

Experiencias de utilización de materiales marginales y especiales en terraplenes viarios en España

Spanish experiences with marginal and special materials on the construction of road embankments

Herminia Cano Linares^{1*} y Áurea Perucho Martínez

Palabras clave

materiales marginales;
residuos;
materiales ligeros;
terraplenes;

Resumen

La utilización de los materiales existentes a lo largo de la traza de las carreteras es un tema primordial dentro de la política de Desarrollo Sostenible que se viene impulsando desde hace tiempo a nivel mundial. Dentro del seno de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC-AIPCR) se ha venido investigando en este tema desde hace varias décadas por parte de diferentes Comités Técnicos.

Por otra parte, con la modificación del artículo 330 de “Terraplenes “del PG-3 (FOM 1382/2002), se abrió, en el año 2000, la puerta al empleo de materiales no convencionales, como determinados tipos de residuos y materiales artificiales, para la ejecución de rellenos en terraplén, pudiendo resultar soluciones técnica y medioambientalmente adecuadas, siempre que se adopten las medidas necesarias. Este tipo de aprovechamiento de residuos puede suponer una contribución en el campo del reciclaje, de acuerdo con las políticas de valorización de residuos de la legislación española. En este sentido, tanto el empleo de materiales marginales, como el de residuos pueden representar un importante ahorro de recursos naturales y de vertederos.

En España, se han llevado a cabo experiencias de aplicación de empleo de materiales marginales y residuos en rellenos en terraplén. El trabajo que aquí se presenta ha consistido en la recopilación y análisis de las experiencias de aplicación de materiales marginales y residuos en terraplenes viarios españoles. A pesar de ser mucho mayor el número de casos prácticos, se han podido analizar 24 experiencias documentadas, de las que se ha podido extraer información relevante. Se han resumido y sintetizado en tablas aspectos tales como: problemática de los materiales, las soluciones adoptadas para su disposición en el terraplén, o tratamientos empleados. Analizar estos casos y darlos a conocer es una forma de transmitir confianza, ayudar a mejorar el conocimiento y avanzar en la elaboración de recomendaciones para aquellos materiales de los que se dispone más experiencia.

El trabajo se ha encuadrado dentro del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España – Fronteras Exteriores (que se denominó POCTEFEX) y se desarrolló para la “Actividad 2: “Transferencia tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables” del Proyecto de Transferencia Tecnológica: Geotécnica, de Estructuras y de Materiales y de Impacto de infraestructuras en el ámbito de la ingeniería civil, denominado TTIGEM.

Keywords

marginal material;
wastes;
lighten material;
embankment;

Abstract

The use of existing materials along the alignment of a road is an essential problem within the Sustainable Development policies, which is being promoting worldwide since a long time. In the World Road Association (PIARC-AIPCR) this subject has being investigated by different Technical Committees during last decades.

Additionally, the review of the article 330 “Embankment” of PG-3 (FOM 1382/2002) has opened the door to new non-conventional materials, as wastes and artificial materials, to be used on embankments. This could come to adequate solutions, technically, and environmentally, contributing with national legislation on valorisation policies. In this sense, the use of marginal materials and wastes can represent an important save on natural resources and dumping sites.

In Spain, some experiences with marginal materials and wastes have being carried out. The work presented has consisted in compiling and analysing the experiences executed with marginal materials and wastes on Spanish road embankments. Although there are many other cases, 24 cases published with adequate information have being analysed, summarising aspects as: material’s problems, arrangement solutions or treatments employed. Analysing these experiences and making them public can be a way to transmit confidence, help to improve knowledge, and progress on the preparation of recommendations.

This work has being carried out on the frame of the Project: “Geotechnical Engineering, Materials and Structures and Impact of Infrastructure in Civil Engineering (TTIGEM), within the frame Program Border Cooperation Spain-External Borders (POCTEFEX); particularly in the Activity 2 related to Technology Transfer of Construction Materials, including marginal materials and wastes.

* Autor de contacto: herminia.cano@cedex.es

¹ Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Madrid, España.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de los materiales existentes a lo largo de la traza de las carreteras es un tema primordial dentro de la política de Desarrollo Sostenible que se viene impulsando desde hace tiempo a nivel mundial. Es por ello que en las últimas décadas ha habido un interés creciente en la investigación y desarrollo de nuevos usos y aprovechamientos de los materiales marginales, en un intento de optimizar la utilización de los recursos naturales disponibles localmente. En este sentido, el empleo en los terraplenes viarios de materiales marginales anteriormente desechados puede suponer un importante ahorro tanto de recursos como de vertederos.

Dentro del seno de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC-AIPCR) se ha venido investigando en este tema desde hace varias décadas por parte de diferentes Comités Técnicos, que han producido diversos documentos tratando aspectos relacionados con el tema (PIARC-AIPCR, 1989, 1991, 2007, 2012). Actualmente, en el seno del Comité Técnico 4.4 “Movimiento de tierras y Carreteras sin pavimentar” uno de los temas de trabajo es la “Utilización óptima de materiales locales en los Movimientos de tierras”, con el principal objetivo de avanzar en las recomendaciones para el uso de materiales locales, identificando los posibles riesgos que puede implicar el uso de materiales cuyas características están en el límite de las especificaciones, comparando los enfoques dados por diferentes países (Perucho Martínez, 2013) y tratando de promover un enfoque común en los países miembros.

Por su parte, en España la Asociación Técnica de Carreteras, que forma el Comité Nacional Español de la Asociación Mundial de la Carretera, ha organizado algunas Jornadas Técnicas monográficas sobre los materiales marginales y su uso en carreteras (“Jornada sobre Materiales Marginales”. ATC, Sevilla, marzo, 2007; “Jornada de Geotecnia Vial sobre Materiales Marginales”. ATC, Madrid, junio, 2005).

Por otra parte, el tema del aprovechamiento de los distintos tipos de residuos que produce la actividad humana, es una cuestión de gran interés medioambiental, económico y social, que viene siendo impulsado por la política comunitaria en materia de residuos, a través de la Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE), y por la política estatal, con su legislación nacional y autonómica, (Ley 22/11 de Residuos y Suelos Contaminados, Planes de Residuos, PNIR 2007-2015, Programas, etc.). Así, según el principio de jerarquía de residuos que señala la Directiva, la reutilización, el reciclado u otras formas de valorización de residuos tienen prioridad sobre la opción de la eliminación. Por otra parte, entre los objetivos que incluye la Directiva resulta reseñable el que dispone alcanzar en el año 2020 la reutilización y reciclado del 70% de residuos no peligrosos de construcción y demolición (RCD).

