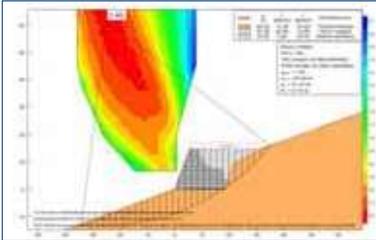


Criterios de diseño de suelos reforzados con geosintéticos. Comparativa normativas DIN vs BS¹



Criteria on the design of reinforced soil structures with geosynthetics. Comparison Standards DIN vs BS¹

Patricia Amo Sanz

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos
Departamento Técnico de HUESKER GEOSINTETICOS S.A.

José Luis Cuenca Lorenzo

Geólogo
Director de TENCATE GEOSYNTHETICS IBERIA, S.L.

José Manuel Martínez Santamaría

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Laboratorio de Geotecnia – CEDEX

Resumen

En el presente artículo se recoge un resumen de los procedimientos de cálculo contemplados para el diseño de estructuras de suelo reforzado con geosintéticos en la Norma alemana DIN 4084 y en la norma inglesa BS 8006:1995, con especial mención a la metodología seguida en cada una de ellas (ambas basadas en los métodos de equilibrio límite) y a los valores de referencia contemplados en las mismas.

Utilizando un ejemplo de diseño resuelto por cada una de las normativas mencionadas, se describen las propiedades de estos geosintéticos de refuerzo desde un punto de vista de diseño de estructuras y se analizan los coeficientes de seguridad para minorar la resistencia de estos materiales.

PALABRAS CLAVES: geosintéticos, métodos de equilibrio límite, imbricación, superficies de deslizamiento, ángulo de rozamiento interno, cohesión, factor de seguridad.

Abstract

This article presents a summary made about the methods of calculation referred to the design of reinforced soil structures with geosynthetics in the German standard DIN 4084 and the British Standard BS 8006:1995, with special reference to the methodology followed in each of them (both based on the limit equilibrium methods) and the reference values covered thereo.

Using a design example solved by each of the rules mentioned, geosynthetic reinforcement properties are described from a structural design point of view and safety factors are analyzed to calculate the design resistance of these materials.

KEY WORDS: geosynthetics, limit equilibrium methods, interaction, sliding surfaces, friction angle, cohesion, safety factor.

¹ Revisado por el Comité de Geotecnia Vial de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC).

En general, al suelo reforzado se le pueden aplicar los distintos procedimientos de cálculo que existen en la Mecánica de Suelos, con adaptaciones o retoques según los casos en estudio.

Los métodos de equilibrio límite (últimos y de servicio) se basan en establecer el equilibrio de fuerzas y momentos actuantes en un sistema, sin considerar las deformaciones producidas, aplicando únicamente las ecuaciones de la estática. Para su aplicación en refuerzo de suelos con geosintéticos se debe analizar:

- Por un lado la estabilidad interna, como estructura multielemental, comprobando la resistencia de cada refuerzo (fallo de tracción) y la resistencia entre el refuerzo y el suelo (fallo de imbricación), estableciendo la distribución, número, área, resistencia, longitud, etc., del refuerzo necesario.

Para el cálculo de la estabilidad interna, de forma general, se aplica la teoría de empujes de tierra, en muros, considerando una zona activa o cuña deslizante y una zona pasiva o resistente, de modo que las tracciones máximas en el refuerzo se producen en la línea que separa ambas zonas, la cual puede ser curva, plana, con forma de trapecio, etc. Como alternativa se puede aplicar el método de la "doble cuña", en el que se considera una superficie de rotura bilineal que define dos cuñas. La estabilidad, en este caso, se evalúa considerando el equilibrio de fuerzas entre las dos cuñas, el terreno y las fuerzas proporcionadas por los geosintéticos.

- El estudio de la estabilidad externa trata la sección de cálculo como una masa homogénea de terreno y lo evalúa de acuerdo con los modelos de fallo tradicionales para un muro de gravedad (vuelco, deslizamiento, hundimiento). Para ello considera la masa reforzada como un conjunto estable y comprueba las superficies de deslizamiento potenciales fuera de ésta.

La estabilidad externa considera superficies de rotura que no cortan la zona armada, sino que transcurren completamente por fuera de las inclusiones de refuerzo, y por lo tanto, por fuera del macizo reforzado.

- En alguna ocasión, pueden aparecer líneas de deslizamiento que queden parcialmente dentro de la masa reforzada y parcialmente fuera de ella y se hace necesario

un análisis combinado de la estabilidad externa-interna que se conoce como estabilidad compuesta.

A menudo, estos mecanismos de rotura, que se denominan mecanismos de estabilidad compuesta, definen la superficie de rotura más desfavorable; la estabilidad compuesta controla el diseño, y por lo tanto indica cual es la superficie de deslizamiento que tiene el menor coeficiente de seguridad. Si se ignora la estabilidad compuesta, el diseño de estabilidad del muro o talud no será correcto y el riesgo de que se produzcan daños será mayor.

En consecuencia, se debe llamar poderosamente la atención en el hecho de que un diseño correcto tiene que tener en cuenta todas las posibles superficies de deslizamiento para averiguar cual de todas ellas es la más desfavorable. Por esta razón, considerar exclusivamente la tradicional estabilidad interna y externa, sin considerar las formas de rotura mixtas o "compuestas" es absolutamente insuficiente.

Como alternativa a los métodos de equilibrio límite se pueden utilizar métodos que compatibilicen las deformaciones que experimentan los geosintéticos y el suelo, para lo cual, para poderlos formular, o bien hay que hacer simplificaciones y admitir una serie de hipótesis o bien hay que recurrir a la aplicación de métodos numéricos como el de los elementos finitos. La ventaja de este tipo de cálculos es que permiten determinar las deformaciones que van a experimentar los geosintéticos en las condiciones para las que han sido calculados, lo que permite un mejor control del comportamiento de la estructura de suelo reforzada, eliminando posibles incertidumbres.

En este artículo se recoge un resumen de los procedimientos de cálculo contemplados para el diseño de estructuras de suelo reforzado con geosintéticos en la norma alemana DIN 4084 [1] y en la norma inglesa BS 8006:1995 [2], con especial mención a la metodología seguida en cada una de ellas (ambas basadas en los métodos de equilibrio límite) y a los valores de referencia contemplados en las mismas.

1. Norma DIN 4084

Esta es la norma en la que se basan los diseños de muros reforzados con geosintéticos, que siguen la metodología de Alemania y Austria.

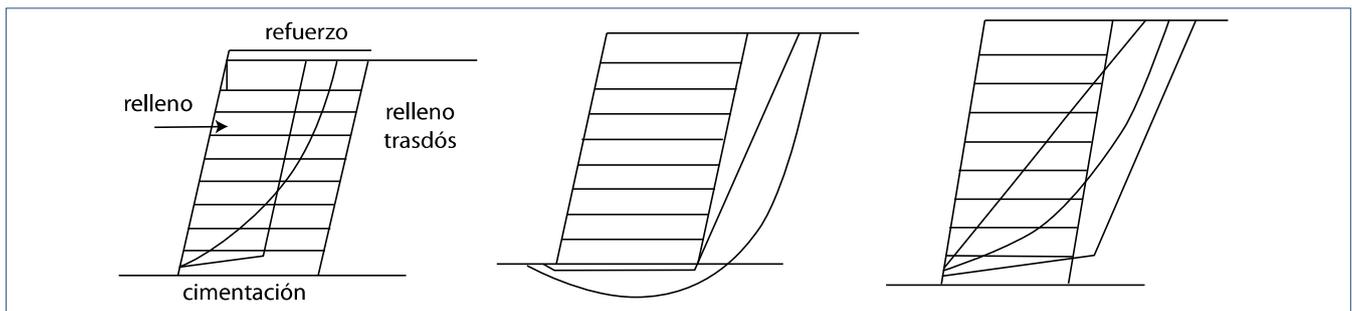


Figura 1. Esquema de las diferentes superficies de rotura

Esta Norma está relacionada con los fundamentos y con el procedimiento de cálculo que se utiliza para determinar la seguridad de la estructura, mediante el estudio de la estabilidad a lo largo de superficies de deslizamiento cilíndrico-circulares y orienta sobre el grado de seguridad que se tiene que requerir al diseño.

1.1 Criterios generales

Para la realización de un correcto diseño de un muro de cualquier tipología es necesario que los parámetros de partida estén correctamente definidos. Hay que tener en cuenta que el coste de una estructura de este tipo y su estabilidad posterior son el resultado de una correcta definición de estos parámetros.

Se debe tener una correcta definición geométrica del muro. Es necesario definir las cotas de cimentación y las de coronación, así como la existencia o no de un talud en coronación del mismo. La longitud de refuerzo a colocar será mínimo el 70% de la altura del muro.

Se debe realizar un reconocimiento para explorar el cimiento hasta una profundidad igual o superior a la altura prevista en el muro, salvo que a menor profundidad se compruebe la existencia de roca sana y definir así los parámetros geotécnicos que definen la zona donde apoya el muro.

Es vital realizar la caracterización geotécnica del material de relleno. Se debe definir el ángulo de rozamiento interno, la cohesión y su densidad. El relleno utilizado es crítico para determinar la estabilidad estructural del muro reforzado y, debido a su mayor variabilidad, exige un estudio detallado. Se debe determinar *a priori* la calidad del relleno que se utilizará y se debe validar su uso. Es importante remarcar la total dependencia sobre el diseño que el ángulo de rozamiento interno y las condiciones hidrostáticas tienen. En la Tabla 1 se indican los materiales recomendados.

Hay que definir también la disposición del nivel freático; un reconocimiento hidrogeológico local resulta de importancia capital en este tipo de estructuras, habida cuenta de la importancia del agua en las acciones de empuje.

