

Recomendaciones para el diseño de rellenos estructurales de tierras frente a la acción del agua

Guidelines for the Design of Structural Embankments Against Water Action

Han participado:

Miguel Fe Marqués
Acciona Ingeniería

Manuel Rodríguez Sánchez
Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria.
Ministerio de Fomento

Rafael Budia Díaz
Ciesm - Intevia

Comité de Geotecnia Vial
Grupo de Trabajo de Agua en Terraplenes

Resumen

En este documento se proporcionan unas recomendaciones para el diseño de rellenos estructurales de tierras frente a la acción del agua. Son unas recomendaciones generales con carácter orientativo, cuya finalidad es servir de ayuda en las primeras fases del diseño de los rellenos. El diseño de los casos concretos, por supuesto, debe hacerse de forma particularizada. Los rellenos estructurales que requieren o pueden requerir un diseño frente a la acción del agua se clasifican en diferentes casos y sub-casos, en función de sus condiciones geométricas, hidrológicas y del terreno de apoyo. Se han clasificado las acciones del agua sobre los rellenos, las consecuencias de dichas acciones y las soluciones a aplicar en el diseño de los rellenos con el fin de evitar dichas acciones o reducirlas hasta niveles admisibles. Las soluciones se han clasificado y descrito de forma general, con indicación de los criterios más importantes a tener en cuenta en su diseño y, en algunos casos, de los valores límites recomendables. También se proporcionan algunas secciones tipo representativas.

Abstract

This document includes guidelines for the design of embankments against water action. They are general guidelines, to be used in the first stages of the embankment's design. Of course, the design of specific cases must be site specific. Embankments requiring consideration of water action in their design have been classified in "cases" and subcases" depending on their geometric, hydrologic and bearing ground conditions. Water actions over the embankments, their consequences and solutions that can be used in design in order to avoid the actions or reduce them to allowable levels, have been classified. The solutions have been described and classified and the most important criteria to be taken into account in the design and, in some cases, the recommended limit values, have been provided, as well as some representative cross-sections.

1. Introducción

En este artículo se proponen unas recomendaciones a emplear en el diseño de rellenos estructurales de tierras, con el fin de servir de ayuda para definir las acciones que pueden producirse por efecto del agua y, lo más importante, las medidas que deben tomarse para reducir el efecto a niveles aceptables. Ha sido elaborado por el Grupo de Trabajo de Agua en Terraplenes, del Comité de Geotecnia Vial de la Asociación Técnica de Carreteras.

Estas recomendaciones se estructuran de la siguiente manera:

- En primer lugar se establecen los diferentes tipos de rellenos estructurales que pueden requerir un diseño frente a la acción del agua, a los que se ha denominado “*casos*”.
- Para facilitar la asignación de cada relleno a un caso concreto, se proporcionan a título indicativo, los parámetros geométricos e hidrológicos representativos de cada caso. Para los frecuentes casos intermedios, es recomendable aplicar las recomendaciones para los dos casos posibles, y elegir lo aplicable al relleno mediante un análisis particularizado.
- Se clasifican las acciones del agua sobre los rellenos y se relacionan con los diferentes casos.
- Se propone un listado de soluciones o medidas a disponer en el diseño de rellenos.
 - o Se relacionan, mediante un cuadro, las soluciones con las acciones frente a las cuales son efectivas.
 - o Igualmente se relacionan, mediante un cuadro, las soluciones, con los casos en los que son aplicables.
 - o Las soluciones se definen de forma general con indicación de los criterios más importantes a tener en cuenta en su diseño y, en algunos casos, de los valores límites recomendables, y, proporcionando, cuando es posible, una sección-tipo esquemática.

Se han excluido de estas recomendaciones los tratamientos de aceleración de la consolidación o de refuerzo en rellenos apoyados sobre suelos blandos de espesor importante, como mechas drenantes, columnas de grava, pilotes de mortero, etc.

En todos los casos, en general, se trata de rellenos estructurales, o sea terraplenes, pedraplenes o rellenos con “todo uno”, debidamente compactados, según las prescripciones del Pliego PG-3 del Ministerio de Fomento.

Se trata, obviamente, de unas recomendaciones generales cuya finalidad es servir de ayuda en las primeras fases del diseño de rellenos, y que tienen solamente un carácter orientativo. El diseño de los casos concretos, por supuesto, debe hacerse de forma particularizada. Por otra parte, estas recomendaciones pueden presentar algunas dife-

rencias respecto de la normativa vigente en la Dirección General de Carreteras.

Las recomendaciones se completan con algunos ejemplos de aplicación y fotografías ilustrativas.

En los apartados siguientes, se ha denominado eje del relleno al eje de la obra lineal.

2. Consecuencias

Las consecuencias de la acción del agua sobre los rellenos pueden resumirse en lo siguiente:

- Inestabilidades:
 - o Deslizamientos del cuerpo del relleno. Pueden ir desde pequeñas roturas superficiales hasta deslizamientos de grandes dimensiones, con serios efectos sobre la funcionalidad del relleno y que requieren reparaciones de importancia, o su reconstrucción.
 - o Deslizamientos por la base. Suelen abarcar una gran masa del relleno, y afectan de forma muy importante a su funcionalidad; requieren reparaciones de importancia o la reconstrucción del relleno.
- Deformaciones:
 - o Sin pérdida de material.
 - *Deformaciones tensionales*: si son importantes (abultamiento en el pie, agrietamientos, etc.) suelen ser indicio de inestabilidades incipientes.
 - *Deformaciones de hinchamiento o colapso*: su magnitud condiciona su efecto sobre la funcionalidad del relleno y la importancia de las reparaciones requeridas: desde efectos menores hasta consecuencias graves, pero sin llegar en general a la ruina del relleno.
 - o Con pérdida de material
 - Erosiones superficiales. No suelen tener consecuencias graves, aunque requieren reparaciones y protecciones.
 - Socavación del pie del relleno. Pueden desestabilizar el pie, dando lugar a deslizamientos por la base.
 - Erosiones internas y disoluciones. En las primeras fases pueden producirse deformaciones moderadas; pero si el fenómeno progresa, se puede llegar a la ruina del relleno.

3. Definición de los casos de rellenos estructurales

Se propone la siguiente clasificación de los casos de rellenos estructurales de tierras que requieren un diseño frente a la acción del agua. Se trata de una clasificación necesariamente simplificadora que deja, por supuesto, numerosos casos intermedios, pero que puede ser útil para la gran mayoría de los casos:

Rutas Técnica

- Rellenos estructurales de obras lineales
 - o **RMA**: Rellenos a media ladera. Situación alta respecto a la vaguada.
 - o **RMB**: Rellenos a media ladera. Situación baja respecto a la vaguada (relleno encajando cauce).
 - o **RVA**: Rellenos que interceptan una vaguada. Vaguada abierta. Bajo gradiente hidráulico.
 - o **RVC**: Rellenos que interceptan una vaguada. Vaguada cerrada. Fuerte gradiente hidráulico.
 - o **RIB**: Rellenos en zonas inundables. Baja velocidad del agua.
 - o **RIA**: Rellenos en zonas inundables. Alta velocidad del agua. Ejemplo: relleno de acceso a estructuras sobre cursos de agua importantes.

- Rellenos estructurales superficiales

- o **RRV**: Rellenos extensos que rellenan vaguadas (polígonos industriales, urbanizaciones).

