

Geotextil de alta resistencia usado para terraplenes reforzados puenteando cavidades sobre la línea férrea de alta velocidad cerca de Sarrebourg (Francia)

ALAIN NANCEY (*) y LAURENT EXBRAYAT (**)

RESUMEN Los materiales geosintéticos han demostrado su efectividad para reforzar la base de terraplenes construidos sobre áreas propensas a la formación de cavidades en la cimentación. Numerosos programas de investigación y la experiencia adquirida en proyectos reales, en particular bajo líneas ferroviarias, han dado lugar a métodos de cálculo verificados y optimizados. Como resultado de esta experiencia, el empleo de refuerzos geosintéticos para contrarrestar la subsidencia del suelo en varios tramos de los nuevos enlaces ferroviarios de alta velocidad que atraviesan diversos países de Europa, parecieron ser la mejor respuesta. Esta solución tiene un coste bajo en comparación con la inyección o el colapso. Además, entra dentro de la lógica del desarrollo sostenible, porque no tiene efecto sobre el movimiento de las aguas subterráneas, a diferencia de las soluciones tradicionales. Este artículo detalla el procedimiento de cálculo siguiendo el enfoque del Eurocódigo 7 y describe la colocación del geosintético de alta resistencia usado en este tramo ferroviario.

HIGH-STRENGTH GEOTEXTILE USED TO REINFORCED EMBANKMENTS SPANNING VOIDS ABOVE THE HIGH-SPEED RAILWAY LINE NEAR SARREBOURG (FRANCE)

ABSTRACT *Geosynthetics have proved their effectiveness in reinforcing the base of embankments constructed over areas prone to foundation void formation. Numerous research programmes and the experience gained on real projects, particularly under railway lines, have led to verified and optimised design methods. As a result of this experience, the use of geosynthetic reinforcement to counteract soil subsidence on several sections of the new high-speed railways links crossing several countries in Europe appeared as the best answer. This solution is low in cost compared with injection or collapse. Moreover, it falls under logic of sustainable development because it has no effect on subsoil water movement, in contrast to traditional solutions. This paper details the design procedure following the Eurocode 7 approach and describes the installation of the high-strength geosynthetic used for this railway section.*

Palabras clave: Geotextil de alta resistencia, Tren de alta velocidad, Eurocódigo 7.

Keywords: High-strength geotextile, TGV, Eurocode 7.

1. INTRODUCCIÓN

Con arreglo al plan ferroviario europeo, la conexión de alta velocidad París / Bratislava / Budapest, conocida como “Magistrale for Europe”, después de su terminación en 2016, constituirá un corredor ferroviario de 1.500 km de largo, de gran importancia (Figura 1).

En Francia, la primera fase de la LAV Oriente Europeo, parte de esta línea principal, fue inaugurada el 15 de marzo de 2007 y abierta al tráfico comercial el 10 de junio de 2007.

El segundo tramo, con una longitud de 106 km, en el que se empezó a trabajar en el verano de 2010, ha de estar finalizado a principios de 2016.

En 2011, en el tramo 42 cerca de Sarrebourg y Phalsbourg, se observó subsidencia del suelo durante los trabajos preliminares bajo la futura línea férrea. En superficie se midieron socavones de 3 m donde se había de construir un terraplén de altura variable hasta 10 m.

Se ideó una solución rápida y fiable utilizando un refuerzo geosintético para evitar el retraso en la construcción de la línea. El refuerzo geosintético está destinado a actuar como puente a través del socavón de cimentación y así soportar el peso del terraplén si se produce subsidencia.

(*) TenCate Geosynthetics Francia. E-mail: a.nancey@tencate.com

(**) Dywidag Systems International.



FIGURA 1. Magistrale for Europe.
<http://www.vigilancetgv.eu>

2. DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA

2.1. EMPLAZAMIENTO DE LA OBRA

La obra de construcción resaltó las zonas descomprimidas en el valle de Busch bajo la futura línea férrea a la derecha de los terraplenes 506A del tramo G en la LAV europea parte 42.

El terraplén 506A está ubicado en la comunidad de Old Lixheim (departamento de Mosela en el este de Francia), entre los km 357,480 y 359,240 del tramo.

