la extensión lateral, el deslizamiento a lo largo del suelo natural o la extrusión del suelo blando sobre el que se asienta. El esfuerzo de tracción requerido suele ser elevado y corresponde

a la dirección del ancho del terraplén. Para tensiones tan altas se hace uso de geotextiles tejidos (por ejemplo Televev) o geo-redes (Tensar). Respecto a los materiales, suele usarse poliéster (por ejemplo Televev) o polipropileno (Tensar).

2. TRAZADO

La variante de Los Barrios, con una longitud de 7.352 m, forma parte del desdoblamiento del eje Jerez-Algeciras en la provincia de Cádiz. El tercer tramo, con una longitud de 810 m, está situado sobre una capa de arcilla blanda de 9,30 m de espesor máximo, y el cuarto tramo, con una longitud de 1.090 m, está situado sobre una capa de arcilla blanda de hasta 25 m de espesor (fig. 1).

El proyecto original (fig. 1) establecía un asiento máximo permitido para el pavimento entre 50 y 75 mm. Con objeto de poder construir el firme en un tiempo razonable y evitar problemas de estabilidad a corto plazo, se establecieron las siguientes normas para los tramos 3, 4 y 5:

1. El ritmo de construcción no debería sobrepasar los 1,5 m/mes después de que se hayan colocado los primeros 3 metros de terraplén.
2. Cuando la altura de terraplén oscilara entre 4 y 7m, deberían colocarse drenes de banda a intervalos de 1,5 m y a una profundidad de 10 m.

(*) Catedrático del área de Ingeniería del Terreno.

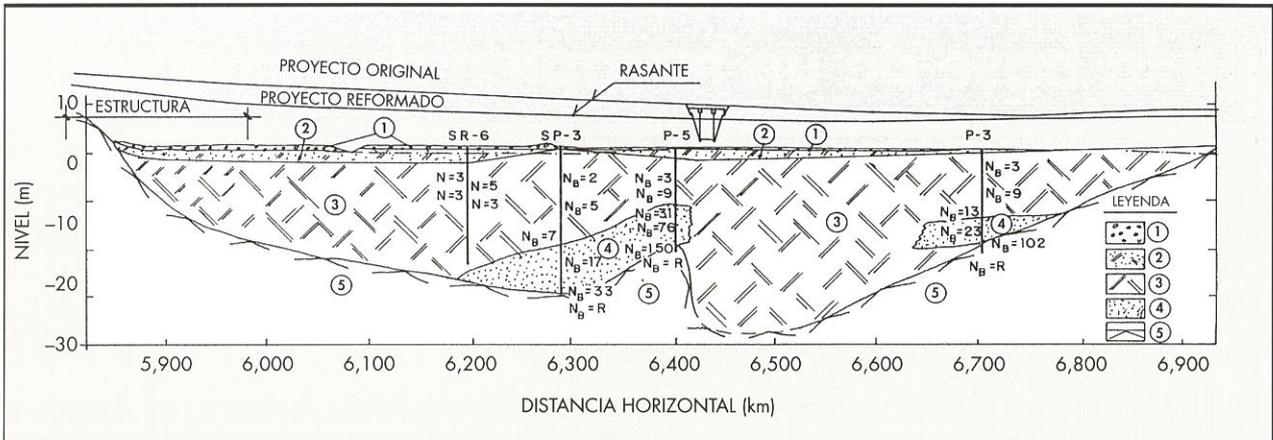


FIGURA 1. Perfil geotécnico del sector 4 indicando las rasantes del proyecto original y nuevo. 1. Tierra vegetal. 2. Arcilla marrón firme. 3. Arcilla gris. 4. Arena, de floja a media. 5. Arenisca.

- 3. Cuando la altura de terraplén sobrepasara los 7 m, deberían colocarse columnas de grava de 0,5 m de diámetro a intervalos de 3,6 m y con una profundidad de 10 a 15 m.
- 4. Las cabezas de los drenes deberían conectarse con un manto de arena de 1 m de espesor.

3. PERFIL GEOTÉCNICO

Como el contratista se mostró disconforme con las prescripciones del proyecto original, se realizó una nueva investigación del terreno.