En la figura 1 se muestran croquis explicativos de cada uno de los casos. En las figuras 2 y 3 se muestran fotos de casos reales.

Para facilitar la asignación de cada relleno a un caso concreto, se proporcionan a título indicativo los parámetros geométricos e hidrológicos representativos de cada caso. Se han elegido los siguientes parámetros, clasificados según su rango de variación:

- **PT**: Pendiente del terreno en dirección transversal al eje del relleno:

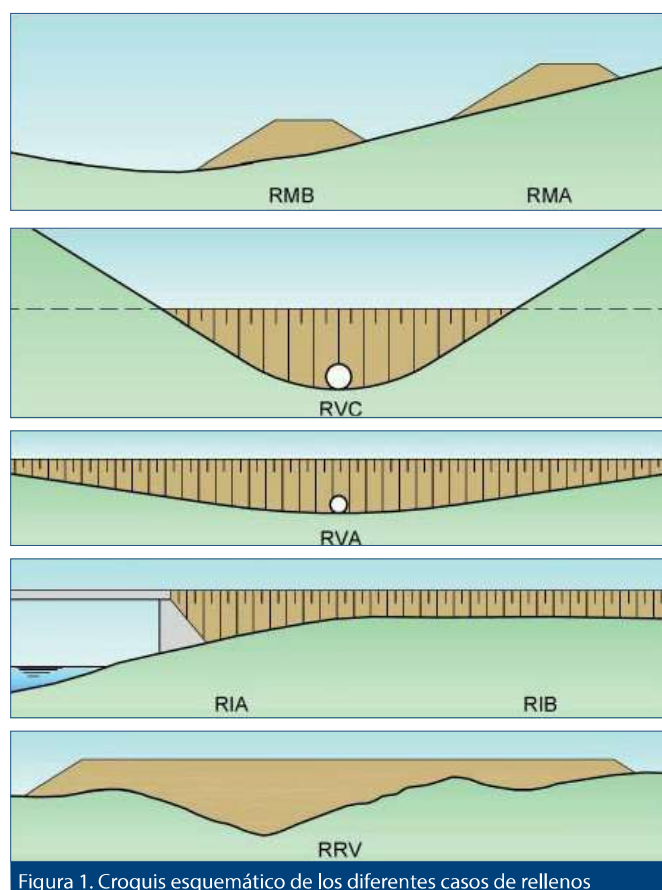


Figura 1. Croquis esquemático de los diferentes casos de rellenos



Figura 2. Ejemplo de caso RVA. Autovía A-2, p.k. 340



Figura 3. Ejemplo de caso RIB. Línea de Alta Velocidad Pozal - Villaverde. Puede apreciarse la protección de escollera en pie del relleno

- o Baja (**B**): 0 – 1 %
- o Media (**M**): 1 – 10 %
- o Alta (**A**): 10 – 20 %
- o Muy alta (**AA**): > 20 %
- **PL**: Pendiente del terreno en dirección longitudinal al eje del relleno:
 - o Baja (**B**): 0 – 1 %
 - o Media (**M**): 1 – 10 %
 - o Alta (**A**): 10 – 20 %
 - o Muy alta (**AA**): > 20 %
- **HA1**: Altura del agua respecto del pie del relleno (periodo de retorno de 500 años). Lado de aguas arriba.
 - o Nula (**N**): $\cong 0$
 - o Baja (**B**): < 0,3 m
 - o Media (**M**): 0,3 – 1,5 m
 - o Alta (**A**): > 1,5 m
- **HA2**: Altura del agua respecto del pie del relleno (periodo de retorno de 500 años). Lado de aguas abajo.
 - o Nula (**N**): $\cong 0$
 - o Baja (**B**): < 0,3 m
 - o Media (**M**): 0,3 – 1,5 m
 - o Alta (**A**): > 1,5 m

- **VA:** Velocidad del agua (500 años)
 - o Baja (**B**): < 1 m/s
 - o Media (**M**): 1 – 3 m/s
 - o Alta (**A**): > 3 m/s

Teniendo en cuenta que la clasificación de los rellenos es más cualitativa que cuantitativa, los valores numéricos proporcionados son meramente orientativos.

En la siguiente tabla se proporcionan, para cada caso de rellenos de obras lineales, los valores representativos típicos de cada uno de los parámetros (pendientes transversal y longitudinal, altura y velocidad del agua)

Tabla 1: Parámetros representativos de cada caso de relleno						
Rellenos de obras lineales		Parámetro geométrico o hidrológico				
		PT	PL	HA1	HA2	VA
Caso	RMA	A	B	B	N	M
	RMB	M-A	B	B	M-A	M-A
	RVA	B-M	B	M	M	B-M
	RVC	M-A	AA	M-A	B-M	M-A
	RIB	B	B	M	M	B
	RIA	B	M	M-A	M-A	M-A

Hay otro parámetro, que correspondería a las características del terreno de apoyo, que se clasifica del siguiente modo:

- **TA:** Terreno de apoyo
 - o Roca sana (**RS**)
 - o Roca blanda evolutiva (**RE**)
 - o Suelo permeable (**SP**)
 - o Suelo impermeable (**SI**)

Cada una de las 4 opciones puede darse en cada uno de los casos: por lo que para cada caso hay 4 subcasos, en función del tipo de terreno de apoyo.

4. Clasificación de las acciones debidas al agua

Se propone la siguiente clasificación de las acciones del agua sobre los rellenos:

- **I:** Acción directa del agua circulando sobre la superficie (**R** y **TA**).
 - o **Ia:** Erosiones y acarcavamientos superficiales (**R**).
 - o **Ib:** Socavación en pie (**R** y **TA**).
- **II:** Incremento de humedad hasta saturación (**R** y **TA**).
 - o **IIa:** Cambios de volumen
 - **IIa1:** Hinchamiento
 - **IIa2:** Colapso
 - o **IIb:** Pérdida de resistencia al corte del suelo
 - **IIb1:** Por pérdida de cohesión higroscópica
 - **IIb2:** Por incremento de presiones intersticiales
 - **IIb3:** Por alteración
- **III:** Migración de material por filtraciones a través del relleno o cimiento (**R** y **TA**).
 - o **IIIa:** Erosiones internas
 - o **IIIb:** Disoluciones

- **IV:** Empuje del agua sobre el relleno si este actúa como represa (**R**).

Nota: **R** indica que la acción actúa sobre el relleno; y **TA** que actúa sobre el terreno de apoyo.

5. Relación entre casos y acciones

Se adjuntan dos tablas que relacionan los distintos casos de rellenos estructurales de tierras con las acciones del agua que pueden actuar sobre ellos. Una tabla corresponde a acciones sobre el relleno, y la otra a acciones sobre el terreno de apoyo. En esta última tabla, cada caso se ha subdividido en función del tipo de terreno de apoyo (apartado 3).

Respecto a las acciones, se consideran tres opciones:

0: no actúa, o acción despreciable.

1: acción media (plazo en que actúa, consecuencias y medidas requeridas, de nivel medio).

2: acción fuerte o intensa.