Tabla 1: Tipos de materiales recomendados para el relleno de los muros

	Terreno	Tipo de suelo	D _{pr} en % compactación	n _a % huecos
1	Coronación hasta 1 m de profundidad en terraplenes y hasta 0,5 m de profundidad en desmonte	GW, GI, GE SW, SI, SE GU,GT,SU,ST	100	-
2	Hasta 1 m en fondo de terraplén (cimiento)	GW, GI, GE SW, SI, SEGU, GT, SU, ST	98	-
3	Núcleo de terraplenes y espaldones	GU, GT, SU, ST U, T, OU, OT	97	12

G: grava U: limo W: bien graduada E: mal graduada
S: arena T: arcilla I: graduación intermedia

Tabla 2. Factores parciales para acciones y efectos de acciones

Acciones o efectos de acciones	Símbolo	Caso de carga		
		1	2	3
Estado límite de pérdida de equilibrio estático:				
• Acción permanente favorable	Y _{G,stab}	0,95	0,95	0,95
• Acción permanente desfavorable	Y _{G,dst}	1,05	1,05	1,00
• Fuerza de filtración favorable	Y _H	1,35	1,30	1,20
• Fuerza de filtración desfavorable	Y _H	1,80	1,60	1,35
• Acción desfavorable variable	Y _{Q,dst}	1,50	1,30	1,00
Estado límite de fallo de la estructura o de fallo de elementos de la estructura:				
• Efecto de acción debida a carga permanente	Y _G	1,35	1,20	1,10
• Efecto de acción debida a carga permanente de presión del terreno	Y _{E0g}	1,20	1,10	1,00
• Efecto de acción debido a acciones desfavorables variables	Y _Q	1,50	1,30	1,10
Estado límite de pérdida de estabilidad:				
• Acciones permanentes	Y _G	1,00	1,00	1,00
• Acciones desfavorables variables	Y _{E0g}	1,30	1,20	1,00
Estado límite de servicio:				
• Y _G = 1,00 para acciones permanentes y efectos de acciones permanentes				
• Y _Q = 1,00 para acciones variables y efectos de acciones variables				

* Incluye permanente y variable acción del agua.

La carga que va a soportar el muro y la forma en la que ésta se dispone son importantes para un correcto planteamiento en la sección de cálculo. Por ejemplo, no es lo mismo calcular el factor de seguridad de un muro con talud en su coronación, que el factor de seguridad de un muro con una sobrecarga lineal equivalente a la carga que el talud le transmitiría al muro. En este segundo cálculo no se tendría en cuenta la componente horizontal de la carga del talud que se transmite al muro. En la Tabla 2 se presentan los valores adoptados para la mayoración de cargas en cada caso.

El diseño se suele realizar en ausencia de agua, pero en caso de tenerlo que hacer en condiciones de saturación hay que tener en cuenta esta situación.

1.2 Metodología de cálculo: Estabilidad interna y externa

Los análisis de estabilidad permiten definir la longitud y la resistencia de los elementos de refuerzo, de acuerdo con la geometría y las cargas a las que está sometido el macizo reforzado, para conseguir el coeficiente de seguridad deseado.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en el estudio físico de las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el muro. A efectos prácticos, los métodos que se utilizan en el cálculo de muros son

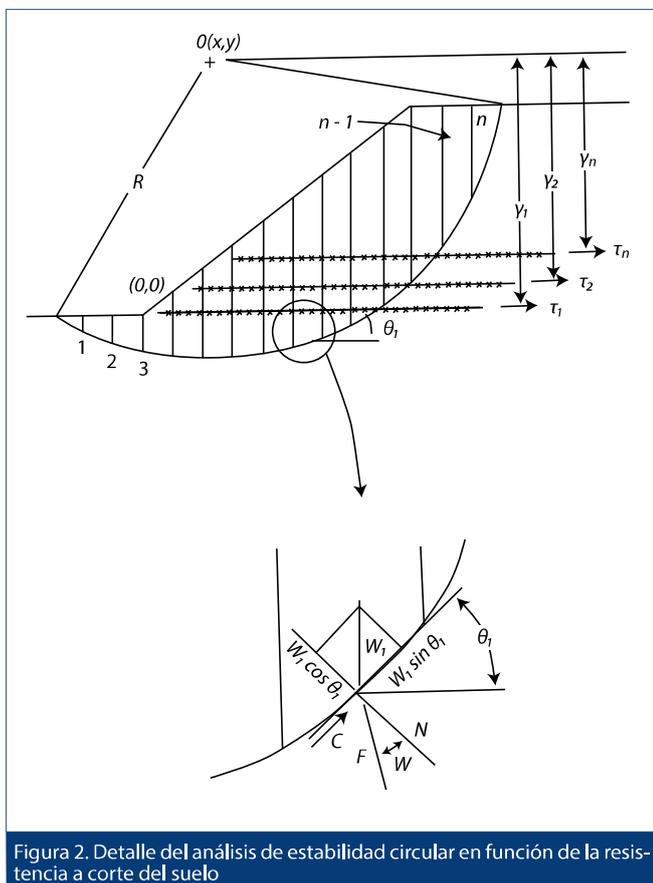


Figura 2. Detalle del análisis de estabilidad circular en función de la resistencia a corte del suelo

métodos de equilibrio límite (Figura 2). Se seleccionan los parámetros que controlan el comportamiento del material de relleno, las cargas que actúan, las fuerzas resistentes aplicadas, las condiciones hidrostáticas, las condiciones sísmicas, etc. y se analiza el equilibrio de una masa potencialmente inestable.

El empuje de tierras sobre el trasdós de los muros de contención debe calcularse, de cara al análisis de los estados límite últimos del cimiento, utilizando la teoría de Coulomb para el empuje activo, y suponiendo que los rellenos artificiales que se utilizan para su trasdosado no tienen cohesión.

La técnica del suelo reforzado se basa en un principio que se demuestra con este simple modelo.

Consideremos un elemento rectangular como una parte de una infinita masa de suelo. Sobre dicho elemento se aplica una fuerza vertical σ_v . El elemento se deforma y sobre él, se generan las consecuentes fuerzas horizontales σ_h debido a la compresión lateral sufrida por el suelo adyacente (empuje activo). En la dirección horizontal el elemento sufre una deformación ϵ_h .

Cuando un geosintético de refuerzo se coloca embebido en el suelo, la aplicación de la fuerza vertical, provoca una deformación del suelo y una extensión del geosintético. Esto es debido a:

- El rozamiento entre el suelo y el área "sólida" del geosintético.
- La trabazón entre el suelo y los huecos del geosintético: el suelo "moviliza" un empuje pasivo sobre las zonas transversales del geosintético.

El geosintético debe tener la suficiente imbricación con el suelo para que las fuerzas desestabilizantes de la estructura se transmitan a él por cortante. Además, debe tener la suficiente trabazón con la zona estable del terreno como para poder transmitir esa fuerza de tracción.

La interacción entre el suelo y el geosintético se estudia a través de:

- Pruebas de extracción (arrancamiento) (Figura 3).
- Ensayos de corte o deslizamiento directos.

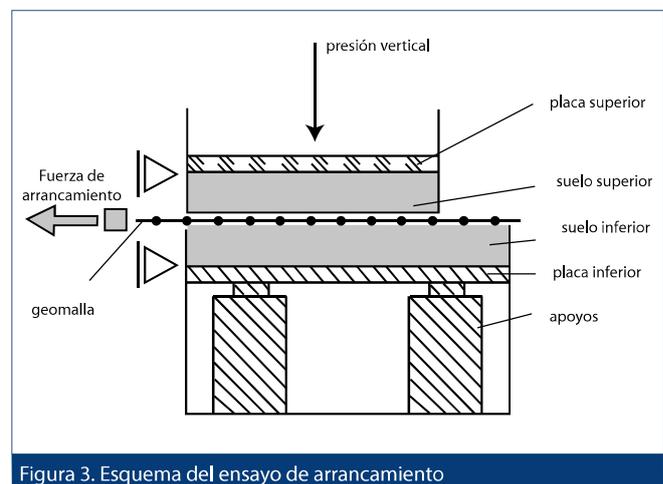


Figura 3. Esquema del ensayo de arrancamiento

El coeficiente de interacción, f , se define como el índice entre la $\tan \delta$ (rozamiento con el geosintético) y la $\tan \varphi$ (rozamiento interno del suelo).

Se define el coeficiente de rozamiento suelo - geotextil como la relación entre la resistencia al corte horizontal y la tensión vertical aplicada:

$$\tan \delta = \tau_h / \sigma_v \quad (1)$$

El valor $\tan \delta$ se obtiene en ensayos de laboratorio para cada material de refuerzo. Cuanto mayor sea este valor, la imbricación será mayor y la longitud de los geosintéticos necesaria será menor. Este valor es superior en el refuerzo con geomallas que con geotextiles.

Los valores que se utilizan para el coeficiente de interacción ($\tan \delta / \tan \varphi$) oscilan entre 0,6-0,8 de los geotextiles tejidos y entre 0,8-1,0 de las geomallas protegidas (dependiendo de la abertura de la malla). Estos valores deben ser certificados por organismos externos cualificados.

La resistencia al esfuerzo cortante para "arrancar" el geosintético del suelo (τ) viene dada por:

$$\tau = \sigma \cdot f \cdot \tan \varphi \quad (2)$$

donde:

f : coeficiente de interacción.

φ : ángulo de rozamiento interno del suelo.

La resistencia máxima vendrá dada por la expresión:

$$T = 2 L B \tau$$

donde L , B son la longitud y anchura del refuerzo.

Esta nueva fuerza contribuye a resistir las fuerzas horizontales y a reducir las deformaciones horizontales. Dicho de otra manera, un suelo reforzado soportará mayores fuerzas verticales que un suelo sin refuerzo para las mismas deformaciones.

A la hora de estudiar la estabilidad del muro, éste se considerará dividido en rebanadas, todas del mismo espesor, estudiando la estabilidad de cada una de ellas.

En general, se suele adoptar el círculo como superficie de deslizamiento, como en el caso de uno de los métodos de cálculo, el método de Bishop. Pero también se estudian líneas rectas (poligonales) como superficie de deslizamiento. Es el caso del método de "deslizamiento de bloques". En ambos métodos de equilibrio límite tras sucesivas iteraciones se busca la superficie de deslizamiento correspondiente al menor factor de seguridad. Este factor de seguridad ha de cumplir las especificaciones mínimas de la norma.

Las fórmulas empleadas dependiendo de cada método son:

- Bishop:

$$\eta = \frac{\sum T_i + \sum H_s}{\sum G_i \cdot \tan \varphi_i + \sum H} \quad (3)$$

con:

$$T_i = \frac{[G_i - (u_i + \Delta u_i) \cdot b_i] \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot b_i}{\cos \varphi_i + \frac{1}{\eta} \tan \varphi_i \cdot \sin \varphi_i} \quad (4)$$

- Deslizamiento de bloques:

$$\eta = \frac{r \cdot \sum T_i + \sum M_s}{r \cdot \sum G_i \cdot \tan \varphi_i + \sum M} \quad (5)$$

con:

$$T_i = \frac{[G_i - (u_i + \Delta u_i) \cdot b_i] \cdot \tan \varphi_i + c_i \cdot b_i}{\cos^2 \varphi_i \cdot (1 + \frac{1}{\eta} \tan \varphi_i \cdot \tan \varphi_i)} \quad (6)$$

Los parámetros utilizados son los siguientes:

η : factor de seguridad.