La valorización de residuos mediante su empleo en terraplenes es una forma de reciclaje que permite absorber grandes cantidades de material, ahorrando, por un lado, recursos naturales no renovables y reduciendo, por otro, la cantidad de residuos que se destinan a vertedero, los costes de transporte, los volúmenes de escombreras, etc. Por ello, los esfuerzos que se hagan en este campo contribuyen a los objetivos generales de la política de residuos y, en el caso

de los RCD, al objetivo concreto de aumentar la tasa de reciclado exigida para el año 2020.

En este sentido, el CEDEX ha trabajado en las últimas décadas en el estudio de diferentes tipos de residuos, con vistas a su posible aprovechamiento en distintos usos, abordando trabajos desde diferentes perspectivas, tales como ensayos para caracterización física, química, mecánica, medioambiental, así como aplicaciones experimentales en obra, o recopilaciones bibliográficas, normativas y de análisis de la información. Cabe destacar los trabajos llevados a cabo para la elaboración del documento denominado “Catálogo de Residuos utilizables en la construcción”, realizado para el Ministerio de Medio Ambiente en el año 2002. Este documento contiene información detallada sobre 17 residuos recogida en forma de Fichas Técnicas, una para cada residuo, donde se contemplan diferentes aspectos de los residuos tales como: su origen, datos de producción y distribución geográfica, propiedades, tratamiento para su valorización, posibilidades de utilización, algunas obras nacionales e internacionales en las que se han utilizado, aspectos medioambientales, económicos, normativa de aplicación, referencias bibliográficas y entidades de contacto de interés. El documento ha ido siendo actualizado periódicamente para incorporar los continuos avances en el ámbito del reciclaje y se diseñó una aplicación informática de consulta libre en internet para facilitar el acceso y la actualización de los contenidos (<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx>). Los estudios que el CEDEX ha realizado en estos años también se han incorporado sintetizados al Catálogo; en particular, los relativos al aprovechamiento de residuos como materiales de construcción en terraplenes viarios.

En la línea de estos estudios y los del Comité Técnico de la PIARC-AIPCR se ha realizado un trabajo de recopilación y análisis de las experiencias de aplicación de materiales marginales y residuos en terraplenes viarios españoles (Urreta Jainaga, 2013), con el objetivo de mejorar el conocimiento y avanzar en la elaboración de recomendaciones de uso de algunos de estos materiales, así como divulgar y fomentar el empleo de los mismos. Aunque no incluidas en este artículo, se han recopilado, asimismo, algunas experiencias de utilización en otros países (Parra Arraya, 2012).

El trabajo que se presenta se llevó a cabo para el Proyecto TTIGEM, desarrollado dentro del Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España – Fronteras Exteriores (que se denominó POCTEFEX) enmarcado dentro del Objetivo de Cooperación Territorial Europea del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), aprobado en marzo de 2009, con el objetivo global de “potenciar un desarrollo socioeconómico y ambiental armónico y contribuir a una mayor vertebración del espacio de cooperación entre el Reino de España y el Reino de Marruecos”. Estos trabajos se desarrollaron dentro de lo que se denominó “Actividad 2: “Transferencia tecnológica relativa a materiales de construcción, incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables”.

2. LOS MATERIALES MARGINALES Y ESPECIALES EN LA NORMA ESPAÑOLA

Como es sabido, en España todos los aspectos relativos a la construcción de obras lineales viarias están recogidos en el documento legal denominado “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes”,

conocido normalmente como PG-3, que tiene rango de norma. En dicho documento se clasifican los suelos potencialmente utilizables en base al cumplimiento de unos requisitos básicos. En particular, en el artículo 330 se exponen todos los aspectos relativos a la construcción de terraplenes, incluyendo, además de la clasificación de los materiales, algunas indicaciones sobre el modo de empleo, su uso por zonas, precauciones especiales y otros aspectos constructivos.

Las crecientes exigencias medioambientales mencionadas y la necesidad de procurar el aprovechamiento de un mayor tipo y volumen de materiales habitualmente desechados llevaron a modificar la normativa en el año 2000 (mediante la Orden Circular 326/2000 y la posterior Orden Ministerial FOM 1382/2002), incorporando en el artículo 330 el nuevo grupo de suelos denominados “marginales” en el que pudieran tener cabida algunos de los materiales desechados a priori. Actualmente, esta normativa define cinco grupos de suelos denominados seleccionados, adecuados, tolerables, marginales e inadecuados, que abarcan desde los suelos con mejores características hasta los de menores calidades. En la figura 1 se recogen los criterios de plasticidad de estos cinco grupos. Por otra parte, en la tabla 1 se muestran otras especificaciones técnicas que deben cumplir, así como las diferentes normativas indicadas para determinar cada parámetro.

De acuerdo con la definición de la PIARC (1989), se entiende por materiales marginales aquellos que caen fuera de las especificaciones habituales, pero que pueden ser empleados si se tienen en cuenta ciertos cuidados. Entre ellos se mencionan los materiales naturales no tradicionales, residuos y subproductos industriales que no son de uso común.

Por su parte, en la norma española (PG-3) se consideran materiales marginales aquellos suelos que, no pudiendo ser clasificados dentro de las otras categorías definidas, cumplen al menos unos requisitos mínimos en cuanto al contenido en materia orgánica, hinchamiento y condiciones de plasticidad, según lo reflejado en la figura 1 y en la tabla 1.

Por otra parte, la norma indica expresamente que “además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes

los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que se cumplan las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto” (artículo 330 “Terraplenes” del PG-3). De este modo, en el año 2000 la norma española abrió la puerta a la utilización tanto de materiales marginales naturales como de otros tipos de materiales no naturales, como residuos, que no tenían cabida en redacciones anteriores de la misma. Los citados materiales no naturales no están calificados expresamente como marginales en la normativa española, posiblemente porque puede darse el caso de que cumplan con las especificaciones de alguno de los otros grupos. Por ello se les ha incluido en este estudio bajo la denominación general de materiales “especiales”.