Tabla 2: Acciones del agua sobre el material del relleno						
Acciones del agua sobre el relleno (R)		Tipo de acción				
		Ia	Ib	II	III	IV
Caso	RMA	1	0	1	2	1
	RMB	1	2	2	1	1
	RVA	1	1	1	1	1
	RVC	1	2	2	2	2
	RIB	1	1	1	1	1
	RIA	1	2	2	2	2
	RRV	1	2	2	2	0

Tabla 3: Acciones del agua sobre el terreno de apoyo					
Acciones del agua sobre el terreno de apoyo (TA)		Tipo de acción			
Tipo de TA		Caso	Ib	II	III
Roca sana (RS)		Todos	0	0	0
Roca evolutiva (RE)	RMA	0	1	1	1
	RMB	1	1	1	1
	RVA	0	1	1	1
	RVC	1	1	1	1
	RIB	0	1	1	1
	RIA	0	1	1	1
	RRV	0	1	1	1
Suelo permeable (SP) y suelo impermeable (SI)	RMA	0	2	2	2
	RMB	2	2	2	2
	RVA	1	2	2	2
	RVC	2	2	2	2
	RIB	1	2	2	2
	RIA	2	2	2	2
	RRV	2	2	2	2

Rutas Técnica

Las tablas 2 y 3 indican la situación que suele darse habitualmente, sin que pueda descartarse que un relleno concreto se vea afectado por acciones distintas de las indicadas, o de mayor intensidad. Los casos concretos, por supuesto, deben estudiarse de forma particularizada.

Pueden verse algunos ejemplos ilustrativos de acciones y consecuencias en las figuras 4 y 5.



Figura 4. Humedades en pie de relleno con pequeñas roturas incipientes. Canal de Navarra



Figura 5. Rotura de un relleno por superación de la capacidad de drenaje transversal. FFCC Alcázar de San Juan – Sevilla, p.k. 150 (Paniagua, I., 2011)

6. Soluciones frente a la acción del agua

Se propone el siguiente listado de soluciones o medidas a incluir en el diseño de rellenos estructurales de tierras susceptibles de sufrir la acción del agua.

Se trata exclusivamente de medidas dispuestas en el propio relleno. No se incluyen las obras de drenaje transversal, dado que se parte de la base de un adecuado di-

seño y construcción de las mismas, al igual que en lo que respecta a las medidas locales de impermeabilización, drenaje, filtro, protección, revestimiento, etc. a disponer en muros, obras de fábrica y obras de drenaje.

A. Zonificación del relleno. Geometría y características exigidas a los materiales en las diferentes zonas del relleno.

A1. Pie o tacón drenante: Consiste en reforzar el pie del relleno (zona en la que se concentran las filtraciones de agua, y por la que tienen salida las posibles superficies de deslizamiento) con un material con una doble función drenante y resistente. En caso necesario, también aportaría resistencia al arrastre y la socavación. Generalmente se realizan con escollera o pedraplén, por sus mejores características desde los tres puntos de vista (función drenante y resistente, y resistencia al arrastre).

A11. Escollera.

- Es el material que aporta la mayor resistencia al corte y a la socavación.
- Permite un talud 1H/1V en el tacón.
- Es recomendable que cumpla las condiciones exigidas en el artículo 658 del PG-3.
- Si el tacón va a estar en condiciones de posible socavación, debe cumplir lo siguiente:
 - o El tamaño de la escollera viene condicionado por la resistencia al arrastre. Existen diversas formulaciones y ábacos que permiten obtener el tamaño requerido en función de la velocidad del agua, algunas de las cuales pueden verse en las referencias (2) y (3).
 - o En general no es necesario que toda la escollera cumpla esta limitación, siendo suficiente con un cierto porcentaje (por ejemplo, el 60 %), cumpliendo el resto las condiciones granulométricas del citado artículo 658 del PG3.
 - o El tacón debe profundizar al menos hasta el nivel de erosión general del lecho (ver referencia 3). Si eso no es posible, existe la alternativa de una protección por delante del pie (solución A3, figura 8).
 - o Como velocidad del agua de diseño, se recomienda en general al menos la correspondiente a la avenida de periodo de retorno de 500 años.
- En el contacto entre el tacón de escollera y el material del relleno y el terreno de apoyo ha de disponerse un filtro que evite la migración de material más fino hacia la escollera. En general es suficiente con un

filtro geotextil (artículo 422 del PG3). Puede disponerse igualmente una capa de suelo granular.

A12. Pedraplén

- Aporta una elevada resistencia al corte y a la socavación, aunque menores que la escollera
- Permite un talud en el tacón más fuerte que en el resto del relleno (por ejemplo, 4H/3V ó 3H/2V)
- Es recomendable que cumpla las condiciones exigidas en el artículo 331 del PG3.
- Si el tacón va a estar en condiciones de posible socavación es aplicable lo indicado para la escollera (A11): un porcentaje del material (por ejemplo, el 60 %) ha de sobrepasar el tamaño requerido frente al arrastre, y el tacón debe profundizar al menos hasta el nivel de erosión general del lecho.
- Ha de estudiarse la necesidad de un material filtro en el contacto entre el tacón de pedraplén y el material del relleno o el terreno de apoyo, que evite la migración de material más fino hacia el pedraplén, en función de la granulometría del pedraplén, del relleno y del terreno de apoyo. Al igual que se ha indicado para el tacón de escollera, en general es suficiente con un filtro geotextil (artículo 422 del PG3). Puede disponerse igualmente una capa de suelo granular.

A13. Suelo granular

- Cuando no se requiere resistencia a la socavación en el pie del relleno, ni una muy elevada resistencia al corte, puede realizarse el tacón con un suelo granular.
- Es recomendable que cumpla al menos las condiciones de suelo seleccionado del artículo 330 del PG3.

A2. Cimiento de relleno drenante (parte inferior del relleno, sobre el terreno de apoyo).

- Si la parte inferior del relleno puede sufrir inundación (esto es, si la máxima altura del agua queda por encima de la cota de la base del relleno) se requiere en esa zona un material de características drenantes y cuyas propiedades no se vean afectadas por la acción del agua.
- El cimiento drenante debe disponerse hasta una cierta altura (por ejemplo, 0,5 m) sobre la máxima altura de agua. Se recomienda considerar en general al menos la altura correspondiente a la avenida de periodo de retorno de 500 años.

- En general no es aconsejable un material excesivamente permeable, dado que no es deseable que el agua circule a través del relleno en lugar de por las obras de drenaje transversal. Por ello se recomienda una granulometría hasta cierto punto continua, sin grandes huecos, por lo que no es, en principio, recomendable el empleo de escollera de piedras sueltas, salvo que existan otras razones que lo aconsejen. Los materiales recomendables son los siguientes:

A21. Pedraplén

- Es recomendable que cumpla las condiciones exigidas en el artículo 331 del PG3.
- Si existen condiciones de posible socavación, la parte exterior del cimiento del relleno debe cumplir lo indicado para A11 y A12: un porcentaje del material (por ejemplo, el 60 %) ha de sobrepasar el tamaño requerido frente al arrastre. Por cuestiones constructivas es recomendable para esta zona exterior un espesor en horizontal de al menos 2 – 3 m.
- Ha de estudiarse la necesidad de un material filtro en el contacto entre el cimiento del pedraplén y el material del relleno o el terreno de apoyo, que evite la migración de material más fino hacia el pedraplén, en función de la granulometría del pedraplén, del relleno y del terreno de apoyo. Al igual que se ha indicado para el tacón de escollera, en general es suficiente con un filtro geotextil (artículo 422 del PG3). Puede disponerse igualmente una capa de suelo granular.