La figura 1 muestra el perfil geotécnico correspondiente al tramo N° 4.

En el perfil pueden distinguirse, de arriba a abajo, los siguientes tipos de suelo:

- 1. Tierra vegetal, firme por desecación.
- 2. Arcilla marrón firme, ligeramente sobreconsolidada.
- 3. Arcilla gris entre muy blanda y media, ligeramente sobreconsolidada en la parte superior.
- 4. Arena limosa, de muy floja a media.
- 5. Margas y areniscas del flysch.
- 6. Arenisca calcárea (del mioceno superior al plioceno).

Las principales propiedades de las diferentes capas están resumidas en las tablas 1 y 2.

Tipo de suelo	N(SPT) golpes/30 cm	N(Borros) golpes/20 cm	T ₂₀₀ %	W _L	I _L	USCS
1		8-18(14)				
2		9-18(14)	60	37-54	0,1-0,25	CL-CH
3	3-6(4)	2-13(6)	59-98	30-61	0,5-0,9	CL-CH
4	12-R(28)	12-46(23)	26-49	NP-41		SM-SC
5	R	86-R	64-66	32-42		ML a CL
6	50-71	90-R	22-71	NP-59	-1,5-0	SM-CH

(28) = valor medio

TABLA 1. Ensayos de identificación y golpesos.

Tipo de suelo	c _v kPa	σ _p kPa	C _c 1 + e ₀	C _c 1 + e ₀	c' kPa	φ'	γ kN/m ³
1							
2	64-113	82	0,09	0,017	5	32,5°	(18,4)
3	3-42(32)	69	0,19	0,039	0-22(9)	18-34(26°)	(17,7)
4			0,10	0,008	22	23,3°	(19,2)
5		260	0,15	0,033			(20,8)
6							(20,5)

(32) = valor medio

TABLA 2. Ensayos de compresibilidad y resistencia.

4. ESTABILIDAD Y CÁLCULO DE ASIENTOS

Al realizar el cálculo de estabilidad a corto plazo se encontró que el coeficiente de seguridad era insuficiente en algunas secciones del tramo N° 3 y que era menor que 1 en muchas secciones del tramo N° 4.

Igualmente, para mantener el asiento después de pavimentar por debajo de 75 mm era necesario colocar drenes de bandas a intervalos de 1,25 m en el tramo N° 3, y esperar un año desde el final de la construcción para colocar el pavimento. En el tramo N° 4, con separaciones de 1 m y profundidad de drenes de hasta 32 m, el asiento después de pavimentar era todavía de hasta 125 mm.

Con respecto a las columnas de grava, con un diámetro de 800 mm, separaciones de 1,80 m y profundidad de 24 m (difícil de alcanzar), el asiento resultante era todavía de 864 mm (excesivo). Como se puede ver, las columnas de grava son menos eficaces que los drenes de bandas (v. Justo, 1994).

En algunas secciones del tramo N° 4 el coeficiente de seguridad a corto plazo era menor que 1 incluso colocando bermas. Por otro lado, el coeficiente de seguridad a largo plazo era adecuado.

5. CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS

Se usó el método de elementos finitos (MEF) elasto-plástico Plaxis.

En una primera fase el terraplén fue sustituido por una carga equivalente. En algunos cálculos se añadió una carga horizontal, equivalente al empuje de tierras del terraplén. El coeficiente de seguridad fue calculado con respecto a las cargas, o lo que es lo mismo, respecto a la altura del terraplén. Los resultados correspondientes a la sección más crítica se resumen en la tabla 3.

Como puede verse, el coeficiente de seguridad a largo plazo con respecto a la altura final del terraplén (8,9) es alto; por tanto, el problema, en lo que respecta a la estabilidad, es conseguir una suficiente disipación de presiones intersticiales.

El asiento obtenido por el MEF es sólo ligeramente superior al calculado por el método edométrico. Cuando el terraplén alcanzaba su altura final se producía una inestabilidad a corto plazo. Por ello, para comprobar la posibilidad de construirlo por fases hemos calculado (v. tabla 3) el coeficiente de seguridad usando tensiones efectivas, suponiendo que no hay drenaje, para un terraplén de 3 m. Como puede verse, el coeficiente de seguridad es más pequeño cuando se introducen las cargas horizontales en el cálculo; si colocamos un geotextil de refuerzo en la base del terraplén para absorber los esfuerzos horizontales, el coeficiente de seguridad aumenta hasta 1,75.