En cualquier caso, es condición imprescindible que los suelos marginales y especiales cumplan todos los requisitos técnicos necesarios para su empleo, teniendo que quedar estos aspectos adecuadamente justificados en un documento denominado Estudio Especial, que debe ser aprobado por el Director de las Obras.

Es indudable que la incorporación de estos nuevos tipos de materiales en la construcción de rellenos en terraplén presenta numerosos beneficios, medioambientales (siempre que se adopten las medidas necesarias) económicos, paisajísticos o sociales. No obstante, esta práctica no está exenta de dificultades, debido fundamentalmente a la falta de experiencia e información disponible sobre pautas de aplicación o recomendaciones de construcción. Por ello, trabajos encaminados a una transferencia de conocimientos entre entidades y países, o una mayor actividad en proyectos que utilicen estos materiales o la elaboración de legislación adecuada, pueden ser medidas que ayudarían a superar estas dificultades.

En relación con el empleo de materiales marginales de origen natural, en España se está consolidando la práctica de utilizarlos, sobre todo en aquellas zonas en las que, debido a las condiciones geológicas y climáticas peculiares, son los materiales más abundantes y es difícil y económicamente costoso encontrar otros de mayor calidad.

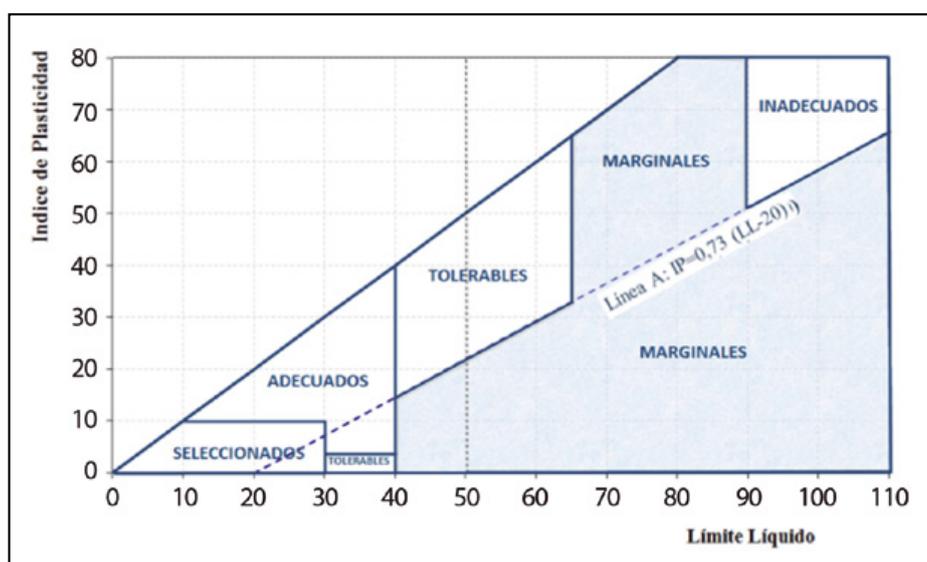


Figura 1. Criterio de plasticidad para la clasificación de los suelos para terraplenes según el PG3 (orden FOM 1382/2002).

Tabla 1. Especificaciones del PG3 (orden FOM 1382/2002) para los distintos materiales y normativa de ensayos

| Parámetro | Seleccionados | Adecuados | Tolerables | Marginales |
|--|------------------------------|--|-------------------|------------|
| Materia orgánica UNE 103204 | < 0,2% | < 0,1% | < 0,2% | < 5% |
| Sales solubles NLT 114 | Yeso Otras | < 0,2% < 1% | < 5% | |
| Hinchamiento libre UNE 103601 y UNE 103500 | | | < 3% | < 5% |
| Asiento en ensayo de colapso NLT-254 y UNE 103500 | | | < 1% a 0,2 MPa | - |
| Tamaño máximo (mm) | ≤ 100 | ≤ 100 | - | - |
| Granulometría | Otras condiciones | # 0,4 < 15% ^(*) # 2 < 80% # 0,4 < 75% | # 2 < 80% | - |
| | Finos (#0,08mm) | < 25% | < 35% | - |
| Plasticidad UNE 103103 y UNE 103104 | Según gráfico de la figura 1 | | | |

(*) En caso de cumplirse esta condición no es necesario cumplir el resto de comprobaciones de granulometría y plasticidad.

Respecto al empleo de residuos en terraplenes, en la actualidad para emplear un residuo como material sustitutivo de un material natural en un terraplén en España es necesario que satisfaga las mismas especificaciones técnicas que los materiales convencionales, se conozcan claramente las condiciones específicas de su puesta en obra teniendo, en cuenta las posibles limitaciones, se garantice la estabilidad presente y futura del terraplén y se cumpla con la legislación en materia medioambiental, de seguridad y salud. Todo ello debiendo quedar claramente justificado en un estudio especial que debe ser aprobado por el Director de las obras. En la práctica habitual esto se traduce en que su empleo resulta en general bastante más costoso, difícil e incierto.

No obstante, existen algunos estudios realizados sobre distintos tipos de residuos con posibilidades de ser aprovechados en terraplenes, y algunas experiencias de aplicación en obras. Más adelante se incluye una recopilación de experiencias españolas documentadas.

3. TIPOS DE MATERIALES MARGINALES Y ESPECIALES APROVECHABLES EN TERRAPLENES: CARACTERÍSTICAS Y MODO DE EMPLEO

Desde la modificación del artículo 330 del PG-3 los nuevos tipos de materiales que se pueden emplear en relleños se pueden clasificar en los siguientes grupos:

1. Materiales marginales naturales;
2. Materiales especiales, procedentes de procesos industriales o manipulación humana. Entre ellos, en este estudio se han considerado los siguientes subgrupos:
 - Residuos y subproductos industriales.
 - Materiales fabricados expresamente para su utilización como relleno, como pueden ser los materiales ligeros

Como ya se ha mencionado, la puesta en obra de estos materiales conlleva una serie de precauciones y requisitos específicos que, en el caso de los suelos marginales naturales, están mencionados expresamente en el PG-3, no siendo así en el caso de los residuos ni de los materiales ligeros. A continuación se revisan sus características principales y modo de empleo.