A22. Suelo granular

- Es recomendable que cumpla al menos las condiciones de suelo seleccionado del artículo 330 del PG3.
- Para proteger el suelo de la acción directa del agua, ha de disponerse una protección exterior. Se proponen dos opciones:
 - o Un recubrimiento de escollera (A3), con un filtro interpuesto entre el suelo granular y la escollera (ver A3).
 - o Un espaldón de pedraplén (A41).
 - o En ambos casos, un porcentaje del material (por ejemplo, el 60 %) ha de sobrepasar el tamaño requerido frente al arrastre del agua.

- o Si se prevé el contacto con el agua con cierta frecuencia, se recomienda la disposición de esta protección exterior incluso en el caso de velocidad prevista muy baja del agua, o incluso nula, aunque en este caso no se requiere una condición de tamaño mínimo frente al arrastre.
- o La protección debe disponerse hasta una cierta altura (por ejemplo, 0,5 m) sobre la máxima altura de agua (periodo de retorno de al menos 500 años).

A3. Recubrimiento o protección de escollera. En las zonas de la superficie del relleno susceptibles de estar en contacto con el agua en movimiento, se requiere un recubrimiento resistente al arrastre y la socavación, si el propio material del relleno no es capaz de proporcionar esta resistencia. Son recomendables las siguientes características de la escollera:

- Ha de cumplir las condiciones del artículo 658 del PG3.
- Tamaño de la escollera: es aplicable lo indicado para el tacón de escollera (A11): un porcentaje del material (por ejemplo, el 60 %) ha de sobrepasar el tamaño requerido frente al arrastre del agua.
- Espesor: Es recomendable que cumpla lo siguiente:
 - o Mayor de 1,5 ó 2 veces el tamaño requerido de la escollera (referencia 5)
 - o Mayor o igual que 0,5 m.
- Pie de la protección: Debe profundizar al menos hasta el nivel de erosión general del lecho (en el caso de rellenos de acceso a estructuras, puede ser la erosión local en el estribo). Existe la alternativa de prolongar la protección por delante del pie en una anchura de al menos 1,5 veces la profundidad requerida (ver figura 8).
- En el contacto entre el recubrimiento de escollera y el material del relleno y el terreno de apoyo ha de disponerse un filtro que evite la migración de material más fino hacia la escollera (ver figura 8). En general es suficiente con un filtro geotextil (artículo 422 del PG3). Pueden disponerse igualmente una o varias capas de suelo granular.
- Si se prevé el contacto con el agua con cierta frecuencia, se recomienda la disposición de esta protección exterior incluso en el caso de velocidad prevista muy baja del agua, o incluso nula, aunque en este caso no se requiere

una condición de tamaño mínimo frente al arrastre.

- La protección debe disponerse hasta una cierta altura (por ejemplo 0,5 m) sobre la máxima altura de agua (periodo de retorno de al menos 500 años).

A4. Espaldones. Parte exterior de los rellenos del tipo terraplén. Los materiales constituyentes de espaldones son los siguientes:

A41. Pedraplén: Es aplicable lo indicado en A21.

A42. Suelo granular. Es aplicable lo indicado en A22.

A43. Suelo arcilloso.

- Ha de cumplir las condiciones de suelo tolerable según el PG3.
- Si va a estar en contacto con el agua en movimiento, ha de disponerse un recubrimiento o protección de escollera (A3).

Por cuestiones constructivas es recomendable un espesor del espaldón de al menos 3 m. Sus funciones frente a la acción del agua pueden ser, entre otras, las siguientes:

- Mejorar la estabilidad del relleno al disponer un elemento drenante que reduzca las presiones intersticiales (A41 y A42).
- Proporcionar resistencia frente a la socavación y a la erosión superficial (A41).
- Función de filtro, evitando la migración del material fino desde el núcleo del relleno (A42).
- Función de impermeabilización, evitando la llegada de agua al núcleo del relleno, si este tiene carácter expansivo, colapsable o soluble (A43).

B. Tratamiento del terreno de apoyo

B1. Saneamiento y sustitución por material drenante. En zonas con nivel freático alto, se requiere un suelo drenante y cuyas propiedades no se vean afectadas por la acción del agua.

B11. Pedraplén.

- Resulta indicado donde no resulta posible el rebajamiento completo del nivel freático durante el saneamiento y sustitución. Un material del tipo pedraplén asegura en general unas condiciones aceptables, incluso con un saneamiento incompleto y con una compactación realizada sólo desde encima del nivel freático.
- Resulta también indicado donde se requiere una resistencia al corte especialmente alta (como puede ser el caso de los rellenos a media ladera con fuerte pendiente).
- En condiciones de posible socavación, el pedraplén en la zona cercana al pie ha de

cumplir lo indicado en A1, A2 y A3 (un 60 % del material ha de sobrepasar el tamaño requerido frente al arrastre del agua), y el saneo y sustitución han de profundizar al menos hasta el nivel de erosión general del lecho. De esta forma no se requiere una protección adicional.

- Es recomendable que cumpla las condiciones exigidas en el artículo 331 del PG3.

B12. Suelo granular.

- Es recomendable que cumpla las condiciones de suelo seleccionado o adecuado del artículo 330 del PG3.
- En condiciones de frecuente inundación, es recomendable reducir el contenido en finos.
- No proporciona protección frente a la socavación.

B2. Mantos drenantes.

- Son capas drenantes formadas por bloques, bollos, material granular o elementos prefabricados (generalmente geocompuestos), que se disponen entre un relleno y el terreno natural sobre el que éste se apoya. Recogen y conducen las eventuales surgencias de agua procedentes del terreno natural, y las aportaciones provenientes del propio relleno.
- Su diseño y construcción ha de seguir los criterios indicados en la Orden circular 17/2003 del Ministerio de Fomento.

B3. Cajado. Escalonado de la superficie de excavación en el terreno de apoyo del relleno en zonas con fuerte pendiente natural.

C. Drenes y zanjas drenantes.

- Zanjas rellenas de material drenante, generalmente con un tubo dren en su parte inferior (del que se suele prescindir si el material drenante es escollera (figura 8).
- Suelen llevar una lámina impermeable en su parte inferior y un geotextil filtro en su superficie filtrante (artículo 422 del PG3).
- Deben diseñarse con cierta pendiente, y han de conducir el agua a la red de drenaje general.
- Su diseño y construcción ha de seguir los criterios indicados en la Orden circular 17/2003 del Ministerio de Fomento.

C1. Transversales. Perpendiculares al eje del relleno. Permiten rebajar el nivel freático en el cimientto del relleno. Son una alternativa al saneo completo (B1).

C2. Longitudinales. Paralelas al eje del relleno.

C21. En cimiento del relleno.

C22. Aguas arriba del relleno. En su parte superior se suele disponer una capa impermeable.

C3. En espina de pez. Para la captación de un conjunto localizado de manantiales o surgencias, los mantos drenantes pueden sustituirse por una red, generalmente arborescente o con forma de espina de pez, constituida por zanjas drenantes que confluyen en una principal que funciona como emisario y que, normalmente, alojará una tubería drenante y un colector en su interior.