G_i : peso propio de una rebanada en kN/m considerando el peso específico del suelo, incluyendo las sobrecargas.

M : momentos de las cargas y fuerzas no incluidas en G_i desde el centro del círculo en kNm/m, positivo en sentido de las agujas del reloj (H para deslizamiento de bloques).

M_s : momentos desde el centro del círculo en kNm/m de las fuerzas (Sección 6e DIN 4084), que no están consideradas en T_i (H_s para deslizamiento de bloques).

T_i : fuerza resistente tangencial del suelo en la superficie de deslizamiento para cada rebanada en kN/m (para deslizamiento de bloques se corresponde con la componente horizontal).

$\tan \varphi$: tangente que forma la rebanada con la horizontal en grados sexagesimales, para el caso de círculos se corresponde con las coordenadas polares.

r : radio de la superficie circular, en m.

b_i : ancho de la rebanada, en m.

φ_i : ángulo de rozamiento interno, en grados, para cada rebanada según la sección 8 de DIN 4084.

c_i : cohesión, en kN/m², para cada rebanada según la sección 8 de DIN 4084.

u_i : presión intersticial, en kN/m², para cada rebanada.

Δu_i : incremento en la presión intersticial para cada rebanada, en kN/m², como consecuencia de la consolidación del suelo.

1.3 Coeficientes de seguridad

La base sobre la que descansa esta norma, en cuanto a determinar el factor de seguridad, es que numerosas superficies de deslizamiento son estudiadas en el terreno o macizo reforzado, individualmente, obteniéndose el peor de los casos posibles y teniendo como factor de seguridad el correspondiente a ese caso. Siempre será el factor de seguridad el menor de todos los valores obtenidos.

Los factores de seguridad a conseguir cuando se hace un diseño de un muro reforzado con geosintéticos, deben seguir lo marcado por la norma DIN 1054 "Verificación de la seguridad en trabajos de movimientos de tierra y cimentaciones" [3].

El factor de seguridad de dicho círculo ha de cumplir las especificaciones mínimas de la normativa. Las directrices de la norma DIN 4084 indican que el factor de seguridad global más desfavorable no debe ser inferior a 1,40. Un diseño con un círculo de rotura que tenga un coeficiente de seguridad inferior a 1,40 no debe ser aceptado.

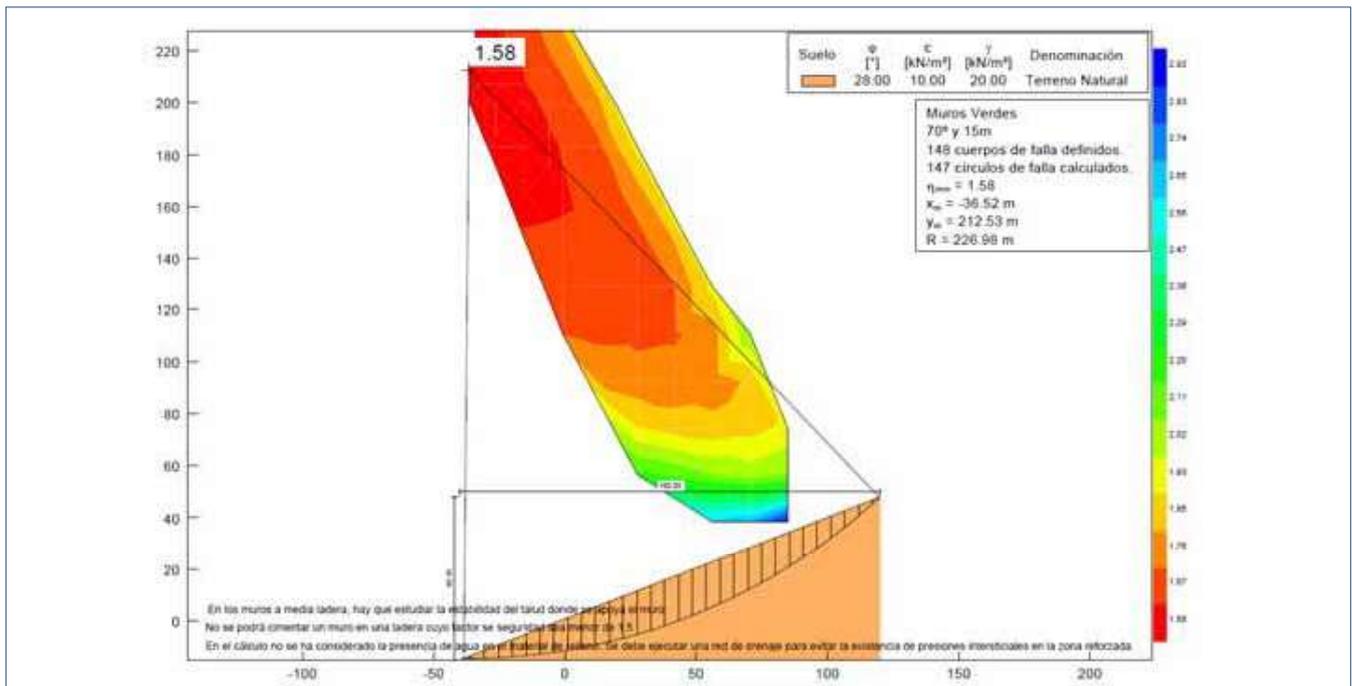


Figura 4. Cálculo de una ladera por el método de Bishop

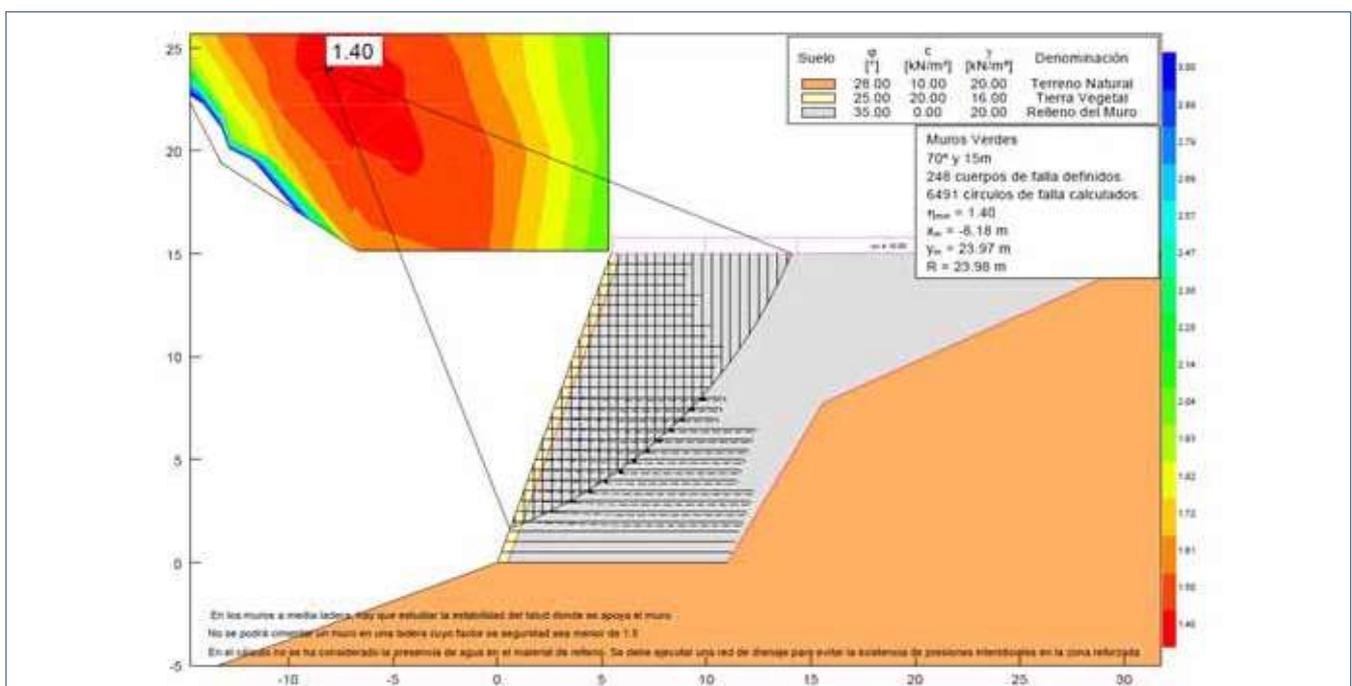


Figura 5. Cálculo de la estabilidad interna de un muro reforzado. Método de Bishop

Rutas Técnica

1.4 Ejemplo de aplicación

En este apartado intentaremos explicar qué es lo que puede ocurrir cuando solo se tiene en cuenta la estabilidad interna de un determinado muro "a media ladera". Un cálculo correcto teniendo en cuenta los tres métodos de rotura anteriores conllevará un aumento de coste del muro.

El método de cálculo utilizado para determinar los factores de seguridad de las diferentes estructuras será el método de Bishop.

Supongamos una ladera de pendiente uniforme de 20°, con un ángulo de rozamiento interno de 30° y una cohesión de 10 kN/m², se obtiene un círculo con un factor de seguridad de 1,58 (Figura 4).

Supongamos que sobre la ladera anterior, queremos construir un muro de 15 m de altura y 70° de pendiente de la cara vista.

Veamos que ocurre al calcular incorrectamente. Con los mismos datos de partida se estudia solamente la estabilidad interna del macizo reforzado. Se busca un factor de seguridad de 1,40. El círculo más desfavorable se muestra en la Figura 5.