Fuerzas	Geotextil	F	
		Largo plazo H = 8,9 m	Corto plazo H = 3 m
Vertical	No	11,1	1,33
Vertical y horizontal	No	6,3	1,03
	Si	9,3	1,75

H = altura de terraplén

TABLA 3. Coeficiente de seguridad con respecto a la altura del terraplén en la sección más crítica.

La figura 2 muestra los esfuerzos en el plano del geotextil. El esfuerzo de tracción máximo es de 59 kN/m.

El MEF permite también estudiar la influencia de la rigidez del geotextil en las tensiones de tracción que le son transmitidas. La tabla 4 muestra el esfuerzo de tracción requerido para la estabilidad a largo plazo de un terraplén de 8,9 m de altura; podemos ver que esta influencia es despreciable.

6. NUEVO DISEÑO

A la vista de los resultados anteriores, se sugirió disminuir la altura del terraplén hasta la rasante indicada en la figura 1.

Los cálculos fueron realizados suponiendo que el pavimento se iba a colocar un año después de que el relleno alcanzara los 3 m de altura, con un ritmo de construcción de 1,5 m/mes tras alcanzar dicho nivel.

Normalmente se emplearon valores de $c_v = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ y de $c_h = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ (v. Justo, 1995).

La separación requerida entre bandas de drenaje para que el asiento en el pavimento no superará los 75 mm oscilaba entre 1,15 y 2,30 m en el tramo N° 3 y entre 1,00 y 1,35 m en el tramo N° 4.

El coeficiente de seguridad a corto plazo por el método de Bishop usando tensiones totales era todavía insuficiente en algunas secciones del tramo N° 3 y menor que 1 en algunas secciones del tramo N° 4.

La figura 5 compara los campos de desplazamientos bajo condiciones en que no hay drenaje (a) y con drenaje (b). Podemos ver que, en el segundo caso, la importancia de los desplazamientos horizontales es más pequeña. El desplazamiento máximo del terraplén con drenaje es vertical, y sólo ligeramente superior al asiento de la base calculado por el método edométrico; la diferencia podría ser debida a la com-

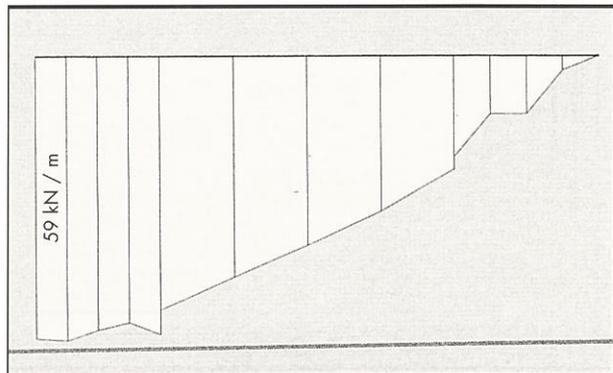


FIGURA 2. Esfuerzos en el plano del elemento geotextil. Cálculo sin drenaje en tensiones efectivas. Altura de terraplén 3 m. Geotextil N° 1 (v. tabla 4). P. K. 6,2856.

Geotextil	Rigidez* kN/m	Esfuerzo de tracción kN/m	Esfuerzo de rotura kN/M
N° 1	6667	145	800
N° 2	3333	149	400

* Para 6% de deformación

TABLA 4. Esfuerzo de tracción requerido a largo plazo para la altura completa del terraplén con diferentes rigideces del geotextil.