3.1. Materiales marginales naturales

El primer grupo citado anteriormente engloba a los materiales marginales naturales, formado por aquellos suelos y rocas que no cumplen las especificaciones para ser considerados en las otras categorías del PG-3. Se puede citar, entre otros, a los suelos colapsables, suelos expansivos, suelos con yesos, suelos con otras sales solubles y suelos con materia orgánica.

Las características principales que les confieren su carácter marginal se han recogido en la tabla 2.

En relación al modo de empleo de estos materiales en terraplenes viarios, en la tabla 3 se muestra la zona o zonas del terraplén en las que se pueden utilizar los distintos tipos según el PG-3, así como algunos requisitos que deben cumplir.

Por otra parte, en relación a la puesta en obra de estos materiales el PG-3 realiza las observaciones que se recogen en la tabla 4.

3.2. Materiales especiales, procedentes de procesos industriales o manipulación humana

3.2.1. Residuos y subproductos industriales

El segundo grupo comprende una amplia variedad de residuos procedentes de la actividad industrial y extractiva y de ámbito municipal (Pardo de Santayana 1997, Catálogo de residuos 2002).

Para determinados tipos de residuos, su empleo como material de terraplén es técnicamente posible y, debidamente utilizados, son capaces de ejercer su función como elemento constructivo sin efectos nocivos para el medio ambiente. Cabe citar, entre otros, las cenizas volantes de central térmica, residuos de construcción y demolición (RCD) procedentes de hormigón, escorias de horno eléctrico y escorias negras de horno eléctrico. Pero además de la adecuación técnica y ambiental, los residuos deben ser aprovechados buscando la utilización óptima para cada uno, siguiendo una jerarquía de usos de mayor a menor valor. Por ello, en la práctica, muchos de estos residuos apenas se utilizan en terraplenes porque pueden ser aprovechados en otros usos de mayor valor. En terraplenes terminan empleándose los residuos de menor calidad, porque las exigencias técnicas son menores que para otros usos o partes de la carretera.

Tabla 2. Materiales marginales naturales más comunes y sus principales características

| Materiales marginales naturales: Principales características | | |
|--|--|---|
| Tipo de material | Propiedades principales | Foto |
| Suelo colapsable | Asiento > 1% a 0,2 Mpa |  |
| Suelo expansivo | Hinchamiento libre > 3% |  |
| Suelo con yeso | Alto contenido en yeso. Susceptible al agua. |  |
| Suelo con sales solubles | Contenido en sales solubles > 1% Susceptible al agua. |  |
| Suelo con materia orgánica | Alta deformabilidad. Alta degradabilidad. Elevada humedad. |  |

Tabla 3. Zonas de colocación de los distintos materiales naturales marginales según el vigente PG-3 (Orden FOM/1382/2002)

| Materiales marginales naturales: Zonas de colocación | | | | | |
|--|---------------------------|---------------------|------------|----------------------|---------------------|
| Suelo marginal | Principal característica | Coronación | Espaldones | Núcleo | Cimiento |
| Suelo colapsable NLT 254 y UNE 103500 | Asiento > 1% a 0,2 MPa | NO | NO | Estudio especial | Estudio especial |
| Suelo expansivo UNE 103601 y UNE 103500 | H.L. > 3% | NO | NO | SÍ, si H.L. < 5% | SÍ, si H.L. < 5% |
| Suelo con yesos NLT 115 | Yeso: 0,2-2% | NO | NO | SI | NO |
| | Yeso: 2-5% | NO | NO | SI, con precauciones | NO |
| | Yeso: 5-20% | NO | NO | SI, con precauciones | NO |
| | Yeso: >20% | NO | NO | NO | NO |
| Suelo con otras sales solubles NLT 114 | Sales: 0,2-1% | NO | NO | SI | NO |
| | Sales >1% | NO | NO | Estudio especial | NO |
| Materia orgánica UNE 103204 | H ≤ 5 m y M.O. ≤ 5% | SÍ, si M.O. < 1% | NO | SI | NO |
| | H ≥ 5 m y M.O. > 2% | SÍ, si M.O. < 1% | NO | Estudio especial | NO |

H.L.: hinchamiento libre; H: altura del terraplén; M.O.: contenido de materia orgánica.

Tabla 4. Observaciones en relación a la puesta en obra de los distintos materiales naturales marginales según el vigente PG-3 (Orden FOM/1382/2002)

| Materiales marginales naturales: Puesta en obra | | |
|---|--------------------------|--|
| Suelo marginal | Principal característica | Observaciones |
| Suelo colapsable NLT 114 y UNE 103500 | Asiento > 1% a 0,2 MPa | -1% wopt < w < 3% wopt. Deben compactarse del lado húmedo. |
| Suelo expansivo UNE 103601 y UNE 103500 | H.L. > 3% | -1% wopt < w < 3% wopt. Deben compactarse ligeramente del lado húmedo. Se prefiere el PN como Próctor de referencia. |
| Suelo con yesos(*) NLT 114 | 0,2-2% | No es necesario adoptar ninguna precaución especial en coronación y espaldones. |
| | 2-5% | Adopción de cuidados y materiales de características especiales en coronación y en los espaldones, explícitamente indicados en el Proyecto. Estudiar la expansividad y la colapsabilidad. |
| | 5-20% | El núcleo debe constituir una masa compacta e impermeable. Medidas de drenaje e impermeabilizaciones para impedir la entrada de agua. Justificar la eficacia de las medidas adoptadas mediante estudio especial. Estudiar la expansividad y la colapsabilidad. |
| | >20% | Posible uso si se justifica convenientemente en Proyecto. |
| Suelo con otras sales solubles NLT 114 | 0,2-1% | No es necesario adoptar ninguna precaución especial en coronación y espaldones. |
| | >1% | Se requiere un estudio especial. |
| Materia orgánica UNE 103204 | H ≤ 5 m y M.O. ≤ 5% | Deben considerarse en el Proyecto las deformaciones previsibles. |
| | H ≥ 5 m y M.O. > 2% | Se requiere un estudio especial. |

(*) Se de tener en cuenta la posible agresividad de estas sales al hormigón y la posible contaminación a terrenos colindantes.

H.L.: hinchamiento libre; H: altura del terraplén; M.O.: contenido de materia orgánica.