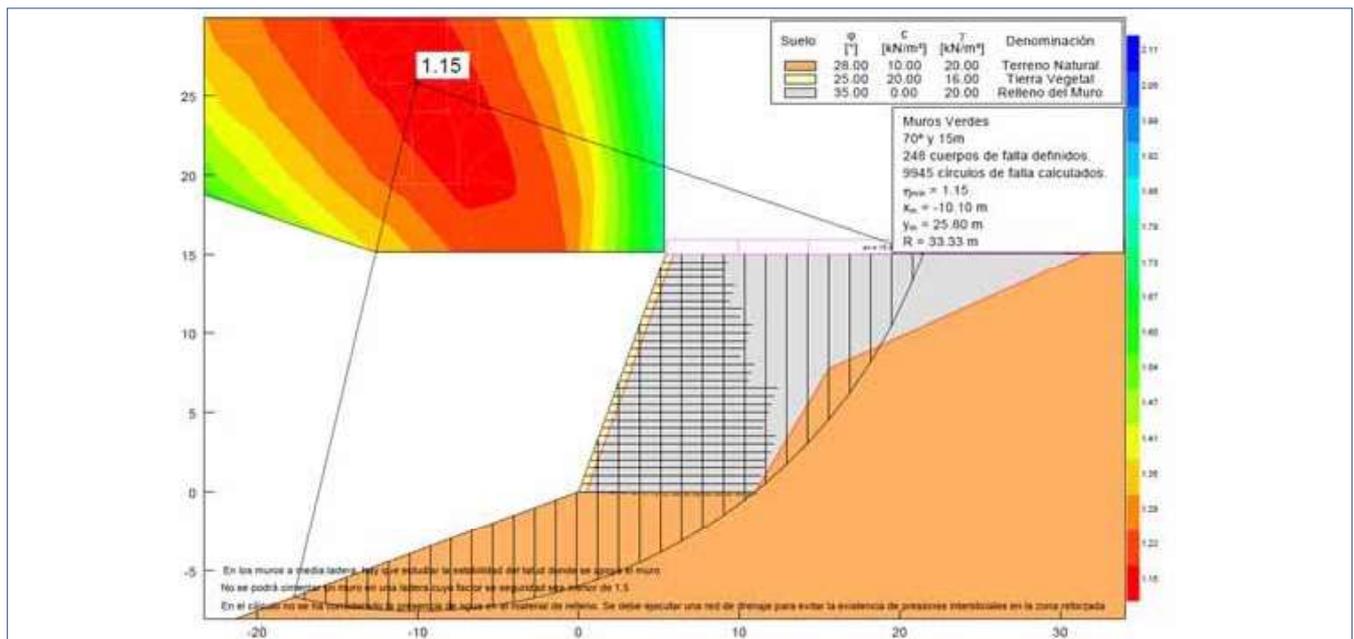


Figura 6. Cálculo de la estabilidad global de un muro reforzado. Método de Bishop

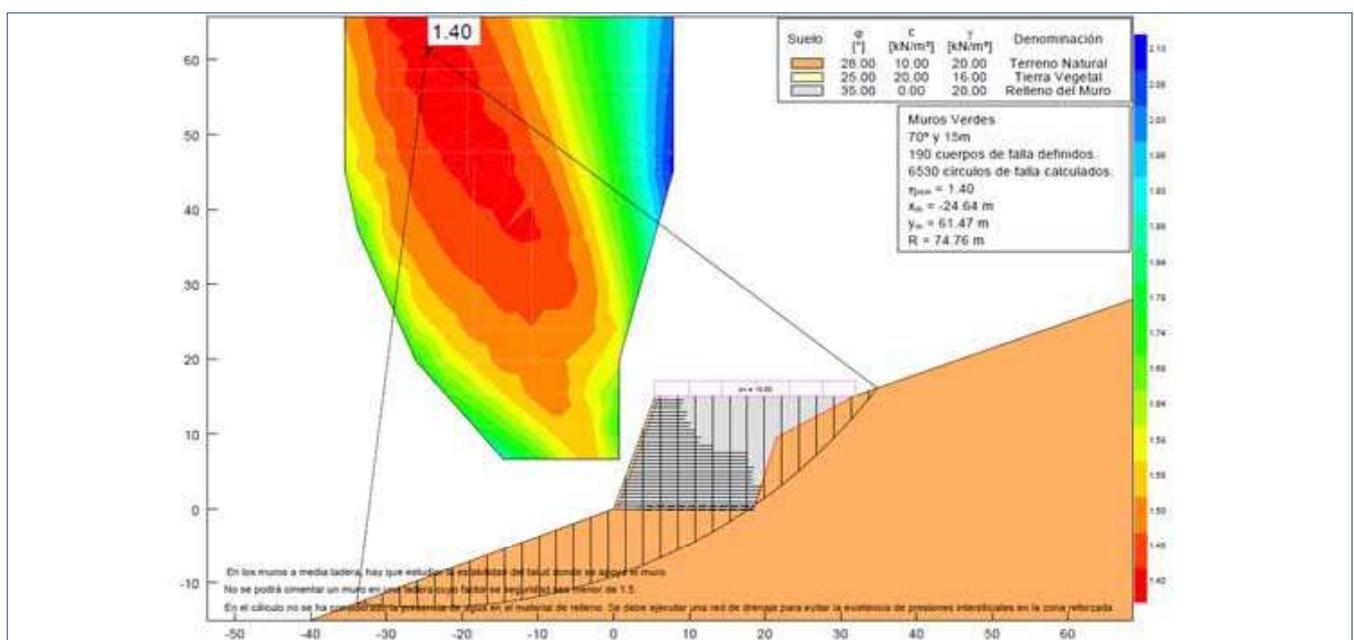


Figura 7. Cálculo de la estabilidad global de un muro reforzado. Método de Bishop

El resultado nos lleva a la colocación de geomallas de una determinada tensión de diseño y de una determinada longitud, según las características recogidas en la Tabla 3.

Pero si para esa misma cantidad de geomalla de refuerzo, calculáramos correctamente los tres modos de rotura conocidos, obtendríamos un coeficiente de seguridad de 1,15, que no sería aceptable por los ingenieros responsables. El cálculo correcto se muestra en la Figura 6.

Tabla 3. Características de los elementos de refuerzo tras el cálculo de la estabilidad interna del muro

Tongadas	Longitud (m)	Tensión de diseño (kN/m)
1 - 8	11	54,4
9 - 14	10	37,4
15 - 17	8	37,4
18 - 22	7	37,4
23 - 24	6	37,4
25 - 27	5	15,8
28 - 30	4	15,8

Tabla 4. Características de los elementos de refuerzo tras el cálculo de la estabilidad compuesta

Tongadas	Longitud (m)	Tensión de diseño (kN/m)
1-7	18,5	98,8
8	17	98,8
9-12	16,5	74,1
13 - 14	15,5	54,4
15 - 16	15	54,4
17 - 18	10	37,4
19 - 20	8	37,4
21 - 22	7	37,4
23 - 24	6	37,4
25 - 27	5	15,8
28 - 30	4	15,8

Tabla 5. Valores orientativos de los coeficientes de minoración

Parámetro		Geomalla homologada	Recomendaciones alemanas para geomallas sin certificar	
A1	Fluencia	1,52	2,5 Poliéster	5,0 Polietileno
A2	Daño mecánico	1,1 (relleno redondeado fino) 1,2 (relleno redondeado grueso)	1,5 (relleno redondeado fino) 2,0 (relleno redondeado grueso)	
A3	Uniones y solapes	1,0 (sin uniones ni solapes)	1,0 (sin uniones ni solapes)	
A4	Efectos medioambientales	1,0 (4,0 < pH < 9,0)	1,0 (4,0 < pH < 9,0)	
A5	Impacto dinámico	1,0	1,0 (ningún impacto esperado)	
γ	General	1,3	1,4	
F _d	Tensión de diseño en % de la tensión nominal	42% - 46 %	Poliéster 14% - 19% Polietileno 7% - 9,5%	

Si se realizara un diseño correcto y finalmente se dispusieran las geomallas necesarias para obtener un factor de seguridad mínimo de 1,4, considerando la estabilidad del conjunto muro-ladera, se obtendría el resultado de la Figura 7.

En este caso, el coste del material de refuerzo, frente al diseño obtenido para la estabilidad interna del muro, generaría un incremento en el coste de geomallas de un 50%, pero con un coeficiente de seguridad válido si se quisiera estar bajo las especificaciones de la normativa de cálculo de este tipo de muros.

Como se ha podido comprobar, es de vital importancia el estudio conjunto del muro-ladera, ya que si solo se estudia la estabilidad interna, el factor de seguridad puede ser inferior al que la normativa y el estado del arte actual establecen. Esta conclusión es válida también para cualquier otra tipología de muros.

Se puede determinar la tensión de diseño de un geosintético (F_d) a partir de la tensión nominal (F_k) de la siguiente forma:

$$F_d = \frac{F_k}{A1 \cdot A2 \cdot A3 \cdot A4 \cdot A5 \cdot \gamma} \tag{7}$$

donde:

F_k: tensión nominal o resistencia a tracción a corto plazo, en kN/m.

A1: factor de seguridad de fluencia.

A2: factor de seguridad para daño mecánico.

A3: factor de seguridad debido a uniones y solapes. Si no hay solapes en la dirección del refuerzo: A3=1.

A4: factor de seguridad para efectos medioambientales.

A5: factor de seguridad por impacto dinámico: A5 = 1.

γ: factor de seguridad en el proyecto, fabricación y extrapolación de datos.

La normativa internacional ISO 10319 define el ensayo para determinar el diagrama tracción – deformación de un geosintético de refuerzo y por lo tanto su tensión nominal. Esta tensión nominal se debe minorar con los 4 coeficientes anteriores para obtener la tensión de diseño.

Tabla 6. Factores parciales para Estados Límites Último y de Servicio			
Factores parciales		Estado Límite Último	Estado Límite de Servicio
Factores de carga	Densidad del suelo de relleno	$f_s = 1,5$	$f_s = 1,0$
	Cargas muertas externas (cargas puntuales o lineales)	$f_r = 1,2$	$f_r = 1,0$
	Cargas vivas externas (tráfico)	$f_q = 1,3$	$f_q = 1,0$
Factores del material suelo	Aplicar a $\tan \phi'_p$	$f_{ms} = 1,0$	$f_{ms} = 1,0$
	Aplicar a c'	$f_{ms} = 1,6$	$f_{ms} = 1,0$
Factores del material refuerzo	Aplicar a la resistencia del refuerzo	El valor de F_m debería ser consistente con el tipo de refuerzo a usar y la vida de diseño requerida al refuerzo (ver 5.3.3. y anexo A de BS 8006:1995)	
Factores de interacción suelo/refuerzo	Deslizamiento a través de la superficie de refuerzo	$f_s = 1,3$	$f_s = 1,0$
	Resistencia al arrancamiento del refuerzo	$f_p = 1,3$	$f_p = 1,0$
Factores parciales de seguridad	Deslizamiento a lo largo de la base de la estructura en el contacto suelo-suelo	$f_s = 1,2$	No necesario

2. Norma BS 8006:1995

La norma británica BS 8006:1995 "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills" es el documento técnico que refleja la buena práctica en el diseño y cálculo de las diferentes aplicaciones de los geosintéticos en el refuerzo de suelos, entre ellas los muros y los taludes. De hecho se tratan en dos secciones o capítulos diferentes, de forma que el capítulo 6 detalla el diseño de muros y estribos y el capítulo 7 habla sobre el diseño de taludes reforzados. Hay que tener en cuenta que las estructuras con ángulo de inclinación de hasta 20° sobre la vertical pueden ser calculadas, si se desea, como estructuras verticales o bien como taludes reforzados.