D. Medidas complementarias

D1. Geosintéticos. En general, forman parte del diseño de las medidas A, B y C, descritas.

D11. Filtro. Se requieren en superficies de separación entre materiales de diferente granulometría, por las que se va a producir la filtración de agua, con el fin de evitar el arrastre de partículas finas. Generalmente rodean tacones y protecciones de escollera o pedraplén (A11, A12 y A3). Puede requerirse también en el contacto entre el cimiento de pedraplén (B11) y el relleno superior, en función de la granulometría de ambos materiales. En este caso también evita la caída del material fino entre los huecos del grueso. Debe cumplir lo indicado en el artículo 422 del PG3.

D12. Impermeabilización. Sus funciones son:

- Evitar la entrada al terreno del agua drenada. Por ejemplo, en la parte inferior de zanjas drenantes.
- Evitar la llegada de agua al núcleo del relleno, si este tiene carácter expansivo, colapsable o soluble.
- Evitar la llegada de agua al terreno de apoyo, si este está constituido por rocas evolutivas o solubles o por suelos expansivos, colapsables o solubles. En esos casos puede requerirse en el contacto con el terreno de tacones drenantes (A1) o incluso del material de sustitución de saneo (B1).

D13. Drenaje

- En sustitución de capas de suelo permeable, o añadido a ellas para aumentar su capacidad drenante.
- Acompañando a láminas impermeables, por el lado contrario al que ha de impermeabilizarse.
- El agua drenada debe tener salida a otros elementos drenantes o a la red de drenaje general.

Si el geosintético va a estar en contacto directo con escollera, debe tener una resistencia que evite su perforación durante la colocación de la misma. Puede ser recomendable disponer una capa de grava intermedia de escaso espesor (por ejemplo 0,5 m) que evite dicho contacto directo.