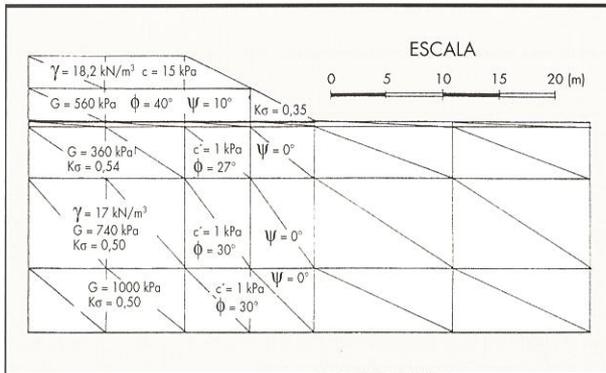


FIGURA 3. Discretización y parámetros de cálculo. Nuevo diseño P. K. 6,2856.

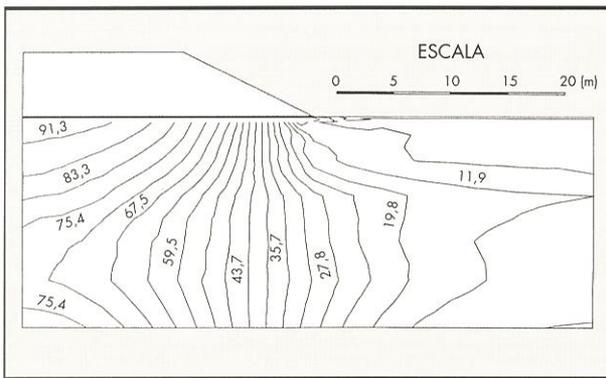


FIGURA 4. Contornos de presión intersticial en exceso. Valor máximo 95,3 kPa. Geotextil N° 2 (v. tabla 5).

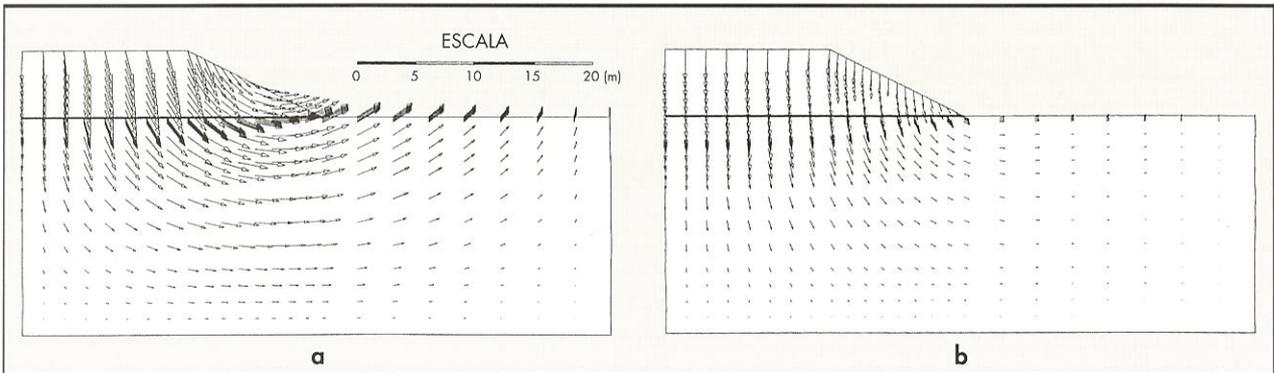


FIGURA 5. Campo de desplazamientos. Geotextil N° 2 (v. tabla 4). a) Sin drenaje. Desplazamiento máximo 378 mm. b) Con drenaje. Desplazamiento máximo 839 mm.

Geotextil	Rigidez* kN/m	Estabilidad	Esfuerzo de tracción (T) kN/m	Esfuerzo de Rotura kN/m	Tensión máxima de tracción en el terraplén kPa	Asiento máximo mm	s(H)	T(H)
							s(H/2)	T(H/2)
N° 1	3333	Corto plazo	54,5	400	14,4	358	2,08	2,44
N° 2	1250	Corto plazo	24,2	150	14,3	378	2,12	2,40
		Largo plazo	11,9	10,3	839	2,05	2,03	

* Para 6% de deformación.
s(H) = asiento máximo para altura de terraplén H.
T(H) = esfuerzo de tracción máxima para altura de terraplén H.