2.1 Criterios generales: Estados límite último y de servicio

El ángulo del talud tendrá influencia sobre el método de análisis a usar pero sobre todo, determinará la tipología del paramento frontal y el método de construcción.

Normalmente, es necesario algún tipo de paramento permanente y flexible para taludes reforzados de pendiente mayor de 45°, con el fin de facilitar el anclaje del refuerzo en la zona activa así como proporcionar protección frente a la erosión superficial.

El diseño, siguiendo los métodos de equilibrio límite, considera la mayoración de las cargas externas y de las propias del suelo por medio de los apropiados factores parciales de carga y considera también la minoración de las propiedades del suelo y la resistencia del refuerzo mediante los factores parciales de los materiales.

La Tabla 6 resume los factores parciales a aplicar en el diseño de taludes reforzados.

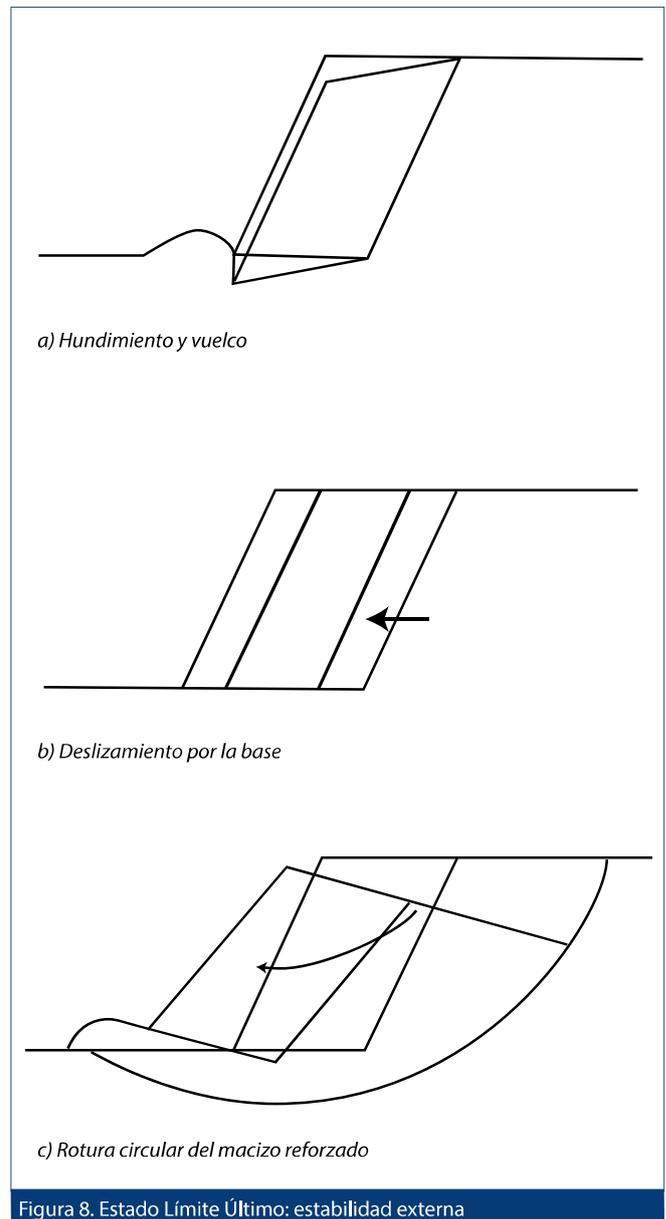


Figura 8. Estado Límite Último: estabilidad externa

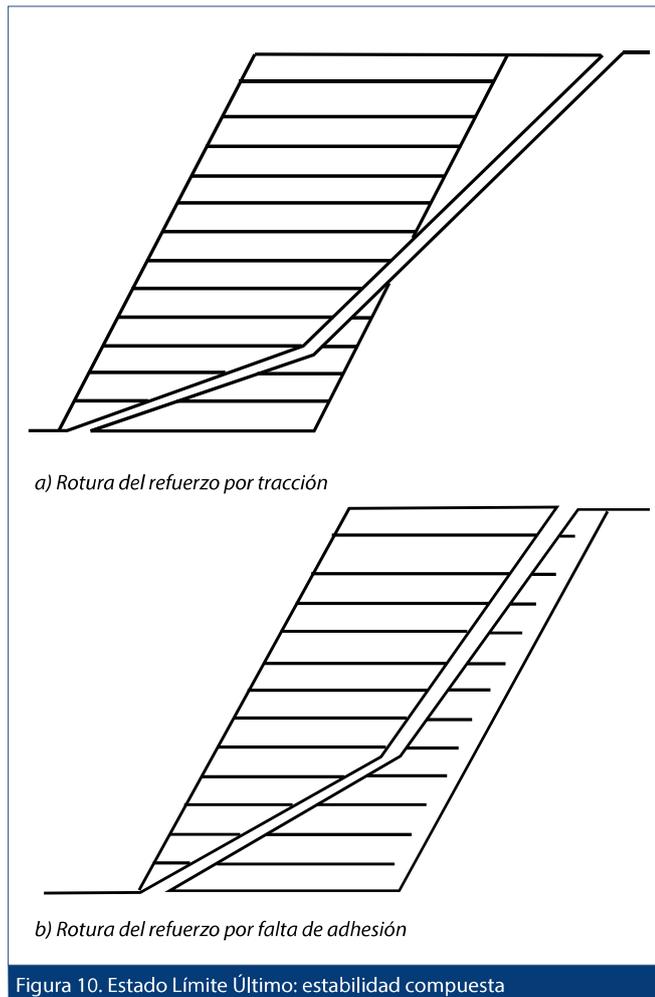


Figura 10. Estado Límite Último: estabilidad compuesta

También hay que aplicar un factor parcial F_n a la resistencia de diseño del refuerzo en función de las consecuencias económicas que pudiera tener un fallo de la estructura. Para ello, esta norma establece que F_n será igual a 1,1 en estribos, estructuras que soporten autopistas, carreteras, ferrocarriles, edificios no habitados o presas, entre otras infraestructuras, y será igual a 1 en caso de riesgo bajo o nulo.

Los análisis de estabilidad de taludes reforzados tienen mucho en común con los empleados en los muros reforzados, sin embargo, en los primeros los aspectos más críticos del diseño tienden a modos de rotura interna. No obstante es imprescindible realizar los cálculos correspondientes tanto al análisis de estabilidad interna como al de estabilidad externa y también los correspondientes a la estabilidad compuesta, como ya se indicaba al comienzo de este artículo.

Los Estados Límite Último a considerar (Figuras 8, 9 y 10) son:

- a) Estabilidad interna:
 - Rotura por tracción del geosintético de refuerzo.
 - Rotura por falta de adhesión del geosintético de refuerzo.
- b) Estabilidad externa:
 - Rotura por hundimiento y vuelco.
 - Rotura por deslizamiento por la base.

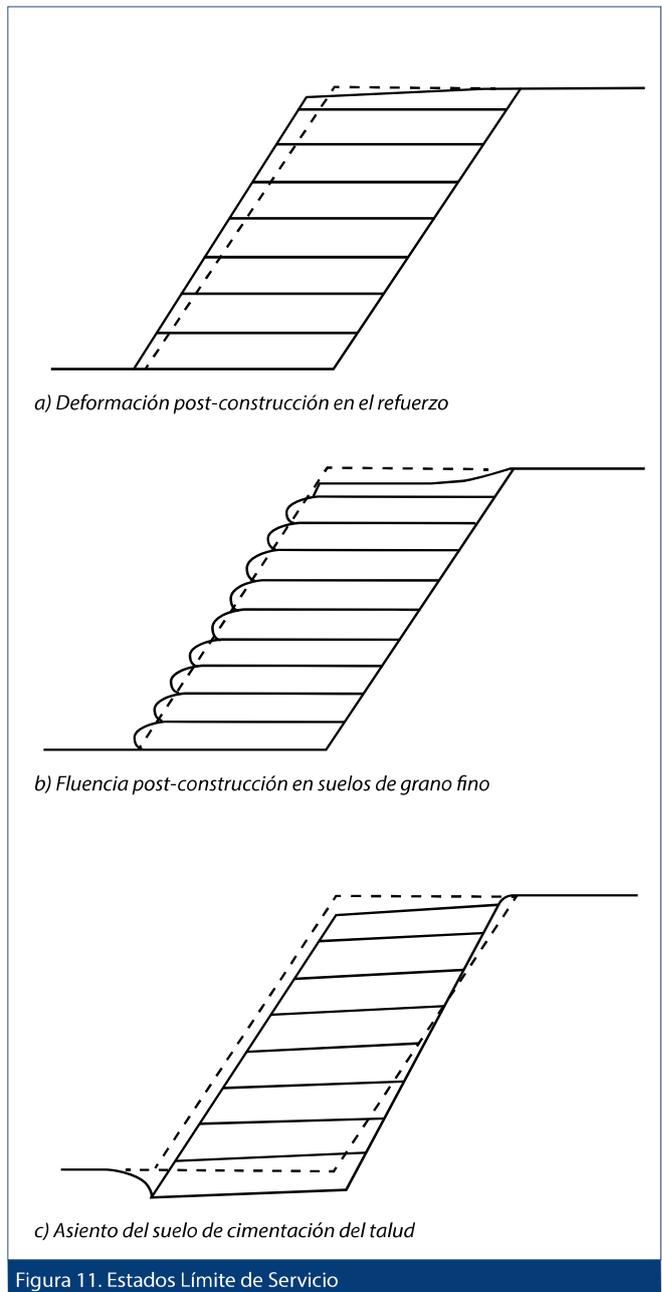


Figura 11. Estados Límite de Servicio

- Rotura circular alrededor del macizo de suelo reforzado.
- c) Estabilidad compuesta:
 - Rotura por tracción del geosintético de refuerzo.
 - Rotura por falta de imbricación del geosintético de refuerzo.

Los Estados Límite de Servicio a considerar (Figura 11) son:

- a) Estabilidad interna:
 - Deformación post-construcción en el refuerzo (del orden del 5% sería aceptable).
 - Fluencia post-construcción de los suelos de grano fino saturados empleados en el relleno reforzado, si fuera el caso.
- b) Estabilidad externa:
 - Asiento del suelo de cimentación del talud.