2.2. ENTORNO GEOLÓGICO

El perfil geológico del tramo pertinente estaba compuesto por tres capas (de arriba abajo):

- Una capa de limo de poco espesor.
- Margas multicolores de “Muschelkalk”.
- Zona dolomítica superior.

En la parte occidental del emplazamiento, las margas multicolores se encuentran bajo capas grises de margas sobreconsolidadas conteniendo yeso. Los limos son sueltos y compresibles. Localmente son sustituidos por aluviones limoarcillosos compresibles sueltos.

2.3. INVESTIGACIONES DEL SUELO

De acuerdo con el estudio realizado, las margas multicolores son principalmente arcillosas y contienen yeso en dos formas diferentes:

- Como cristales y/o lentejones de yeso sacaroideo distribuidos al azar entre las margas.
- En bancales gruesos (yeso sacaroideo), principalmente en la interfase entre las margas multicolores y la zona dolomítica superior.

Los resultados de los ensayos destructivos complementarios, mostraron que este yeso era propenso a disolverse, como se muestra por las zonas descomprimidas (pérdida de sustancia por disolución), por socavones completos, y/o por cavidades quebradas parcialmente rellenas.

Las anomalías encontradas en el estudio se dividieron en dos grupos. El primer grupo compuesto por socavones vacíos resultantes de la disolución total de la masa de yeso. Estas cavidades, resaltadas principalmente en los suelos selenitosos ubicados en la base de las margas, a una profundidad alrededor de 10 m, representan un riesgo importante para la LAV. El arqueamiento desarrollado previamente podría quebrarse (debido a un aumento del tamaño del socavón por disolución, por ejemplo), o ser insuficiente para soportar la carga adicional del terraplén. Hay

riesgo de que el techo de una cavidad también pueda colapsar, dando lugar a un incremento de la subsidencia hasta la subbase ferroviaria. La Figura 2 muestra un socavón típico que apareció en la superficie durante el trabajo en la plataforma.

El segundo tipo de zonas descomprimidas anómalamente afectadas (disolución parcial de lentejones de yeso o descompresión por incremento de la subsidencia). Estas zonas muestran características mecánicas medibles, pero muy altas velocidades de avance de la herramienta. Las zonas descomprimidas son mucho más problemáticas que los socavones porque es muy difícil predecir su comportamiento por lo que respecta a su evolución a lo largo del tiempo.

2.4. SOLUCIONES PROPUESTAS

Se seleccionaron varias opciones dependiendo de la zona y del tipo de anomalías: En las zonas con elevada concentración de cavidades, se planificó rellenar los huecos por inyección después de la construcción del terraplén.

Se decidió incrementar los niveles de instrumentación para estudiar el comportamiento de los suelos descomprimidos en una zona de ensayo provista con y sin refuerzo geosintético.

Fuera de las zonas que están sometidas a relleno sistemático, la instalación de refuerzo geosintético en la base del terraplén se decidió dentro de una capa de material dilatador. De hecho, si en estos sectores se identificaron algunos huecos, hubieron de ser rellenados antes de la instalación del geosintético.

2.5. ESTRUCTURA REFORZADA CON GEOSINTÉTICO

Este refuerzo geosintético se colocará en una capa granular bien compactada con un elevado ángulo de rozamiento ($\varphi' > 43^\circ$). El espesor de la capa de relleno no será inferior a 1 m. Esta capa reforzada, destinada a reducir el riesgo de deformación, está diseñada como “amortiguador” a nivel de la subbase de la vía. Su función es reducir y uniformar los asentamientos y deformaciones en caso de que aparezca un socavón.

2.6. PARÁMETROS DE CÁLCULO DEL GEOSINTÉTICO

Un socavón circular con un diámetro de 3 m se consideró como representativo de la subsidencia que podría aparecer en la superficie.

Las características principales del terraplén usado en el cálculo son las siguientes:

- Altura 4 m y 10 m.
- Carga de tráfico ferroviario 30 kPa.
- Material de relleno – capa granular de material dilatador en la base (espesor mínimo: 0,5 m bajo el geosintético y 0,5 m sobre el geosintético) – d/D de los materiales = 0/300 o 0/150 – bien compactado.



FIGURA 2. Socavón que apareció durante el movimiento de tierras.