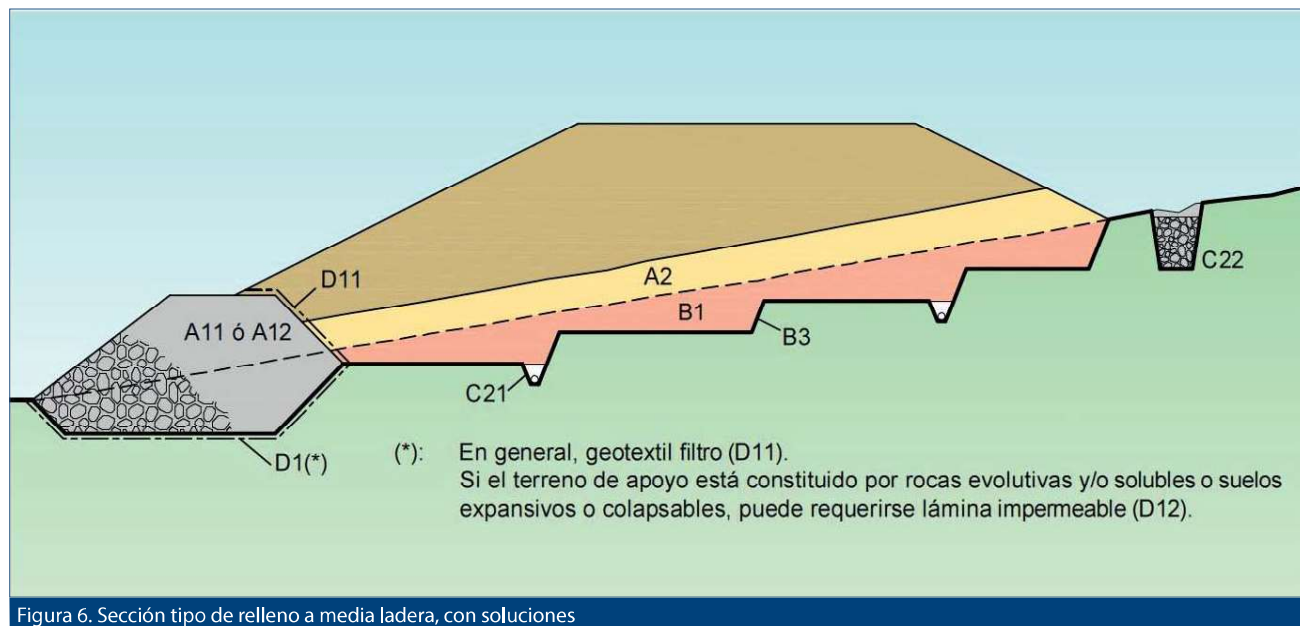


Figura 6. Sección tipo de relleno a media ladera, con soluciones

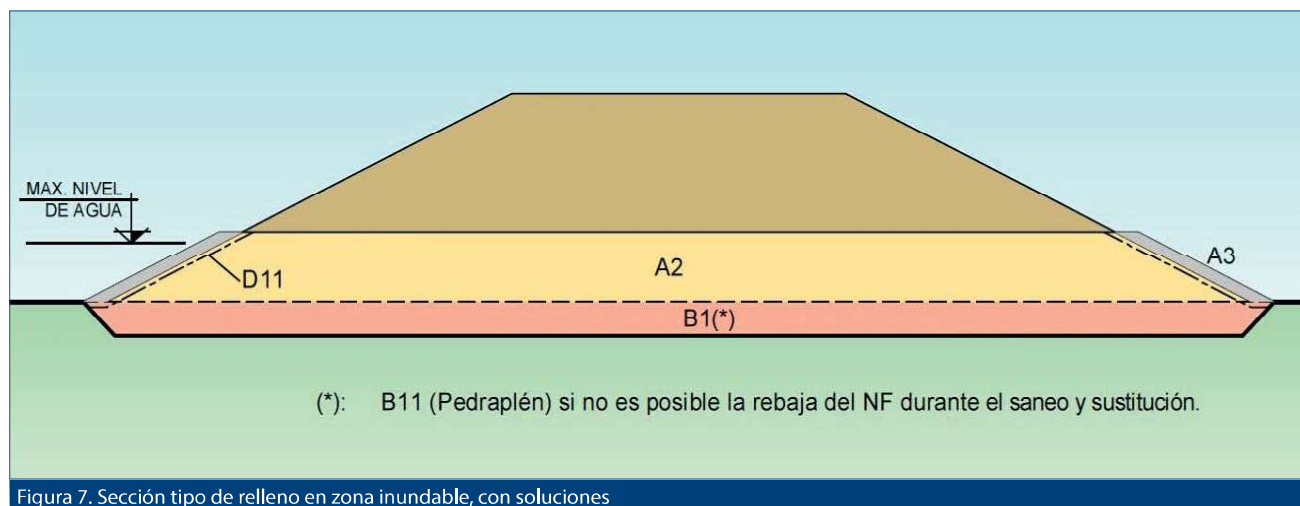


Figura 7. Sección tipo de relleno en zona inundable, con soluciones

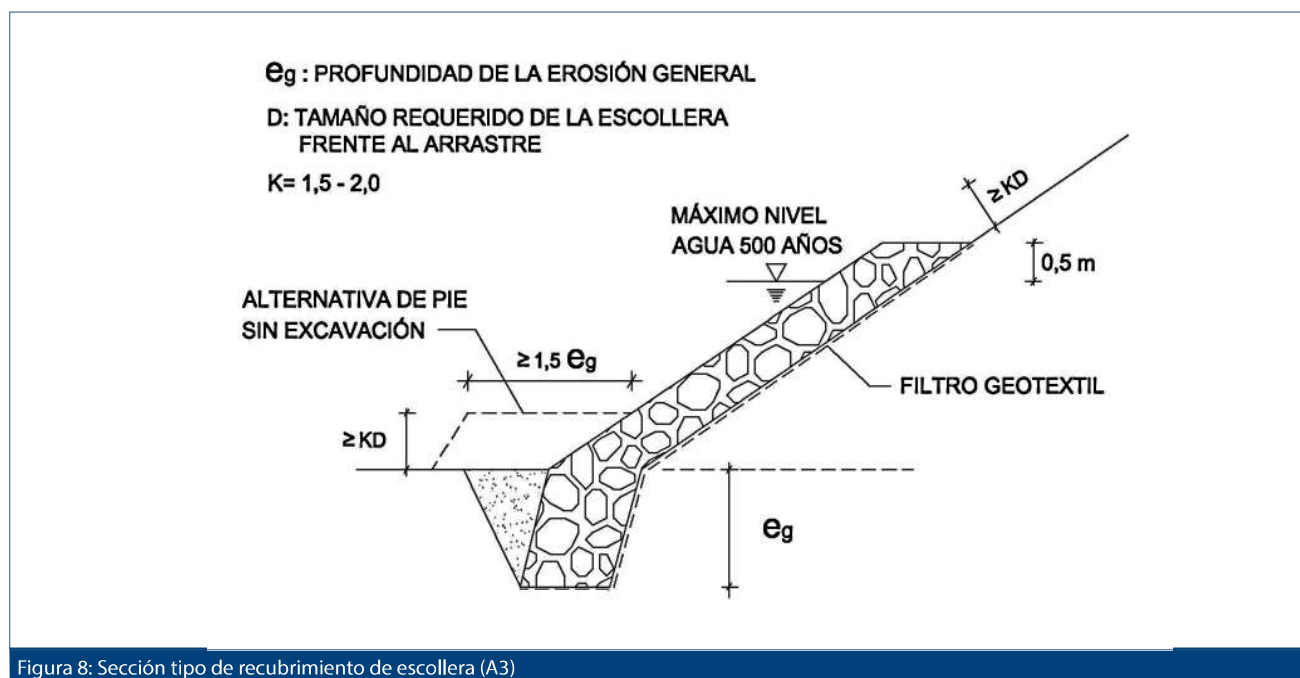


Figura 8. Sección tipo de recubrimiento de escollera (A3)

D2. Drenaje superficial.

- Son las medidas que deben aplicarse con carácter general, para minimizar el agua de escorrentía que penetra en el relleno y en el terreno de apoyo. Su ausencia, deficiente diseño o construcción, o mal funcionamiento, provocarán o agravarán, en general, las acciones del agua sobre el relleno y sus consecuencias.
- Las medidas de drenaje superficial más habituales son: caces de coronación, bajantes y cunetas.
- Su diseño y construcción ha de seguir lo indicado en la Instrucción 5.2-IC, Drenaje superficial.

En las figuras 6 a 9 pueden verse secciones tipo esquemáticas de varias soluciones. En las figuras 10 a 14 se muestran algunas fotos de ejemplos reales.

Figura 9.1: Zanja de escollera

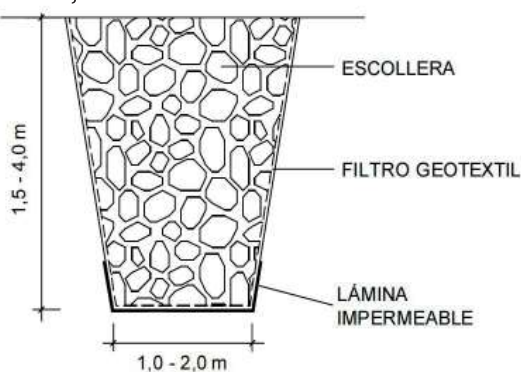


Figura 9.2: Zanja de escollera con cierre superior de arcilla+cuneta

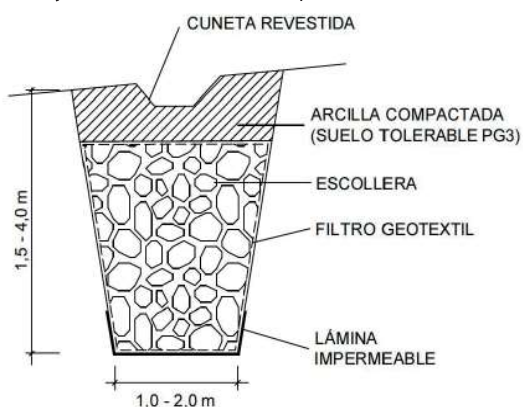


Figura 9.3: Zanja drenante de suelo granular (dren francés)

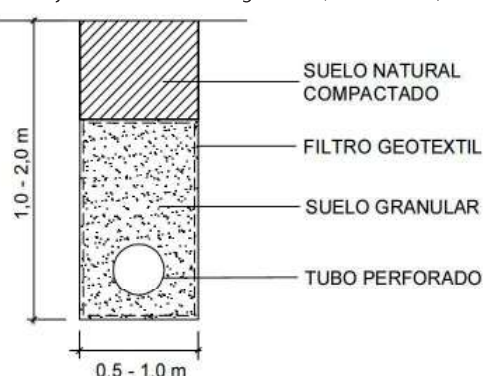


Figura 9: Zanjas drenantes (C), con sus dimensiones habituales

7. Relaciones entre soluciones, acciones y casos

En la tabla 4 se relacionan las soluciones con las acciones frente a las cuales son efectivas. A partir de esta relación se ha realizado la tabla 5, en la que se relacionan las soluciones con los casos a los que son aplicables. En esta última se han excluido algunas soluciones cuya aplicación está poco relacionada con el caso de que se trate, y depende más de otros factores. Es el caso de los espaldones (A4).

Las relaciones incluidas en las tablas 4 y 5 tienen solamente un carácter orientativo. El diseño de los casos concretos, por supuesto, debe hacerse de forma particularizada.



Figura 10. Caso RIB. Saneamiento en terreno de apoyo (B1) en zona con nivel freático alto. Línea de Alta Velocidad Picassent- Alcásser



Figura 11. Caso RIB. Relleno de saneamiento con pedraplén (B11). Línea de Alta Velocidad Picassent- Alcásser

Tabla 4: Relación entre las posibles soluciones y las acciones frente a las que son efectivas (color rojo)

SOLUCIONES			ACCIONES							
			I		II		III		IV	
			Ia	Ib	IIa	IIb	IIIa	IIIb		
A. Zonificación del relleno. Geometría y características exigidas a materiales en diferentes zonas.	A1. Pie o tacón drenante	A11. Escollera								
		A12. Pedraplén								
		A13. Suelo granular								
	A2. Cimiento de relleno	A21. Pedraplén								
		A22. Suelo granular								
	A3. Recubrimiento o protección de escollera									
	A4. Espaldones	A41. Pedraplén								
		A42. Granular								
		A43. Arcilloso								
B. Tratamiento del terreno de apoyo.	B1. Saneamiento y sustitución por material drenante	B11. Pedraplén								
		B12. Suelo granular								
C. Drenes y zanjas drenantes.	B2. Mantos drenantes									
	C1. Transversales									
	C2. Longitudinales	C21. En cimiento del relleno								
		C22. Aguas arriba del relleno								
	C3. En espina de pez									
D. Medidas complementarias.	D1. Geosintéticos	D11. Filtro								
		D12. Impermeabilización								
		D13. Drenaje								
	D2. Drenaje superficial	D21. Cunetas								
		D22. Bajantes								