Rutas Técnica

Es posible que el análisis de estabilidad externa para el ELU pueda alertar de un problema de servicio de la estructura antes que de colapso. Por ejemplo, problemas de capacidad portante pueden resultar en deformaciones antes que en el fallo total de la estructura reforzada.

La compactación de cada capa del relleno reforzado debe ser llevada a cabo de igual forma que en un relleno no reforzado. Normalmente se diseña y ejecuta una capa de drenaje en el trasdós del suelo reforzado y en su base de forma que se pueda considerar que el macizo reforzado no está afectado por entradas de agua.

Si el suelo de relleno es cohesivo se pueden incluir capas granulares de drenaje a intervalos con el fin de prevenir la formación de presiones de poros en el macizo reforzado.

2.2 Metodología de cálculo: Estabilidad interna y externa

La estabilidad interna del talud reforzado depende de la capacidad del geosintético de refuerzo para resistir las cargas a soportar por el macizo reforzado. Se lleva a cabo normalmente en base a los métodos de equilibrio límite ajustados por el uso de factores parciales antes mostrados en concordancia con el estado límite considerado. Existen muchos métodos como por ejemplo, el análisis

de deslizamiento de bloques, el análisis de rotura circular, el de rotura no circular, el análisis según espiral logarítmica, etc. siendo los dos primeros los más habituales en la práctica.

El análisis de deslizamiento de bloques asume una superficie de rotura bilineal pues se ha comprobado que es una representación muy razonable de la superficie de rotura de taludes (Figura 12).

Para estructuras reforzadas donde el relleno termina en una superficie horizontal, las fuerzas desestabilizadoras pueden considerarse como la resultante del empuje lateral de tierras el cual se incrementa aproximadamente de forma lineal con la profundidad desde la coronación del talud.

El espaciado vertical entre las capas de geosintéticos de refuerzo puede ser calculado también aunque normalmente es un múltiplo del espesor de tongada compactada siendo el máximo espaciado recomendable igual a un metro para evitar inestabilidades en la cara del talud entre capas de refuerzo.

Por supuesto, la longitud mínima de anclaje del geosintético de refuerzo (ver Figura 9) tiene que ser calculada. Esta longitud depende de algunos factores parciales de la Tabla 6, de la sobrecarga externa debido solo a las cargas muertas, de la cohesión y ángulo de rozamiento interno de pico del suelo de relleno y de

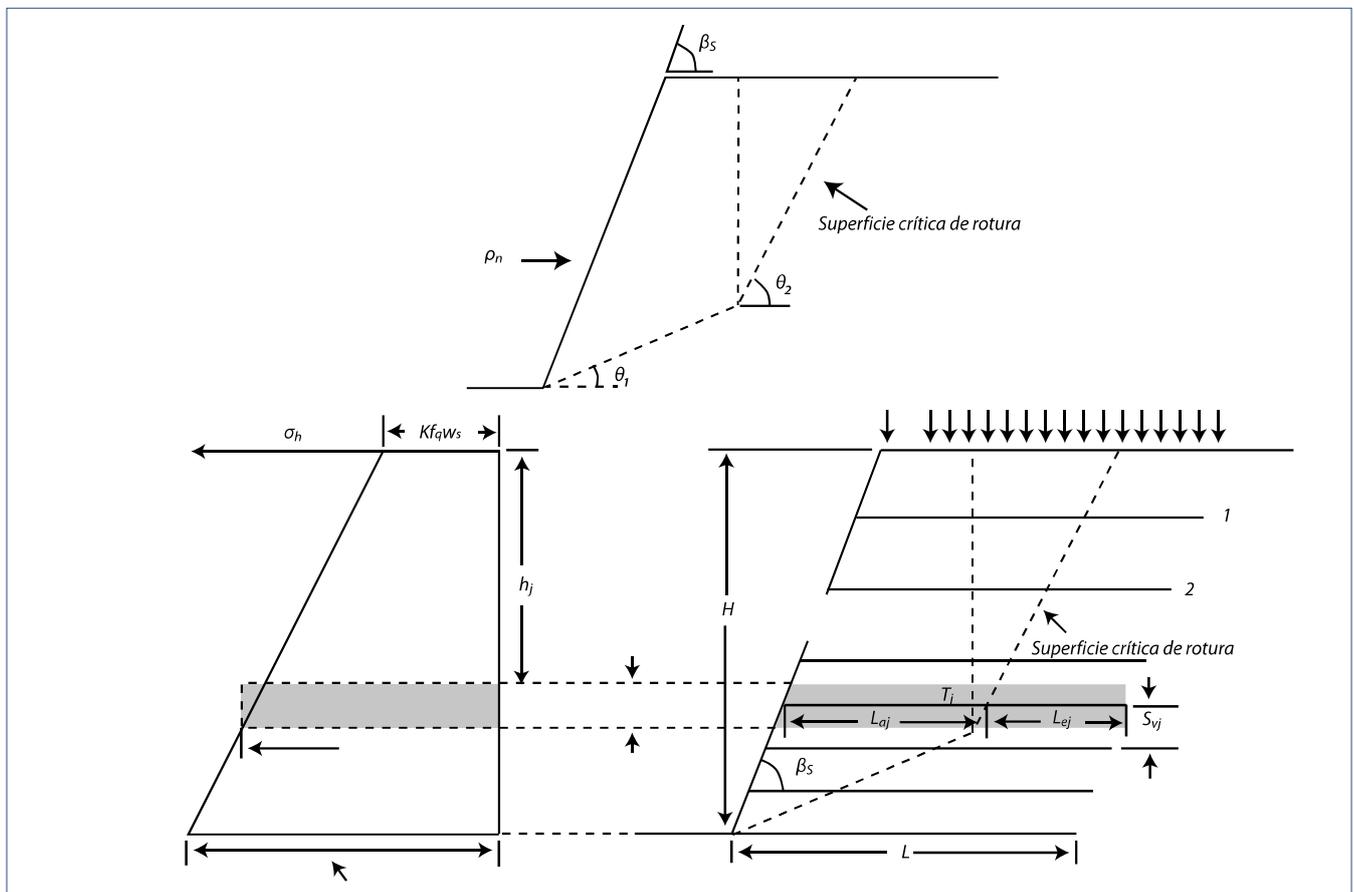


Figura 12. Análisis de la estabilidad interna de taludes reforzados según el método de deslizamiento de bloques

los coeficientes de interacción entre suelo y geosintético de refuerzo.

Se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$L_{ej} \geq \frac{f_p f_n T_j}{2[(y h_j + w_s) \frac{\alpha' \tan \varphi'_p}{f_{ms}} + \frac{\alpha_{bc} c'}{f_{ms}}]} \quad (8)$$

Donde:

- L_{ej} : longitud mínima de anclaje calculada al nivel j en el talud.
- f_p : factor parcial de arrancamiento del geosintético de refuerzo (ver tabla 6).
- f_n : factor parcial función de las consecuencias económicas que pudiera tener un fallo de la estructura.
- f_{ms} : factor parcial del material suelo aplicado a su $\tan \varphi'_p$ y a c' (ver Tabla 6).
- w_s : sobrecarga externa debido únicamente a cargas muertas.
- α' : coeficiente de adhesión relativo al contacto suelo/refuerzo para φ'_p .
- φ'_p : ángulo de resistencia al corte de pico del suelo del relleno.
- α_{bc} : coeficiente de adhesión relativo al contacto suelo/refuerzo para c' .
- c' : cohesión efectiva del relleno.
- T_j : máxima resistencia de refuerzo por metro lineal al nivel j del talud.
- γ peso unitario del suelo.
- h_j : altura del relleno sobre el nivel j en el talud (ver Figura 12).

El análisis de rotura circular se ha establecido como el más habitual para taludes, reforzados o no, de geometría variada y múltiples capas de suelos diferentes. Cuando la estructura está reforzada, se desprecian las fuerzas entre las rebanadas debido a que la presencia del refuerzo afecta a estas fuerzas y además reduce al máximo la distorsión en el macizo reforzado.

El momento estabilizador de los efectos combinados del suelo (M_{rs}) y del refuerzo (M_{rr}) no debe ser menor al momento desestabilizador (M_d) debido al peso del suelo más la sobrecarga.

La longitud mínima de anclaje del geosintético de refuerzo se calcula empleando la misma ecuación que en el análisis de deslizamiento de bloques.

En la superficie de rotura potencial que afecta parcialmente tanto a la parte reforzada como a la no reforzada del suelo de relleno hay que aplicar también los métodos de análisis de estabilidad interna con el fin de realizar correctamente el diseño de la estructura reforzada. No olvidar nunca el análisis de estabilidad compuesta pues frecuentemente es determinante en la seguridad de la estructura.

2.3 Coeficientes de seguridad

Los factores parciales (Tabla 6) empleados en mayor las cargas externas y el peso propio del suelo así como en minorar las propiedades del terreno y del geosintético determinan que el factor de seguridad global a satisfacer es 1.

Si se considera una estructura de categoría baja o media, es decir, su rotura supondría un daño nulo o moderado y pérdida del servicio el factor de seguridad debido a las consecuencia del fallo de la estructura sería $f_n = 1$. En estructuras de alto riesgo como son los estribos, las estructuras que soporten autopistas, carreteras, ferrocarriles, edificios no habitados o presas, entre otras infraestructuras, este factor será igual a 1,1.