3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL GEOSINTÉTICO

3.1. GENERAL

El cálculo siguió la filosofía del Eurocódigo 7, considerando el Estado Límite Último y el Estado Límite de Servicio para la estructura y el geosintético.

En el Estado Límite Último (ELU), se proporcionaron justificaciones usando el enfoque de cálculo 2, con factores parciales (Tabla 1), como se define en el anexo nacional francés [NF EN 1997-1 /NA].

3.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN EN EL REFUERZO GEOSINTÉTICO

El cálculo de la resistencia a la tracción se realiza usando la carga vertical σ_{vd} con el valor de la deformación del geosintético ϵ y el supuesto de una deformación parabólica.

$$T_d = \frac{\sigma_{vd} \cdot D}{2} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{6 \cdot \epsilon}} \quad (1)$$

Siguiendo los resultados del proyecto RAFAEL, Blivet (2001), se supone que la carga sobre el geosintético resulta de

Combinación		Símbolo	Enfoque de cálculo 2 A1+M1+R2
Acción			A1
Permanente	Desfavorable	γ_G	1,35
	Favorable	γ_G	1
Temporal	Desfavorable	γ_Q	1,5
	Favorable	γ_Q	0
Parámetros del suelo			M1
Ángulo de rozamiento efectivo		γ_φ	1
Cohesión efectiva		γ_c	1
Resistencia al corte sin drenaje		γ_{cu}	1
Peso específico		γ_γ	1
Parámetro del geosintético			M1
Resistencia a la tracción		γ_{Mit}	1,25
Resistencia			R2
Rozamiento en la interfase		γ_{Rif}	1,35

TABLA 1. Factores parciales de acuerdo con el Eurocódigo 7.

un colapso cilíndrico de la capa de relleno (Figura 3). El cuerpo granular está sometido a tensiones cortantes laterales en el borde del cilindro. Para socavones circulares en el Estado Límite Último, la tensión vertical sobre el geosintético encima de la cavidad se expresa como sigue:

$$\sigma_{vd} = \left[\frac{D \cdot \gamma - 4 \cdot c'_k}{4K \tan \varphi'_k} \right] \cdot \left[1 - e^{-\left(4K \frac{H}{D} \tan \varphi'_k\right)} \right] + \gamma_G \cdot p \cdot e^{-\left(4K \frac{H}{D} \tan \varphi'_k\right)} + \gamma_Q \cdot q \cdot e^{-\left(4K \frac{H}{D} \tan \varphi'_k\right)} \quad (2)$$

3.3. ASENTAMIENTOS Y DEFORMACIÓN

Se pueden considerar diferentes modelos de deformación cuando se calcula la rigidez del geosintético necesaria para limitar la extensión del asentamiento de la superficie. Están ligados al modelo de cálculo de carga vertical. Aquí se hizo el cálculo con el método RAFAEL que supone un fallo cilíndrico en los lados del socavón y una descompactación del suelo. El asentamiento máximo del refuerzo geosintético es función del asentamiento permisible en la superficie.

$$d_{g,max} = d_{s,max} + 2.H (Ce-1) \quad (3)$$

en la que H es la altura del terraplén y Ce el coeficiente de expansión.

Suponiendo que la deformación del geosintético tiene forma parabólica, la máxima deformación permisible del refuerzo se calcula como sigue:

$$\epsilon_{max} = \frac{8 \left(\frac{d_{g,max}}{D} \right)^2}{3} \quad (4)$$

La exigencia para este proyecto se dio en términos de velocidad de deformación bajo la capa de balasto para el corto y el largo plazo. El asentamiento máximo permisible para la vía férrea será 1 cm después de 1 año y 10 cm tras 100 años.

Con un coeficiente de expansión Ce = 5%, el cálculo conduce a un valor de tensión a largo plazo máximo del 7,4% para el terraplén de 4 m de altura. Considerando el factor de seguridad, la carga en el geosintético está limitada al 44% de esta resistencia a la tracción a corto plazo. A este nivel de carga, la deformación máxima es igual al 5,3% e inferior al 7,4%, que corresponde al criterio de flexión en la superficie (1 cm). En ese caso, el Estado límite de servicio no es decisivo para el cálculo del geosintético.