Tabla 5. Propiedades de los materiales tipo residuo, recogidas en el catálogo de residuos para su uso en rellenos

| Materiales tipo residuo: Principales características | | |
|--|--|--|
| Tipo de material | Propiedades principales | Foto |
| NFU (troceado) | Tamaño residuo troceado: 75 y 350 mm Densidad del NFU sin compactar: 150 y 535 kg/m ³ Densidad del NFU compactado: 630 y 840 kg/m ³ Alta elasticidad y elevada resistencia al corte Permeabilidad similar a las arenas: 5×10^{-2} cm/s.. Poco compactable. Absorbente de vibraciones; Metales pesados < 0,1%. Resistencia a la acción de los mohos, calor, humedad, luz solar y rayos ultravioletas, No biodegradables ni tóxicos y sin desarrollo bacteriológico. |  |
| Estériles de carbón: negros y rojos | Estériles negros: Baja plasticidad, incluso nula. Granulometría Continua: <5% inf.0,08mm Densidad: 2,70-2,73 t/m ³ y CBR: >50 Proctor Modificado: >1,9 t/m ³ y Humedad óptima: 10,2%-15,5% Alta degradabilidad bajo presiones elevadas. |  |
| | Estériles rojos: Plasticidad: LL: 26-20 y LP: 19-20 Granulometría Continua: <5% inf.0,08mm Densidad: 2,74 t/m ³ y CBR: <20 Proctor Modificado: 1,9 – 2,1 t/m ³ Humedad óptima: 7%-10% Alta degradabilidad bajo presiones elevadas |  |
| RCD: Hormigón y mixtos | Características dependientes de origen cerámico u hormigón Tratamiento en plantas similares a los de áridos naturales. Áridos mixtos: Absorción 6-25%, Densidad; 1,2-1,8 t/m ³ , DLA: 20-50%. Áridos de hormigón: Absorción 5-15%, Densidad; 2,1-2,6 kg/dm ³ , DLA: bajos Áridos mixtos presencia de yeso. Heterogeneidad. Áridos de hormigón: presencia de cloruros (procedencia marina). Necesaria eliminación de armaduras y no se puede estabilizar con ligantes hidráulicos. |  |

PM: Proctor Modificado; wop: humedad óptima.

Tabla 6. Observaciones para la puesta en obra de materiales de tipo residuo

| MATERIALES TIPO RESIDUO: Puesta en obra | | |
|---|---|---|
| Tipo de material | Principal característica | Observaciones |
| NFU (troceados) | Baja densidad <0,8 kg/cm ³ compactado | Los áridos de hormigón tienen usos de mayor valor. se emplean en capas de firme. Sólo se pueden colocar en el núcleo El espesor de las capas de NFU no debe ser mayor de 3 m. Envolver los NFU en geotextil para evitar la percolación de partículas de suelo entre las tiras de NFU. Los alambres expuestos de los NFU y sus tamaños serán los correspondientes a los de un material Tipo B (Clase II) de la Norma ASTM D6270-08e1. Las mezclas de NFU con suelo son las fabricadas con el 50% en volumen de ambos materiales. Las capas intermedias de material térreo que hacen refuerzo estructural deben tener un espesor mínimo de 1 m y estar exentas de materia orgánica. Los espaldones del relleno deben asegurar la impermeabilidad ante el agua o aire, y tener anchura suficiente para su adecuada compactación. La capa de coronación ha de minimizar la infiltración del agua de lluvia hacia las capas de NFU. |
| Estériles de carbón: negros y rojos | Posibilidad de autocombustión de los estériles negros | Compactación con la W_{op} o algo inferiores Hacer un buen estudio del número de pasadas necesarias para la correcta compactación. Los áridos de hormigón tienen usos de mayor valor. se emplean en capas de firme. Exceso de pasadas provoca la degradación del material. Espesores de tongada inferiores a 50-60 cm. No utilizar estéril negro en zonas inundables. Deben eliminarse los fragmentos pizarrosos. |
| RCD: Hormigón y mixtos | Presencia de yeso en áridos mixtos. Heterogeneidad | Los áridos de hormigón tienen usos de mayor valor. se emplean en capas de firme. Limitación del contenido de áridos reciclados cerámicos. Mayor aportación de agua durante la compactación por su elevada absorción. Eliminación de impurezas (vidrios, plásticos...). Control del contenido en materia orgánica. Control del contenido en yeso y otras sales solubles. Los áridos reciclados lavados con agua presentan menor proporción de yeso. |

Tabla 7. Propiedades de algunos materiales ligeros (IDAE 200, Weber 2006.)

| Materiales ligeros: Principales características | | |
|---|---|---|
| Tipo de material | Propiedades principales | Foto |
| Arlita | Baja densidad: 325-750 kg/m ³ . Transmite poca carga. Resistente a la compresión. Resistente al fuego. No se degrada Ángulo de rozamiento: 37°. Cohesión nula. |  |
| Poliestireno expandido | Baja densidad: 10-35 kg/m ³ . Transmite poca carga. Deformabilidad varía con la temperatura Resistencia a flexión: 50-750 kPa. Absorción <5% No se ve afectada por agentes externos |  |

Tabla 8. Observaciones para la puesta en obra de materiales ligeros

| Materiales ligeros: Puesta en obra | | |
|------------------------------------|--|--|
| Tipo de material | Principal característica | Observaciones |
| Arlita | Densidad: 325-750kg/m ³ Ángulo de rozamiento:37° | La base sobre la que se coloca la arlita debe estar recubierta por un geotextil. El espesor máximo de la tongada de arlita es de 1 m. La compactación de la tongada se realiza con maquinaria convencional montada sobre orugas. Se deben realizar 4 pasadas. Se sella el conjunto de arlita con un geotextil. El espesor del paquete de firme superior debe ser de al menos 60 cm. |
| Poliestireno expandido | Elevada resistencia a compresión y muy ligero | Aplicable a terrenos con baja capacidad portante sobre los que se quiera construir el terraplén o de acceso a estructuras.  |

Dentro de este grupo se han considerado para este estudio los siguientes residuos: Neumáticos fuera de uso (NFU), Estériles de carbón y Residuos de demolición y construcción mixtos (RCD mixtos). Las características de todos ellos han sido ampliamente estudiadas (Catálogo de residuos, 2002 y actualización 2013 IDAE 2007) y se han llevado a cabo algunas experiencias prácticas en España empleándose como materiales para terraplén (NFU: Botello et al 2008, Botello y Guedella 2009, Condori Rivera 2009, Estaire Gepp y Rodríguez Abad 2009, Cano Linares et al 2010, Rodríguez Abad et al 2010; Estériles de carbón: Burgueño Muñoz 2009, González Cañibano et al 1986; RCD: Celemín Matachana et al 2004, Hortigüela 2009, Bocchino 2010). Cabe recordar que como la norma española, a diferencia de otras normativas europeas, no hace referencia a ningún residuo para su posible empleo como material de construcción de terraplenes para cada experiencia de aplicación ha sido necesario llevar a cabo estudios especiales justificando la adecuación del residuo empleado.