Tabla 7. Características de los elementos de refuerzo tras el cálculo de la estabilidad del muro con carga equivalente

Tongadas	Longitud (m)	Tensión de diseño (kN/m)
1 - 5	8	68,2
6 - 9	7	36,4
10 - 11	6	25,0

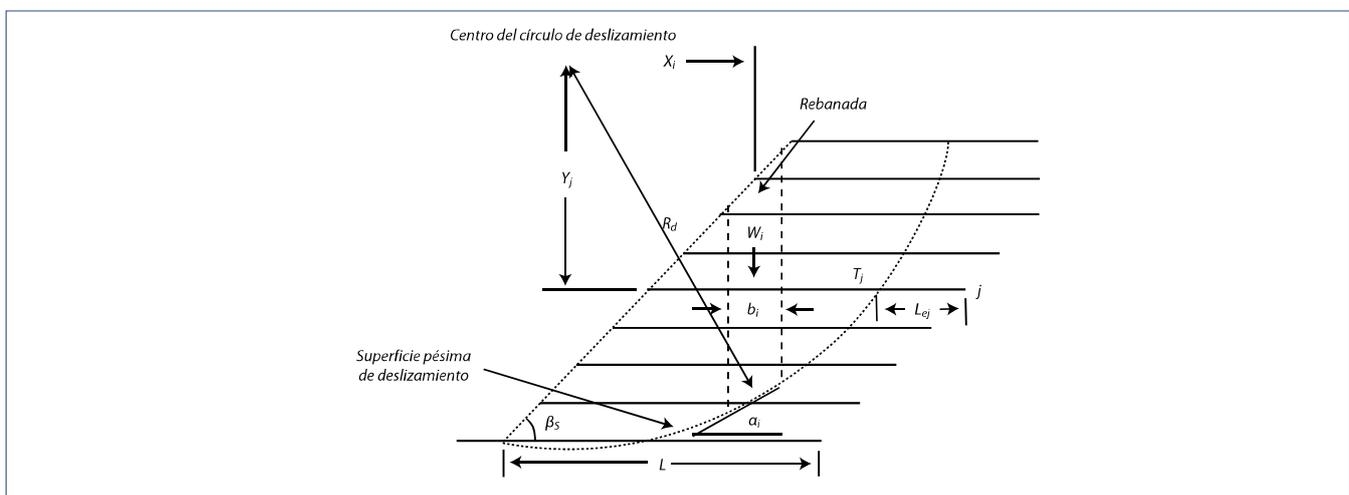


Figura 13. Análisis de la estabilidad interna según el método de las rebanadas para deslizamiento circular

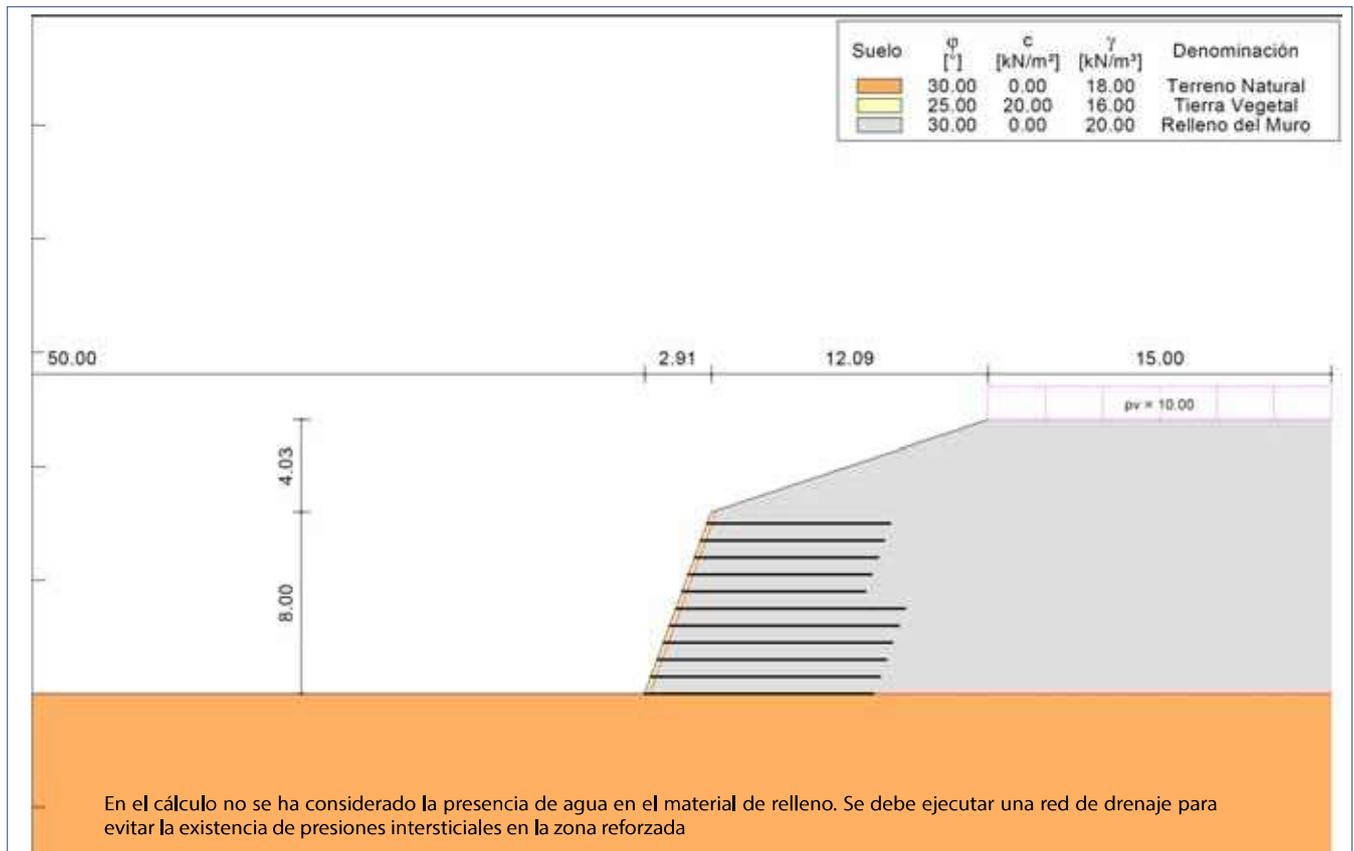


Figura 14. Esquema de la sección de cálculo. Talud de 4 m con pendiente 3H:1V

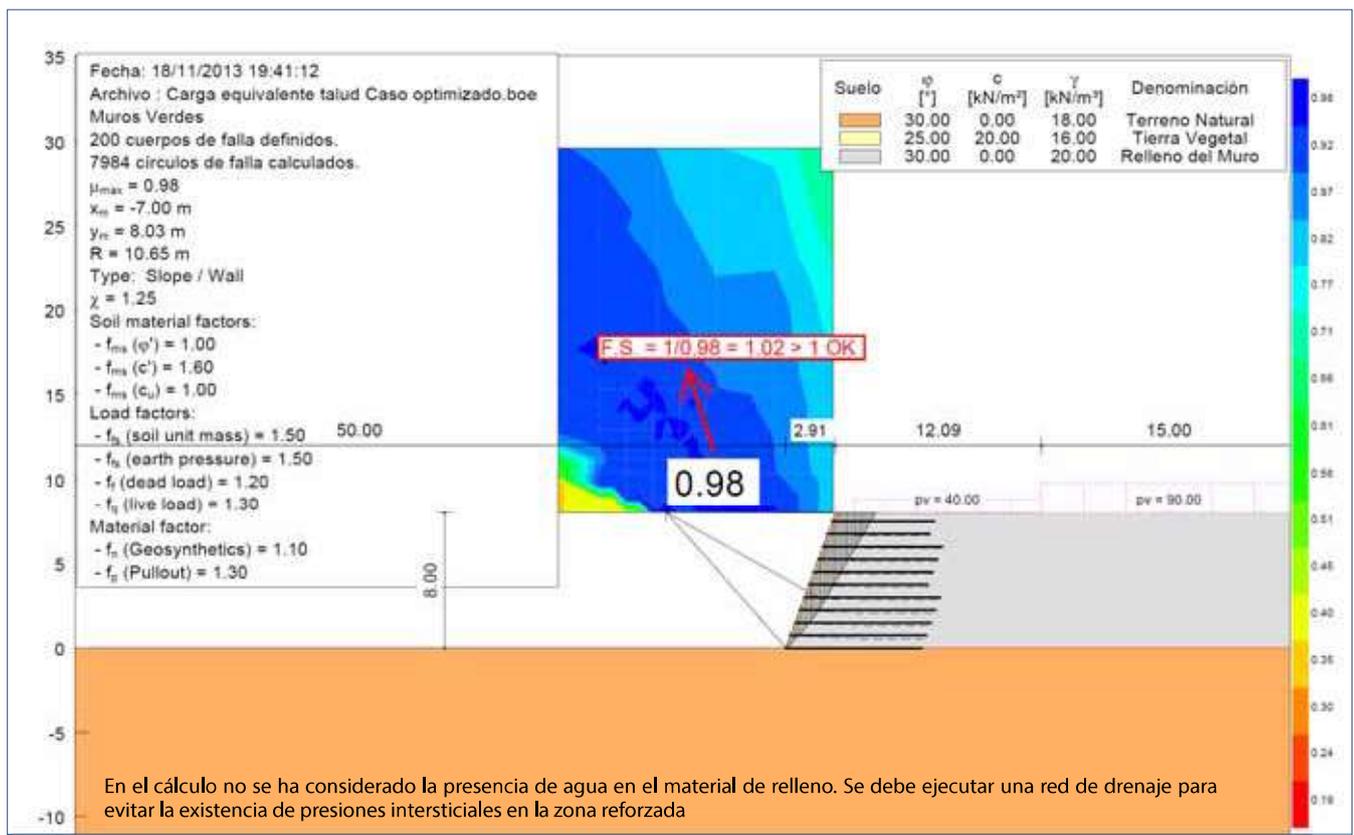


Figura 15. Cálculo de la estabilidad global de un muro reforzado. Método de Bishop