Con un criterio más severo, que consiste en falta de asentamiento en la superficie del terraplén de 4 m de altura, la deformación máxima se reduce al 4,7%. Por consiguiente, ello demuestra que una pequeña variación de un parámetro necesita comprobar más profundamente el Estado Límite de Servicio.

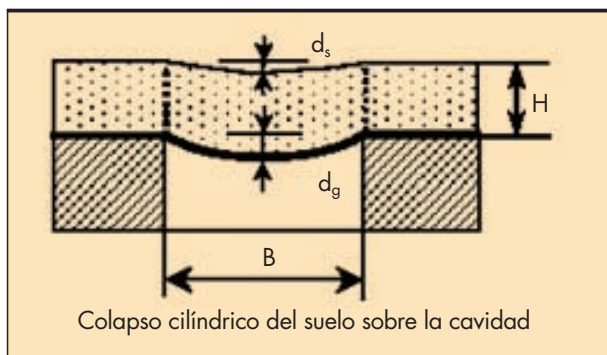


FIGURA 3. Descompactación del suelo – Blivet 2001.

Las curvas isócronas (Figura 4) se utilizan para calcular el nivel de resistencia del geosintético a la deformación máxima del 4,7% y para cumplir el requisito a largo plazo anterior.

Considerando el Estado Límite Último y de Servicio y los factores parciales relacionados, se escogió para reforzar la estructura en todos los casos un geotextil hecho de fibras de poliéster de alto módulo, montadas para formar un geotextil tejido estructurado y estable, adecuado para el refuerzo del suelo a corto y a largo plazo.

Se puede ver que el Estado Límite Último rige la elección del geosintético para el terraplén más alto, y el Estado Límite de Servicio se hace más importante para el espesor menor. Esto está de acuerdo con Lawson (2011) que sugiere que el efecto de formación de arco empieza cuando la altura relativa del terraplén al diámetro del hueco es superior a 1,5. Esta relación aplicada a un diámetro de cavidad de 3 m da una altura crítica de 4,5 m.

3.4. RESISTENCIA DEL GEOSINTÉTICO

En el Estado Límite Último (ELU), y como se define en la norma francesa [NF G 38064], se aplicaron factores de reducción sobre la resistencia a corto plazo del geosintético medida de acuerdo con EN ISO 10319.

$$T_{STTS} > T_d \cdot \gamma_{M,t} \cdot \gamma_{flu} \cdot \gamma_{inst} \cdot \gamma_{viel} \quad (5)$$

En la que:

- $\gamma_{M,t}$ factor de seguridad para el material
- γ_{flu} factor de reducción para la fluencia
- γ_{inst} factor de reducción para el daño a la instalación
- γ_{viel} factor de reducción para la durabilidad química

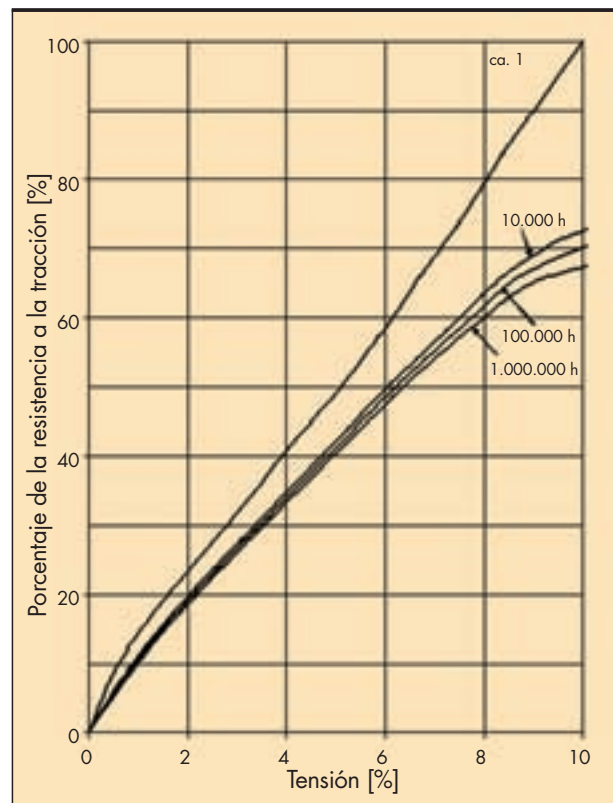


FIGURA 4. Curvas isócronas del geosintético.