Las principales características específicas de los distintos residuos para su uso en rellenos se recogen en la tabla 5, (Catálogo de residuos 2002; actualizado 2014).

En relación con los aspectos condicionantes, particularidades y posibles precauciones de puesta en obra de los distintos tipos de residuos considerados se han extraído de las diferentes experiencias revisadas y se han sintetizado en la tabla 6.

3.2.2. Materiales ligeros

Dentro del tercer grupo se incluyen los materiales denominados como ligeros, que son aquellos que se caracterizan por tener un peso específico inferior al del suelo

natural. Entre ellos se pueden destacar, por ejemplo, la Arlita o arcilla expandida y el Poliestireno expandido. Son materiales de fabricación industrial de amplio uso y que por su ligereza pueden ser incorporados en la construcción de rellenos, cuando interese reducir las presiones transmitidas al terreno natural, así como la geometría de la propia sección del terraplén.

Las características específicas de estos materiales se presentan en la tabla 7 (IDAE 2007, Weber 2006.).

En relación a las condiciones de puesta en obra y posibilidades de empleo de los materiales ligeros la norma tampoco recoge ninguna indicación. Por ello, se han extraído de las experiencias españolas revisadas los aspectos más relevantes y se han sintetizado en la tabla 8, señalando su empleo exclusivo en el núcleo del terraplén.

4. EXPERIENCIAS DE EMPLEO DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES MARGINALES EN RELLENOS EN TERRAPLEN EN ESPAÑA.

El interés del presente estudio se ha centrado en una extensa búsqueda bibliográfica de casos de aplicación de materiales marginales, residuos y materiales ligeros en rellenos en terraplén, en obras realizadas en España.

En total, se han encontrado documentadas o publicadas 24 experiencias, de las cuales 13 corresponden a materiales marginales naturales, expansivos y yesíferos, 8 a distintos tipos de residuos, NFU, RCD y estériles de carbón y 3 a materiales artificiales ligeros, arlita y poliestireno expandido. No obstante, se tiene conocimiento de otros casos de aplicaciones pero, al no estar documentados o

Tabla 9. Tabla resumen con las particularidades de los materiales marginales naturales empleados en terraplenes

| Materiales marginales naturales: Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | | |
|--|---|---|---------------------------------------|--|---------------------|---|--|--|
| Obra | Problemática | Características geométricas del terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados Comportamiento posterior | Observaciones |
| A-23. Villanueva de Gállego-Zuera (Zaragoza). Puesta en servicio en 1998. Fuente: Rivera Blasco (2005a). | Materiales yesíferos en trazado con alto contenido en sulfatos y baja densidad. Tensiones admisibles 1-4 kg/cm ² . | H _{max} = 14 m. Taludes 3/2. Espaldones 2,5 m espesor. | Yesos blancos y grises | Sulfatos > 20%. Tensiones admisibles: 2-4 kp/cm ² . | Núcleo | > 1m bajo coronación. > 30cm sobre terreno natural. Geomembrana impermeable bajo coronación. Tongadas de 25 cm (tamaño máx. material=2/3). Compactación con pata de cabra. | Sin datos | Imprescindible que el agua no penetre en el núcleo. Necesario recompactación de los limos de fondo de valle |
| Autovía del Olivar: Tramo Oeste de Baeza-enlace Norte de Puente del Obispo (Jaén). Adjudicación de la obra 2009. Fuente: Ramírez Rodríguez y García Santiago (2013). | Margas grises de baja capacidad portante, hinchamientos altos y baja densidad tras compactación. | | Margas grises | HL=3,38% Densidad=1,48 g/cm ³ | Cimiento | Tramo 1: Tratamiento con 1%cal+4% escorias de biomasa Tramo 2: Tratamiento con 1%cal+1% ceniza de central térmica Tramo 3: Tratamiento con 2%cal Tramo 4: Tratamiento con 1%cal+2% ceniza de central térmica | Solución adoptada más cercana a la de proyecto que cumpla con los requisitos | En Proyecto estaba previsto estabilizar tongadas de 30 cm, que después de compactadas con rodillo liso debían cumplir: CBR≥6 Dens. Seca ≥95% PM IP<15 |
| Z-40. Tramo: Ronda Sur de Zaragoza (Zaragoza). Puesta en servicio 2003. Fuente: Rivera Blasco (2005b). | Materiales yesíferos en trazado con alto contenido en sulfatos | H _{max} = 12 m. Taludes 3/2. Espaldones 4 m espesor. | Yesos alabastrinos y margas yesíferas | Sulfatos > 20%. Buena capacidad portante | Núcleo; Espaldones. | > 0,5m bajo coronación Geomembrana impermeable bajo coronación (solape 30 cm) Tongadas 40cm (tamaño máx. material=2/3) Compactación con pata de cabra | Sin datos | Trazado con limos y arcillas yesíferos de fondo de valle que se eliminaron en vertedero y se sustituyeron por material granular. Control exhaustivo de asentos (no hay datos). |
| Autovía de la ruta del Toro (Cádiz). Puesta en servicio entre 2004 y 2006. Fuente: Atienza Díaz (2007). | Margas y arcillas margosas muy plásticas y expansivas | | Margas y arcilla margosa. | IP ≈ 22 HL ≈ 5% | Núcleo | Estabilización con cal viva (2%) en tongadas de 30 cm máximo | El IP se reduce desde 20-23 hasta 5-10. El CBR del material estabilizado aumenta desde 1-3 hasta 18-55 a los 7 días. El hinchamiento se reduce de un valor medio de 5% al 1% | |