TABLA 5. Algunos resultados del cálculo por elementos finitos para el nuevo diseño.

presión propia del terraplén. El desplazamiento máximo disminuye cuando la rigidez del geotextil aumenta (v. tabla 5). La figura 6 compara los puntos de plastificación sin drenaje (a) y con drenaje (b). Como vemos, en el segundo caso la plastificación se reduce a las proximidades de la base del terraplén.

7. CÁLCULO POR ELEMENTOS FINITOS PARA EL NUEVO DISEÑO

La sección correspondiente al P.K. 6,2856, que tenía el coeficiente de seguridad a corto plazo más pequeño por el método de Bishop (0,7) fue estudiada por el MEF. Con objeto de aumentar la estabilidad se simuló la colocación de dos capas diferentes de geotextiles Stabilenka en la base del terraplén.

La tabla 5 presenta un resumen de los resultados. Los cálculos a corto plazo se hicieron suponiendo que no hay drenaje y en tensiones efectivas. La figura 3 muestra la discretización y los parámetros empleados en el cálculo. La construcción del terraplén fue simulada en dos fases de igual altura. Como se indica en la tabla 5 el cociente $s(H) / s(H/2)$ entre los asientos máximos al final de la segunda y de la primera fase es sólo ligeramente mayor que 2. El mismo cociente para los esfuerzos requeridos en el geotextil, $T(H)/T(H/2)$, es aproximadamente igual a 2,4, lo que indica algo de plastificación al final de la construcción, que disminuye desde el centro del terraplén hacia los bordes. A largo plazo hay un descenso en el esfuerzo requerido en el geotextil hasta menos de la mitad, un descenso en la tensión de tracción máxima en el terraplén y en el cociente $T(H)/T(H/2)$, que indica que ha disminuido la plastificación.

La figura 7 compara los esfuerzos en el plano del geotextil cuando no hay drenaje (a) y con drenaje (b). El esfuerzo máximo no se produce en el centro del terraplén, lo cual in-

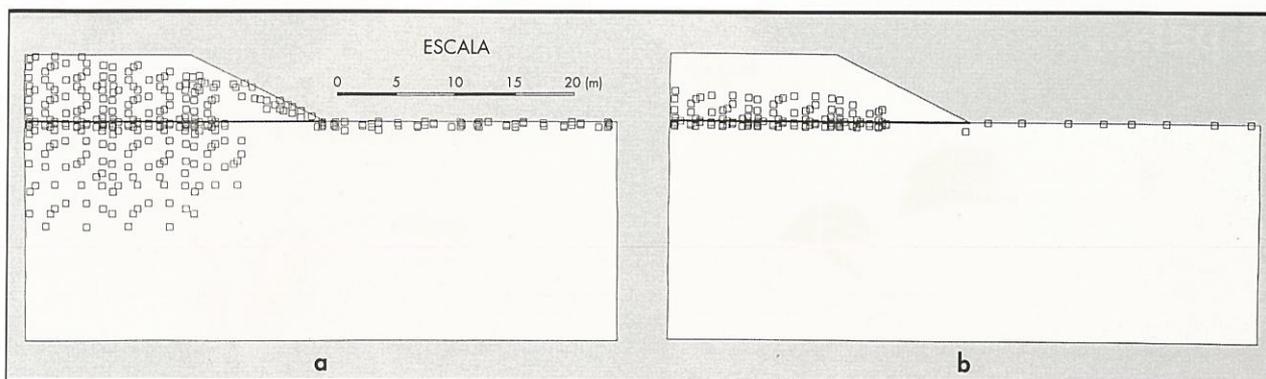


FIGURA 6. Puntos plastificados. Geotextil N° 2 (v. tabla 4). a) Sin drenaje. b) Con drenaje.