4. COLOCACIÓN DEL GEOSINTÉTICO

4.1. GENERAL

Los geosintéticos se desenrollaron en la dirección del terraplén de acuerdo con el cálculo, que requería un refuerzo uniaxial (Figura 5) con un pequeño solape longitudinal.

Villard (2000) ha mostrado que el refuerzo uniaxial es más eficiente que el refuerzo en dos direcciones. Además, también es beneficioso para la instalación, ya que limita el número de rollos a colocar.

La opción de un refuerzo biaxial sigue siendo interesante para huecos largos cuya orientación es desconocida con dos posibles soluciones: dos capas cruzadas para huecos anchos o un producto biaxial para huecos pequeños. Esta fue la solución elegida para otra parte del tramo 32 de la línea LGV en la que se instaló un geocompuesto (75 kN/m en ambas direcciones como carga de rotura) para reforzar la estructura contra pequeñas cavidades (20 - 50 cm) provocadas por fracturas en el suelo calizo, como fue comunicado por Exbrayat en 2006.

4.2. PRECAUCIÓN RESPECTO A LOS DAÑOS EN LA INSTALACIÓN

Para evitar los daños al geosintético debidos al material de relleno agresivo 0/300 mm, se colocó una primera capa de 50 cm de material drenante más fino (0/20 mm) sobre el refuerzo, antes del material grueso 0/300 mm. Después de compactar esta capa inferior, se excavó una zanja para permitir la inspección visual del geosintético (Figura 6)



FIGURA 5. Colocación del geotextil.



FIGURA 6. Excavación de la zanja para comprobar los daños por la colocación al geosintético.



FIGURA 7. Detalle del solape del geosintético en la zanja excavada.

No fueron visibles señales de deterioro (Figura 7) y se estimó que el factor de reducción para los daños por la colocación del geosintético era adecuado y no requería investigación adicional.

5. CONCLUSIÓN

El uso de refuerzos geosintéticos para controlar subsidencias y colapsos se ha convertido en una técnica común que también se puede aplicar a movimientos de tierras bajo estructuras sensibles como líneas ferroviarias de alta velocidad, incluso para cavidades relativamente anchas (terraplén de 4 a 10 m de altura sobre huecos de 3 m de ancho). Un cálculo optimizado acorde con las normas del Eurocódigo y productos de muy alta resistencia hacen posible puentear cavidades relativamente grandes de forma segura a largo plazo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean dar las gracias a la Propiedad, RFF, a la consultora, Inexia Arcadis, y al contratista, Guintoli Valérian.