I: Acción directa del agua circulando sobre la superficie

Ia: Erosiones y acarcavamientos superficiales

Ib: Socavación en pie

II: Incremento de humedad hasta saturación

IIa: Cambios de volumen

IIb: Pérdida de resistencia al corte del suelo

III: Migración de material por filtraciones a través del relleno y/o cimiento

IIIa: Erosiones internas

IIIb: Disoluciones

IV: Empuje del agua sobre el relleno si este actúa como represa

8. Ejemplos de aplicación

EJEMPLO 1

Un tramo de relleno de carretera atraviesa una vaguada de forma aproximadamente perpendicular, con una obra de drenaje coincidiendo con el eje de la vaguada. El terreno en el emplazamiento del relleno está constituido por margas de edad oligocena.

La pendiente media del terreno de apoyo es la siguiente:

- En sentido transversal al eje del relleno: 3 %
- En sentido longitudinal al eje del relleno: 22 %

Los datos hidrológicos a emplear en el diseño de la obra de drenaje, correspondientes a un periodo de retorno de 500 años, son los siguientes:

- Altura del agua en el lado de aguas arriba: 1,50 m

- Altura del agua en el lado de aguas abajo: 1,10 m
- Velocidad del agua: 3,1 m/s

La posición relativa del relleno y la vaguada y la morfología de esta conducen, en principio, a encuadrar el relleno como RVC (Relleno que intercepta una vaguada. Vaguada cerrada. Fuerte gradiente hidráulico). La aplicación de la tabla 1 concuerda con esa clasificación. Respecto al terreno de apoyo, quedaría clasificado como RE, roca blanda evolutiva.

De la tabla 2 se obtienen las siguientes posibles acciones del agua sobre el relleno:

- Ia: Erosiones y acarcavamientos superficiales (acción media)
- Ib: Socavación en pie (acción fuerte o intensa)
- II: Incremento de humedad hasta saturación (acción fuerte o intensa)

Tabla 5: Relación entre casos y soluciones (0: No necesario o poco apropiado. 1: Apropiado. 2: Muy apropiado)																												
CASOS												TERRENO DE APOYO																
RMA		RMB		RVA		RVC		RIB		RIA		RRV																
Relleno a media ladera. Situación alta respecto a vaguada.		Relleno a media ladera. Situación baja respecto a vaguada.		Relleno que intercepta vaguada. Vaguada abierta. Bajo gradiente hidráulico.		Relleno que intercepta vaguada. Vaguada cerrada. Fuerte gradiente hidráulico.		Relleno en zona inundable. Baja velocidad del agua.		Relleno en zona inundable. Alta velocidad del agua.		Relleno que ocupa vaguadas (polígonos industriales, urbanizaciones, etc.)																
RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	RS	RE	SP	SI	
A. Zonificación del relleno. Geometría y características exigidas a los materiales en las diferentes zonas.	A1. Pie o tacón drenante	0	1	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2
		0	2	2	2	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0	0	1	1	1	1	2	2
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A2. Cimiento de relleno drenante	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
		A22. Suelo granular	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
	A3. Recubrimiento o protección de escollera		0	0	0	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	0	0	0
B. Tratamiento del terreno de apoyo.	B1. Saneamiento y sustitución por material drenante		0	1	2	0	1	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	1	2	0	1	2
		B12. Suelo granular	0	0	2	0	1	0	2	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	1	1	2
	B2. Mantos drenantes		0	1	2	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
C. Drenes y zanjas drenantes.	C1. Transversales		0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	
	C2. Longitudinales	C21. En cimiento de relleno	0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	
		C22. Aguas arriba del relleno	0	1	2	0	1	1	2	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
D. Medidas complementarias.	C3. En espina de pez		0	0	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	
		D11. Filtro	0	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	
		D12. Impermeabilización	0	2	1	2	0	2	1	2	0	1	0	1	0	2	0	2	0	1	0	1	0	1	1	2	1	2
	D2. Drenaje superficial (caces, bajantes, cunetas)	D13. Drenaje	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



Figura 12. Caso RIB. Cimiento realizado con pedraplén (A21). Línea de Alta Velocidad Picassent- Alcásser

- III: Migración de material por filtraciones a través del relleno (acción fuerte o intensa)
 - IV: Empuje del agua sobre el relleno si este actúa como represa (acción fuerte o intensa)
- De la tabla 3 se obtienen las siguientes posibles acciones del agua sobre el terreno de apoyo:
- Ib: Socavación en pie (acción media)
 - II: Incremento de humedad hasta saturación (acción media)
 - III: Migración de material por filtraciones a través de relleno (acción media)
- Acción media indica que el plazo en que actúa, las consecuencias y las medidas requeridas son de nivel medio.
- Las acciones II y III, pueden subdividirse en diferentes acciones, según se indica en el apartado 4. Todas ellas pueden actuar sobre el relleno objeto de estudio.
- Las soluciones aplicables a este relleno pueden verse en la tabla 5. Se recogen a continuación, junto con comentarios explicativos.
- **A11, A12, A13: apropiadas.** *Un tacón o pie drenante resulta apropiado, preferiblemente de escollera o pedraplén, aunque también puede ser válido de suelo granular. Puede plantearse en la parte más baja del pie del relleno, en el entorno de la obra de drenaje. Además de proteger esta zona contra la socavación, y de facilitar el drenaje del relleno, mejora las condiciones de estabilidad del relleno en su zona de mayor altura.*
 - **A21 y A22: muy apropiadas.** *Un cimiento de relleno (parte baja del relleno en contacto con el terreno de apoyo) drenante, de suelo granular o pedraplén, resulta muy apropiado para evitar o reducir las presiones intersticiales en el relleno.*
 - **A3: muy apropiada.** *Un recubrimiento o protección de escollera resulta muy apropiado en la zona en la que el relleno puede estar en contacto con agua en movimiento, esto es, en las proximidades de la obra de drenaje, tanto aguas arriba como aguas abajo.*
 - *Es recomendable para el tacón, cimiento drenante y recubrimiento de escollera, una altura al menos 0,5 m por encima de la correspondiente a la avenida de periodo de retorno de 500 años. En el caso del cimiento drenante, es recomendable un espesor aproximadamente constante igual al máximo obtenido al aplicar el criterio anterior aguas arriba y aguas abajo. En este caso resulta un espesor de 2 m respecto el terreno natural.*
 - **B11 y B12: poco apropiadas; B2: apropiada.** *El saneo y sustitución del terreno de apoyo no resulta necesario, si no existe una capa superior de terreno muy alterado, aunque sí es apropiada la disposición de un manto drenante en caso de surgencias de agua en el terreno. En el caso de la existencia de una capa superior de espesor importante de margas muy alteradas, la clasificación del cimiento pasaría a ser SI, suelo impermeable, y B11 y B12 serían ahora muy apropiadas según la tabla 5.*
 - **C1, C21 y C3, poco apropiadas; C22: apropiada.** *Una zanja drenante longitudinal, aguas arriba del relleno, puede resultar apropiada para contribuir a evitar la llegada de agua a la parte superior del terreno de apoyo, evitando así su alteración.*
 - **D11 y D12: muy apropiadas, D13: apropiada.** *El empleo de geotextiles para filtro e impermeabilización resulta muy apropiado:*