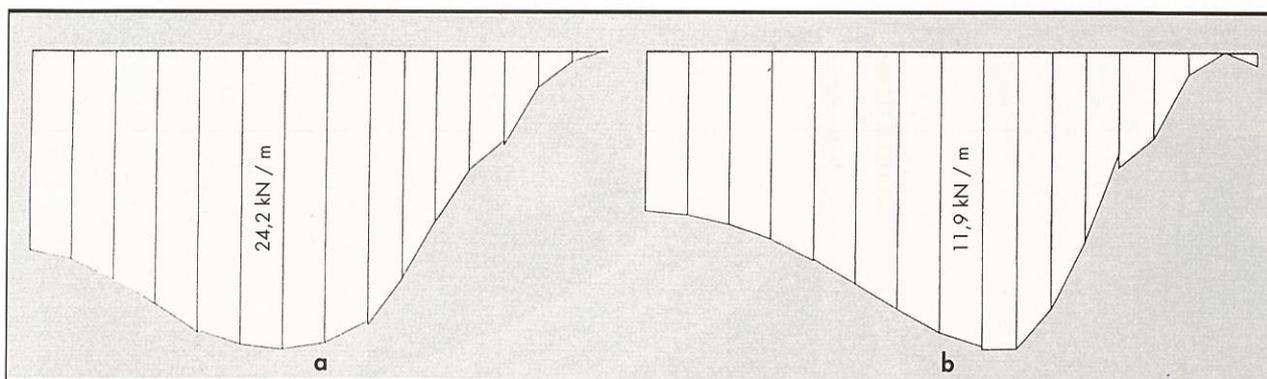


FIGURA 7. Esfuerzos en el geotextil para medio terraplén. Geotextil N° 2 (v. tabla 4). a) Sin drenaje. b) Con drenaje.

dica que hay una inversión de las tensiones cortantes entre el borde y el centro. (v. Tabla 5).

En todos los casos aparecen tensiones cortantes relativas (τ/τ_{max}) altas, en el suelo natural y en el terraplén, lo cual indica que es necesario un cálculo elasto-plástico (v. Justo, 1994 y 1995). Las tensiones de tracción aparecen sobre todo en la parte superior del terraplén.

El efecto beneficioso del drenaje se muestra en las figuras 5, 6 y 7.

8. CREEP Y COEFICIENTES DE SEGURIDAD

La carga de rotura desciende casi linealmente con el logaritmo del tiempo. Para una vida de la carretera de 100 años, la resistencia del geotextil Stablenka se reduce a un 66% de la resistencia a corto plazo.

El coeficiente de seguridad para daño mecánico aumenta con el tamaño de las partículas del relleno y disminuye con la resistencia del geotextil, pudiendo oscilar entre 1,02 y 1,40. El factor de seguridad para ataque ambiental es, en casos normales, 1,02. El coeficiente de seguridad para ataque químico depende del pH del suelo, y puede variar entre 1,0 y 1,12.

El coeficiente de seguridad global incluyendo el creep para Stablenka 800/100 es, por lo tanto 1,76.

9. CONCLUSIONES

La presencia de geotextiles de refuerzo en la base de un terraplén sobre arcilla blanda puede incrementar el coefi-

ciente de seguridad a corto plazo, con respecto a las cargas, de 1,03 a 1,75. Cuando el factor de seguridad es pequeño un incremento en la rigidez del geotextil hace que aumente patentemente el esfuerzo de tracción requerido en él, pero cuando el factor de seguridad es grande la influencia de la rigidez es pequeña.

La plastificación es importante y, por lo tanto, es necesario un método elasto-plástico de cálculo. Los esfuerzos de tracción que aparecen en el terraplén están en el intervalo de lo permitido. Cuando la rigidez del geotextil aumenta el asiento disminuye ligeramente. Si se produce drenaje en la base, el esfuerzo de tracción requerido en el geotextil disminuye fuertemente. Un método elasto-plástico de elementos finitos es una herramienta excelente para investigar los geotextiles de refuerzo requeridos en un terraplén sobre suelo blando. De acuerdo con estos resultados, el esfuerzo de tracción requerido no es tan alto como el indicado por Ingold y Miller (1988).

REFERENCIAS

- INGOLD, T. S.; and MILLER, K. S. 1988. *Geotextiles Handbook*. Thoma Telford, London.
- JUSTO, J. L. 1994. *Informe geotécnico sobre los tramos de marisma de la Variante de Los Barrios*. Informe no publicado.
- JUSTO, J. L. 1995. *Segundo informe geotécnico sobre los tramos de marisma de la Variante de Los Barrios*. Informe no publicado.