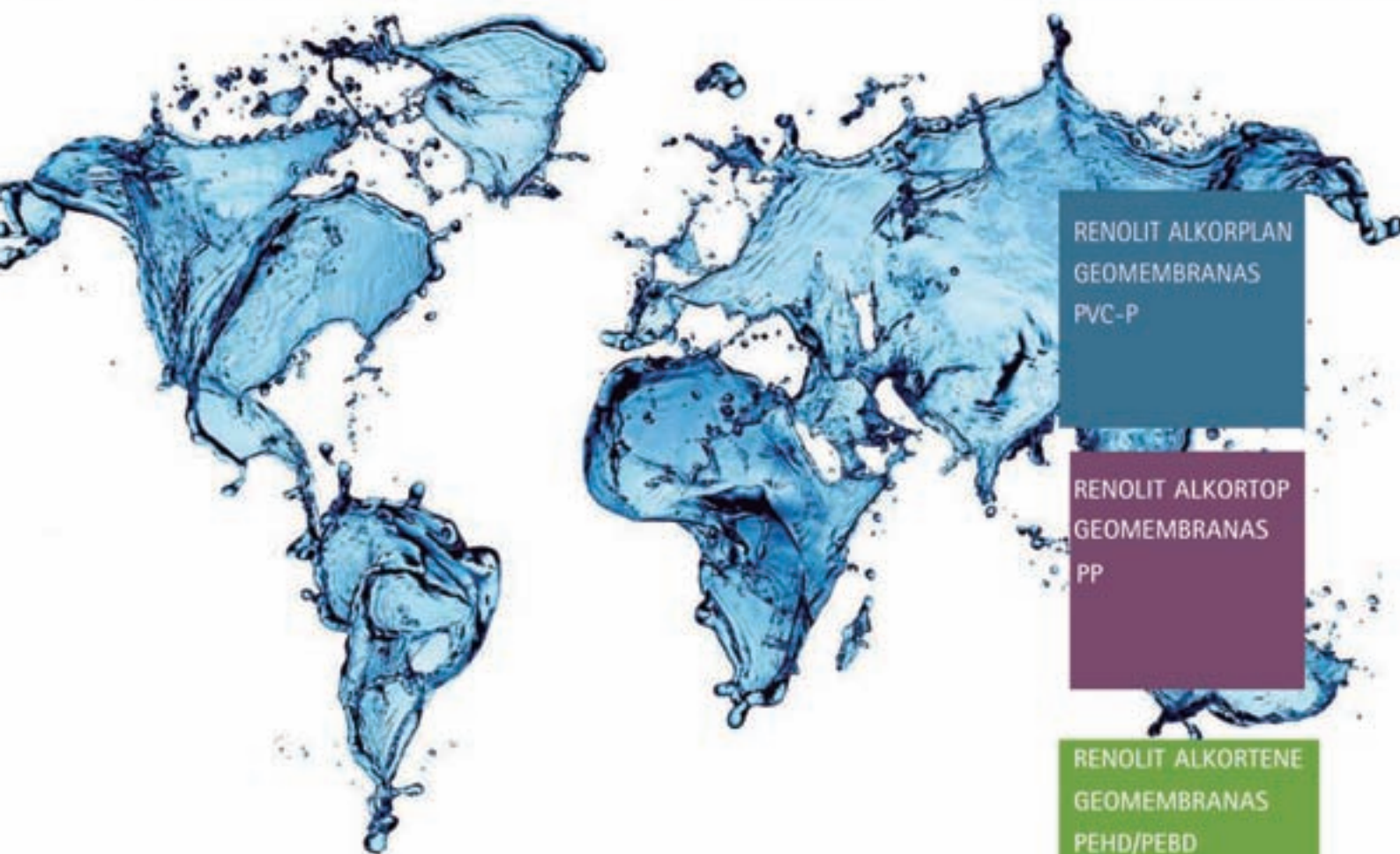
7. REFERENCIAS

- Blivet, J.C., Khay, M., Gourc, J.P. & Giraud, H. 2001: Design considerations of geosynthetic for reinforced embankments subjected to localized subsidence. Proceedings of the Geosynthetics' 2001 Conference, February 12-14, 2001, Portland, USA, pp. 741-754.
- BS8006-1: 2010. *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. British Standards Institution, ISBN 978-0-580-53842-1.
- Lawson, C.R. & Yee, T.W. 2011. Serviceability Limits for Basal Reinforced Embankments Spanning Voids. In Advances in Geotechnical Engineering Proceedings of the Geo?Frontiers 2011 Conference, Dallas 13-16 March 2011. ASCE.
- Exbrayat, L & Garcin, P 2006: LGV EST – Renforcement par géotextiles sur cavités. Proceeding of Rencontres Geosynthetics 2006 Montpellier France 12-14 June 2006. CFG.
- NF EN 1997-12005— Calcul géotechnique — Partie 1: Règles générales - Annexe Nationale à la NF EN 1997-1:2005. AFNOR.
- XP G 38-064 2010 Use of geotextiles and geotextiles-related products — Inclined walls and strengthened slopes in soils reinforced by geosynthetic sheets —Justification of dimensioning and design elements 2010-08 . AFNOR.
- Villard, P., Gourc, J.P. and Giraud, H. 2000. A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localised sinkholes. Canadian Geotechnical Journal. 37. pp 987-999. 2000.

RENOLIT ALKOPLAN



Rely on it.



RENOLIT ALKORPLAN
GEOMEMBRANAS
PVC-P

RENOLIT ALKORTOP
GEOMEMBRANAS
PP

RENOLIT ALKORTENE
GEOMEMBRANAS
PEHD/PEBD

<http://www.renolit.com/waterproofing-roofing/es/>

<http://www.renolit.com/waterproofing-civil-engineering/es/>

<http://www.renolit.com/waterproofing-swimmingpool/es/>

RENOLIT IBERICA S.A
Carretera del montnegre s/n 08470 Sant Celoni (Barcelona) Spain