Figura 13. Caso RIB. Geotextil entre el pedraplén del cimiento y el relleno superior (D11). Línea de Alta Velocidad Picassent- Alcásser

- o **Lámina Impermeable:**
 - En el contacto del relleno con el terreno de apoyo, para evitar la llegada de agua y consiguiente alteración. Resulta especialmente apropiada en la parte baja del relleno, por ejemplo, en el apoyo del tacón de escollera. Su necesidad es función de la alterabilidad del terreno de apoyo. Si no es excesiva, puede no resultar necesaria.
 - Puede ser necesaria para proteger de la acción del agua el núcleo de relleno, si se construye con suelos susceptibles de sufrir hinchamiento, colapso, erosiones internas o disolución.
 - Es, en general, recomendable en la parte inferior de zanjas drenantes.
- o **Filtro:** en el contacto de la escollera (en recubrimiento, tacón o zanjas) con el material circundante (relleno o terreno natural), excepto donde se disponga lámina impermeable.
- o **Drenaje:** Si se desea aumentar la capacidad drenante de las capas de suelo granular. Puede ser útil acompañando la lámina impermeable.
- **D2: apropiada.** Un adecuado diseño y dimensionamiento de las medidas de drenaje superficial es siempre necesario.

EJEMPLO 2

Un tramo de relleno de carretera atraviesa una llanura aluvial de topografía plana. El terreno en el emplazamiento del relleno está constituido por una terraza aluvial, con una capa superior arcillosa (arcillas limosas de plasticidad media, CL) de 3 m de espesor sobre una capa de gravas arenosas (GM) de 5 m de espesor, con el nivel freático cercano a la superficie del terreno.

La pendiente media del terreno de apoyo es la siguiente:

- En sentido transversal al eje del relleno: 0,5 %
- En sentido longitudinal al eje del relleno: 0,6 %

Los datos hidrológicos correspondientes a un periodo de retorno de 500 años, son los siguientes:

- Altura del agua en el lado de aguas arriba: 0,7 m
- Altura del agua en el lado de aguas abajo: 0,7 m
- Velocidad del agua: 0,4 m/s

La situación del relleno en una llanura aluvial inundable de topografía horizontal conduce a encuadrarlo como **RIB** (Relleno en zona inundable. Baja velocidad del agua). La aplicación de la tabla 1 concuerda con esa clasificación. Respecto al terreno de apoyo, quedaría clasificado como **SI**, suelo impermeable.

De la tabla 2 se obtienen las siguientes posibles acciones del agua sobre el relleno:

- Ia: Erosiones y acarcavamientos superficiales (acción media)
- Ib: Socavación en pie (acción media)
- II: Incremento de humedad hasta saturación (acción media)
- III: Migración de material por filtraciones a través del relleno (acción media)
- IV: Empuje del agua sobre el relleno si este actúa como represa (acción media)

De la tabla 3 se obtienen las siguientes posibles acciones del agua sobre el terreno de apoyo:

- Ib: Socavación en pie (acción media)
- II: Incremento de humedad hasta saturación (acción fuerte o intensa)
- III: Migración de material por filtraciones a través del relleno (acción fuerte o intensa)

Acción media indica que el plazo en que actúa, las consecuencias y las medidas requeridas son de nivel medio.

Las acciones II y III pueden subdividirse en diferentes acciones, según se indica en el apartado 4. Todas ellas pueden actuar sobre el relleno objeto de estudio.

Las soluciones aplicables a este relleno pueden verse en la tabla 5. Se recogen a continuación, junto con comentarios explicativos.



Figura 14. Caso RIB. Protección de escollera (A3). Línea de Alta Velocidad Pozal - Villaverde

- **A21 y A22: muy apropiadas.** Un cimientado de relleno de suelo granular o de pedraplén, resulta muy apropiado por ser una zona susceptible de inundación en la que se requiere un material drenante y cuyas propiedades no se vean afectadas por la acción del agua.
- **A3: apropiada.** Un recubrimiento o protección de escollera resulta apropiado para evitar el arrastre del relleno por la acción del agua, aunque dada la baja velocidad del agua, sería suficiente con disponer pedraplén en el cimientado del relleno. En el caso de disponerse simplemente un suelo granular, sí podría resultar necesario el recubrimiento de escollera.
- Es recomendable para el cimientado drenante y recubrimiento de escollera una altura al menos 0,5 m por encima de la correspondiente a la avenida de periodo de retorno 500 años.
- **B11 y B12: muy apropiadas.** El saneo y sustitución del terreno de apoyo por material drenante resulta muy apropiado, por tratarse de una zona de nivel freático alto, susceptible de alcanzar con cierta frecuencia la superficie del terreno. La imposibilidad o las grandes dificultades del rebaje del nivel freático durante el saneo y sustitución hace preferible el empleo de pedraplén. La profundidad requerida del saneo (saneo total o parcial del suelo arcilloso) debe decidirse en función de las características resistentes y deformacionales de la capa arcillosa, de la altura del relleno y de la profundidad del nivel freático.
- **C1, C2 y C3, poco apropiadas:** La imposibilidad de desaguar el agua recogida en zanjas drenantes no las hace útiles, en principio, en este caso.
- **D11, D12 y D13: apropiadas.** El empleo de geotextiles para filtro, impermeabilización y drenaje resulta apropiado:
 - o Lámina Impermeable: Puede ser necesaria para proteger de la acción del agua el núcleo de relleno, si se construye con suelos susceptibles de sufrir hinchamiento, colapso, erosiones internas o disolución.
 - o Filtro: en el contacto del recubrimiento de escollera con el material circundante (relleno o terreno natural). Si se dispone pedraplén en el cimientado o en la zona de saneo de relleno, puede requerirse un filtro en el contacto con el relleno superior, en función de la granulometría de ambos materiales.
 - o Drenaje: Puede ser útil acompañando a la lámina impermeable.
- **D2: apropiada.** Un adecuado diseño y dimensionamiento de las medidas de drenaje superficial es siempre necesario.

9 Referencias

- (1) Jimenez Salas, J.A. y otros, 1980. "Geotecnia y Cimientos III". Editorial Rueda.
- (2) Bureau of Reclamation, 1983. "Engineering Monograph nº 25. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators".
- (3) MOPT, 1988. "Control de la erosión fluvial en puentes".
- (4) Ministerio de Fomento, 2002. "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes - PG3".
- (5) Ministerio de Fomento, 2003. "Recomendaciones para el proyecto y construcción del drenaje subterráneo en obras de carretera" (Orden circular 17/2003).
- (6) Adif, 2011. "Pliego General de Prescripciones Técnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma (PGP)". Edición Junio 2011.
- (7) Paniagua Serrano, I., 2011. "Tratamiento y consolidación de terraplenes afectados por inclemencias meteorológicas". Jornada técnica sobre experiencias recientes en estructuras de tierra para infraestructuras viarias. Madrid.
- (8) Ministerio de Fomento, 2016. "Instrucción 5.2-IC Drenaje superficial".