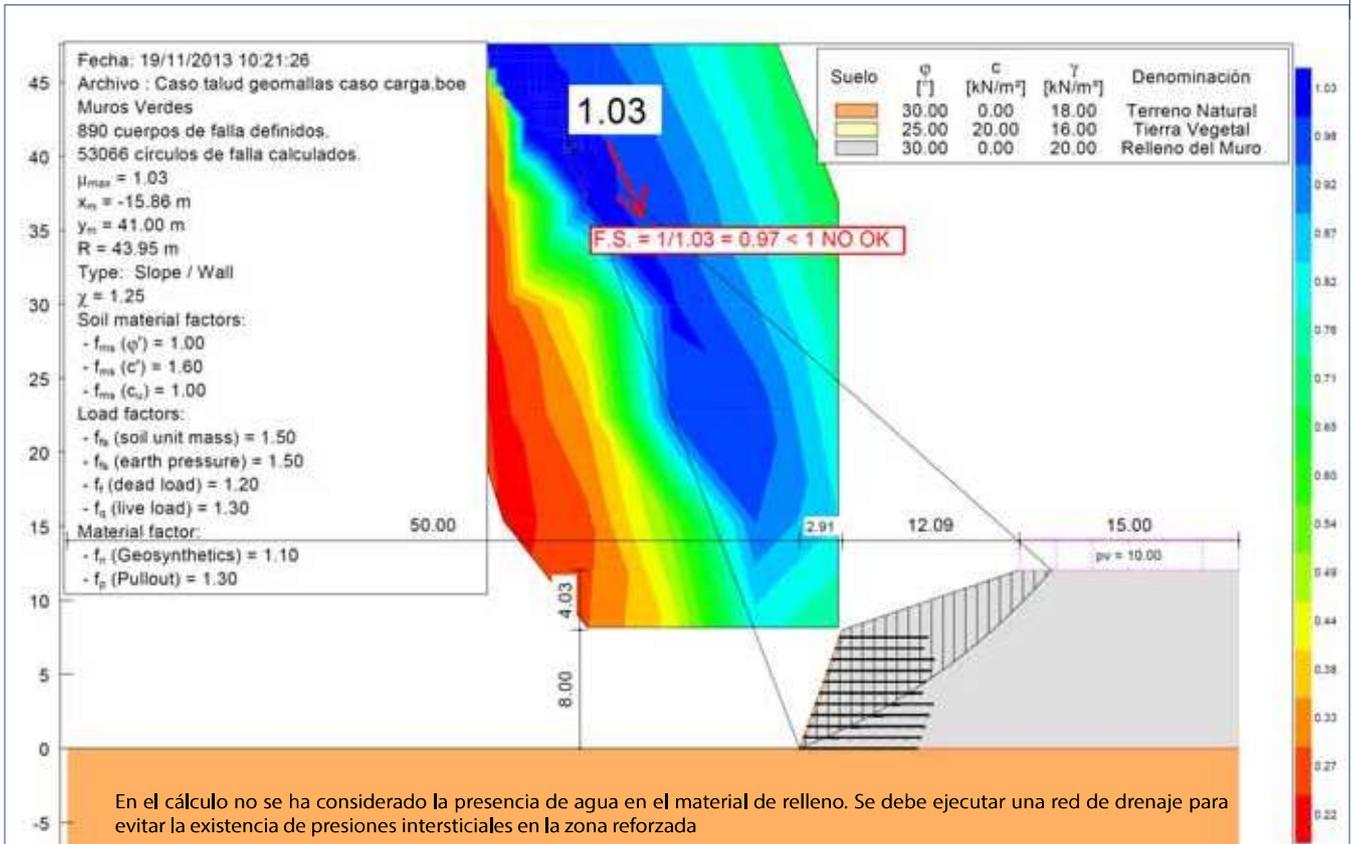


Figura 16. Cálculo del muro con el talud y esquema de geomallas de la solución anterior

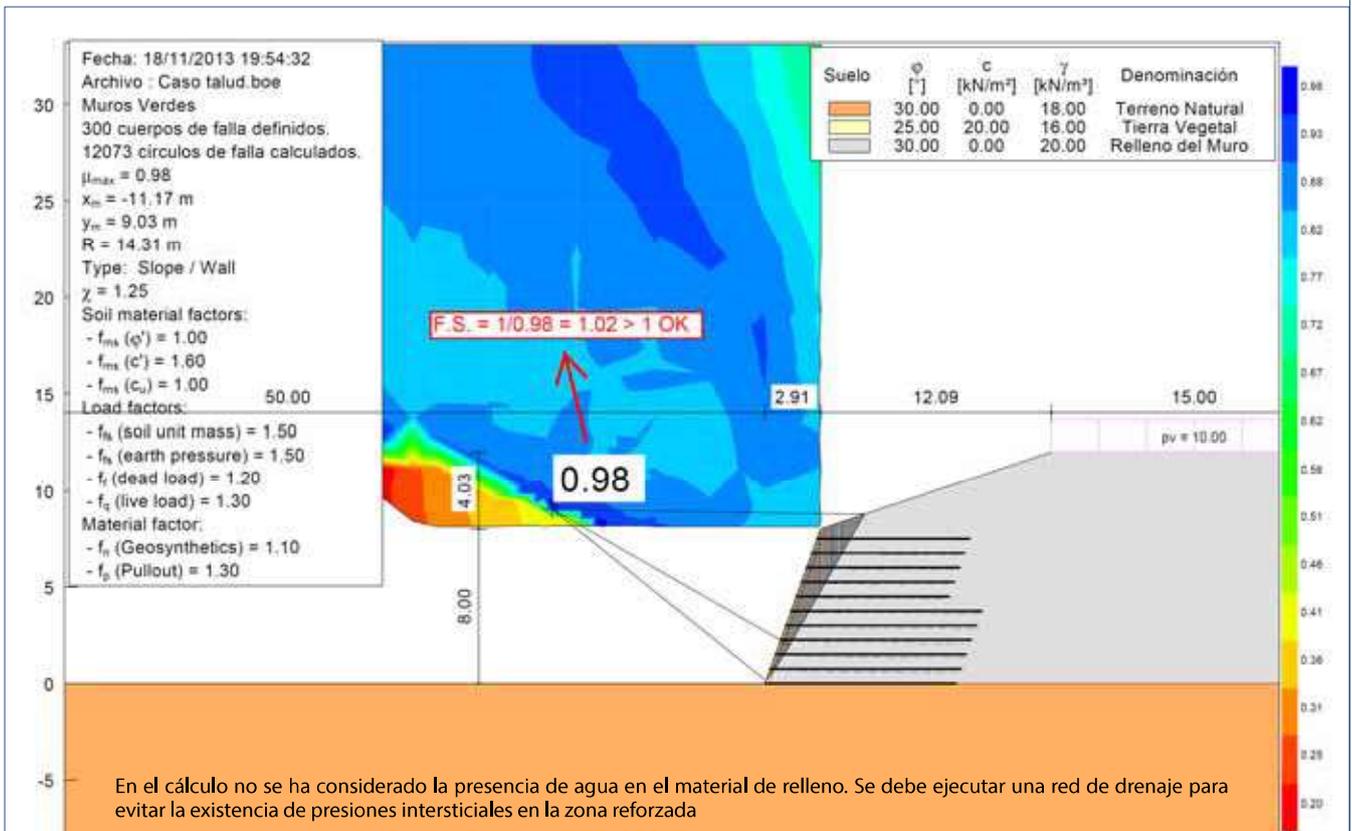


Figura 17. Cálculo de la estabilidad global del muro reforzado con el talud en coronación

Tabla 8. Características de los elementos de refuerzo tras el cálculo de la sección con talud en coronación

Tongadas	Longitud (m)	Tensión de diseño (kN/m)
1-6	10	68,2
7-9	8	36,4
10-11	8	25,0

El factor de seguridad a alcanzar para el círculo crítico de rotura en profundidad, basado en el método de Bishop, será establecido para el diseño final de la estructura de suelo reforzado con geosintéticos y será mayor cuanto mayor sea el factor parcial de deslizamiento (f_s) a través de la superficie del refuerzo.

2.4 Ejemplo de aplicación

Aprovechando el ejemplo de la normativa BS, intentaremos explicar otro error muy común en el diseño de los muros verdes: asemejar un talud en la coronación del muro verde a una carga vertical equivalente.

El método de cálculo utilizado para determinar los factores de seguridad de las diferentes estructuras será el método de Bishop.

Veamos que ocurre al calcular con una carga vertical equivalente al talud en coronación de muro definido en la Figura 14.

El resultado nos lleva a la colocación de geomallas de una determinada tensión de diseño y de una determinada longitud, como se puede ver en la Tabla 7.

Pero si para esa misma cantidad de geomalla de refuerzo, calculáramos correctamente con el talud en coronación, obtendríamos un coeficiente de seguridad de 1,15, que no sería aceptable por los ingenieros responsables. El cálculo correcto se muestra en la Figura 16.

Si se realizara un diseño correcto y finalmente se dispusieran las geomallas necesarias para obtener un factor de seguridad mayor que 1, considerando el talud en coronación y por lo tanto los empujes horizontales que genera sobre el muro, se obtendría el resultado de la Figura 17.

En este caso, el coste del material de refuerzo, frente al diseño obtenido para la sección con la carga vertical equivalente al talud, generaría un incremento en el coste de geomallas de un 25%, pero con un coeficiente de seguridad válido si se quisiera estar bajo las especificaciones de la normativa de cálculo de este tipo de muros.

Como se ha podido comprobar, es muy importante el estudio correcto de la sección real, ya que si se estudian secciones equivalentes se puede estar falseando la solución y obtener refuerzos del lado de la inseguridad. Esta conclusión es válida también para cualquier otra tipología de muros.

3. Conclusiones

Las principales ideas que aquellos técnicos que en el ejercicio de su trabajo tengan que proponer y adoptar soluciones técnicas como las que aquí se describen son:

- Si se ignora alguna de las posibles superficies de deslizamiento (estudio de estabilidad interna, externa y compuesta) el diseño de estabilidad del muro o talud no será correcto y el riesgo de que se produzcan daños será mayor.
- Como complemento a los métodos de equilibrio límite se deben utilizar métodos que compatibilicen las deformaciones que experimentan los geosintéticos y el suelo; para poderlos formular, o bien hay que hacer simplificaciones y admitir una serie de hipótesis o bien hay que recurrir a la aplicación de métodos numéricos como el de los elementos finitos. La ventaja de este tipo de cálculos es que permiten determinar las deformaciones que van a experimentar los geosintéticos en las condiciones para las que han sido calculados, lo que permite un mejor control del comportamiento de la estructura de suelo reforzada eliminando posibles incertidumbres.
- Para la realización de un correcto diseño de un muro de cualquier tipología es necesario que los parámetros de partida estén correctamente definidos (geometría, cargas, materiales, etc.). Hay que tener en cuenta que el coste de una estructura de este tipo y su estabilidad posterior son el resultado de una correcta definición de estos parámetros.
- En el diseño de cualquier aplicación que se requiera el uso de geosintéticos es de vital importancia el conocimiento de todos los coeficientes de minoración, para poder así determinar la tensión de diseño a utilizar por el calculista.

Como conclusión, ante la escasa información específica publicada al respecto y tras haberse realizado bastantes actuaciones de este tipo en nuestra geografía, este artículo pretende realizar una labor didáctica y sistemática del diseño de este tipo de estructuras reforzadas.

5. Bibliografía

- [1] British Standard Institution (BSI). BS 8006 Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. London, 1995.
- [2] Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 4084 Subsoil – Calculation of embankment failure and overall stability of retaining structures. Berlin, 1981
- [3] Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN 1054 Ground – Verification of the safety of earthworks and foundations.
- [4] GGU – Stability V. 6. 16. GGU, Braunschweig resp. Civil Serve GmbH, Vechta. Germany (HYPERLINK“http://www.ggu-software.com” www.ggu-software.com) 2001.
- [5] Ministerio de Fomento. Dirección de carreteras. Manual para el proyecto y ejecución de estructuras de suelo reforzado. Serie normativas, 1998.
- [6] Ministerio de Fomento. Guía de cimentaciones en obras de carretera. Madrid, 2003. ❖