Continúa en la página siguiente.

| Materiales marginales naturales: Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--------------------------------------|--|--|---|
| Obra | Problemática | Características geométricas del terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados Comportamiento posterior | Observaciones |
| Tramo I de la M-45 (Madrid). Puesta en servicio 2002. Sahuquillo et al. (2002); Oteo Mazo (2007) | Presencia de sepiolita y limos de alta plasticidad en trazado | Núcleo de peñuela encapsulada, espesor < 3m Para espesores > 3m: separar cápsulas con 1 m min de material) Espaldón: 4 m Cimientado y coronación: 1 m | Peñuela | Valores medios: Finos: 77,5% LL: 83,7 IP: 39,1 Dens. Seca: 1,24 t/m ³ Dens. ap: 1,73 t/m ³ Humedad opt: 38,4 Hinchamiento CBR: 5,42% | Núcleo | Eliminación de la sepiolita de las peñuelas Compactar del lado húmedo, con humedad + 2% Próctor Densidad seca entre 95 y 98 Próctor Densidad aparente mínima 1,7 t/m ³ Compactación con pata de cabra con 7 pasadas dobles y en tongadas de 30 cm | Densidad aparente a veces inferior a la exigida Grado de compactación > 95% Humedad próxima a la óptima Asiento medio de 3 mm Asiento máximo de 9 mm | Arcillas yesíferas no se usan por elevado contenido en sulfatos Limos de alta plasticidad no se usan por su baja densidad Peñuelas solo usarlas eliminando toda la sepiolita |
| Tramo II de la M-45 (Madrid). Puesta en servicio 2002. Fuentes: Domingo et al. (2000); Castanedo (2007); Oteo Mazo (2007). | Arcillas sepiolíticas de alta plasticidad | | Arcilla sepiolítica | Finos: 23-99,5% LL: 49-162% IP: 13-83 Dens. Seca: 0,7-1,10 t/m ³ Hinchamiento: pH: 0-1,7 kp/cm ² (medio: 0,69 kp/cm ²) | Núcleo; Espaldones; Cimientado | Estabilización con cal: 2,4% en espaldones y cimientado, 1,8% en núcleo Colocación del lado húmedo, w: +2 y +8 Próctor Compactación con pata de cabra | $E_{cs} > 100$ Mpa Dens. seca: 0,9 t/m ³ Espesor final tongada = 26 cm Ensayo huella (a las 24 horas) < 5 mm | Empleo cal apagada Regar con humedad: de -1 - +3 % por encima de la w_{opt} del material. Cimientado estabilizado in situ, 30 cm con 4,8% cal en M-50 y 3,5% cal en R-4. Resto: 25 cm con 4,5% cemento. |
| Autopista M-50 y R-4 (Madrid). Puesta en servicio 2007. Fuente: Simic (2007). | Suelo atravesado compuesto por 85% suelo marginal y 5% suelo inadecuado | Cimientado de 1 m Espaldones de 2,5 m de espesor con pendiente 2H:1V Última capa de núcleo de 0,6 m Cobertura vegetal en espaldones de 0,25 m | Arcillas yesíferas, peñuelas y arcillas esmectíticas | LL= 30-110% Humedad= 10-60% Densidad seca= 1-2t/m ³ | Núcleo | Tongadas de 30 cm. Compactación con rodillos de pisonos de alta velocidad con 6 pasadas dobles. Núcleo: adición de cal en 1%, compactación con pata de cabra al 98% PN Última capa de núcleo: adición de 2% de cal, compactación con pata de cabra al 98% PN Coronación: suelo estabilizado con 4,5% cal, compactado con rodillo liso al 98% PN | Deflexiones medidas en campo oscilan entre 1,15 y 1,2 mm. Resistencia a la compresión simple a 7 días mayor a 1,5 MPa. | Imprescindible la labor de la capas granulares que empaquetaban las arcillas para posibilitar el drenaje. |
| Autopista Bilbao-Behobia (Vizcaya/Guipúzcoa). Puesta en servicio 1974. Fuente: Rodríguez Miranda et al. (1986). | Empleo de materiales susceptibles al agua. | Vaguada del Caño C-348: 200 m de longitud y altura máxima de 35 m. Errotazar: 300 m de longitud y altura máxima de 17 m. | Material arcilloso | LL= 35 IP= 17,5 $D_{max} = 1,92$ g/cm ³ $w_{opt} = 12\%$ $w_{nat} = 22\%$ LL= 70 IP= 36 $D_{max} = 1,42$ g/cm ³ $w_{opt} = 27\%$ $w_{nat} = 30-45\%$ | Núcleo | Capas de arcilla de 2 m entre capas de material granular de 1 m. Donde la altura de terraplén era superior a 15 m, espaldón de escollera. Compactación de la arcilla con equipos sobre orugas y compactación de la escollera con rodillos vibratorios. Relleno tipo sándwich con capas arcillosas de 3 m de espesor entre capas de material granular de 1 m (calizas y calizas arcillosas sanas). Taludes 2H/1V. Para alturas superiores a 10 m escollera de pie. Coronación de 1,5 m de material granular. | Asiento de 15 cm en un tiempo de consolidación de 3 meses. El comportamiento posterior no ha presentado ninguna anomalía. | |

Continúa en la página siguiente.

| Materiales marginales naturales: Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | | |
|---|--|---|---|---|--------|--|-------------------------------------|--------------------------|
| Obra | Problemática | Características geométricas del terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados Comportamiento posterior | Observaciones |
| Variante de Alcalá de los Gazules (Cádiz). Puesta en servicio entre 2004 y 2006. Fuente: Rodríguez Ballesteros (sin fecha). | Arcillas muy expansivas | | Arcilla de Jimena | LL= 30-95 % LP= 15-45 % IP= 10-50 % | Núcleo | Eliminación de tamaños superiores a 80 mm. Tongadas de 40 cm de la arcilla de Jimena. Extendido de cal (2-3%) con solape entre pasadas de 15 cm. Compactación consiguiendo como mínimo el 95% de la densidad del PMI. | Sin datos | |
| CN-340 en Xàtiva (Valencia). Fuentes: Morilla (1994); Castanedo (2007). | Yesos y arcillas de plasticidad media con alto contenido de illita | | Yeso y arcilla | Arcilla: LL= 40 IP= 13 | Núcleo | Tongadas de 30 cm de espesor compactadas con rodillo vibrante o tongadas de 20 cm de espesor compactadas con pata de cabra. | Sin datos | Compactar del lado seco. |
| Variante de la carretera M-307 en San Martín de la Vega (Madrid) Fuente: Castanedo (2007). | La traza atraviesa materiales yesíferos | | Yeso masivo y cristalizado y yesos con intercalaciones arcosas. | | Núcleo | El yeso se coloca en forma de todo-uno en tongadas de 90 cm protegido por una lámina impermeabilizadora. | Sin datos | |
| Autopista Burgos-Máizaga (Burgos). Puesta en servicio 1977. Fuentes: Soriano (2002); Castanedo (2007). | Atraviesa materiales arcillosos con presencia de yesos. | Altura entre 3 y 30 m. | Material con matriz arcillosa | Matriz arcillosa con un % de yeso entre 30 y 40%. | Núcleo | Tongadas de 30 o 40 cm de espesor. Compactación del lado seco y con rodillo vibratorio. | Buen comportamiento posterior. | |
| Autovía en la zona de Venta de Baños (Palencia). Fuente: Oteo (1994). | Arcillas terciarias grisáceas, expansivas con algo de carbonatos. | | Arcilla terciaria grisácea | | Núcleo | Sección de tipo encapsulada, rodeando las arcillas con zahorras naturales con algo de finos (25-35 %) | Sin datos | |

Tabla 10. Tabla resumen con las particularidades de los residuos empleados en terraplenes

| Residuos: Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | |
|--|---|----------------------------|--|---------|---|--|--|
| Obra | Características geométricas I terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados comportamiento posterior | Observaciones |
| Duplicación de la carretera M-111 y Variante Fuente el Saz (Madrid). Construcción 2007. Fuente: Botello Rojas et al. (2008). | Long. tramo con NFU: 100m Altura max. = 7,5m Taludes 2H/1V Ancho de coronación: 8,8m | NFU | | Núcleo | 1º capa de NFU de 2 m de espesor y 105 m envuelta por geotextil. Capa de suelo de 1,2 m de espesor. 2º capa de NFU de 1,2 m de espesor envuelta por geotextil. Capa de suelo de 1,5 m de espesor. Compactación con rodillo de 10 t, presión de compactación de 2,9 MPa y 10 pasadas de compactador. | Densidad NFU tras compactación= 6,5 kN/m ³ Densidad suelo tras compactación= 18 kN/m ³ Temp. 1º capa NFU= 12,09ºC Temp. capa intermedia suelo= 13,66ºC Temp. 2º capa NFU= 19,02ºC Calidad agua en pozos: pH= 7,12 y temp. 16,7ºC Asientos= 2% altura total del relleno | La mayor parte de los asientos son producidos durante el proceso constructivo en un plazo de 2-3 meses. Presión transmitida 70% < a la que se transmitiría si se utilizase suelo en vez de NFU. |
| Experiencias del laboratorio de geotecnia del CEDEX en la ejecución de rellenos varios con NFU (Madrid). Informe 2010. Fuente: Rodríguez Abad et al. (2010). | | NFU | Dens. Seca: 0,42 t/m ³ | Núcleo. | 30 cm de espesor de suelo seleccionado. Tongada NFU de 40 cm espesor aprox. Se colocaron 4 tongadas. Compactación con rodillo liso vibratorio de 93 kN de peso, dando 4 pasadas. Velocidad de compactación= 1,5 km/h. | Asiento de 44,7 cm, es decir, 31,2%. Dens. Max= 0,84-0,91 t/m ³ . Mod. Dinámico en ensayo de placa de carga= 5,7 MPa | |
| | | NFU | Dens. Seca= 0,42 t/m ³ | Núcleo | 30 cm de espesor de suelo seleccionado. Tongada NFU de 40 cm espesor aprox. Se colocaron 3 tongadas. Compactación con bullóizer de 27 t, dando 3 pasadas. Velocidad de compactación= 3,6 km/h | Dens. Max= 0,72-0,91 t/m ³ . Mod. Dinámico en ensayo de placa de carga= 4,5 MPa | Maquinaria más adecuada para compactar tiras de NFU no mezclados y mezclados con suelos es el rodillo liso vibratorio. |
| | Banda de prueba | NFU+suelo seleccionado | Suelo seleccionado, sin finos, forma de las partículas angulosas y textura rugosa. | Núcleo | 30 cm de espesor de suelo seleccionado. Tongada NFU + suelo seleccionado de 40 cm espesor aprox. Se colocó una sola tongada. Compactación con rodillo liso vibratorio de 93 kN de peso, dando 1 pasada. Velocidad compactación= 1,5 km/h. | Asiento de 5,6 cm, es decir, 13,3%. | Densidad muy baja del relleno con NFU compactado. Puede ser ventajoso en muchas aplicaciones. Mezcla de NFU con suelo es más denso menos deformable y más compactable. |
| Autopista AP-46. Alto de las Pedrizas (Málaga). Puesta en servicio 2011. Fuente: Cano Linares et al. (2010). | | NFU+suelo marginal | Suelo marginal: LL= 49% LP= 33% IP= 19% g _{max} = 1,5 g/cm ³ w _{Opt} = 21,4% w _{Nat} = 24,4% | Núcleo | 30 cm de espesor de suelo seleccionado. Tongada NFU con suelo marginal de 40 cm espesor aprox. Se colocaron 3 tongadas. Compactación con rodillo liso vibratorio de 93 kN de peso, dando 3 pasadas. Velocidad de compactación= 1,5 km/h | Asiento de 23,2 cm, es decir, 19,75%. Dens. Max= 1,5-1,9 t/m ³ Mod. Dinámico en ensayo de placa de carga= 2,9 MPa | |
| | | NFU | | Núcleo | NFU en dos bloques separados por el mismo material que el cimienta. Compactación con rodillos lisos. | Sin datos | |

Continúa en la página siguiente.

| Residuos: Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | |
|--|--|----------------------------|--|--------|---|---|---|
| Obra | Características geométricas I terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados comportamiento posterior | Observaciones |
| Vía de servicio y enlaces San Isidro-aeropuerto Sur (Tenerife). Proyecto aprobado 1999. Fuente: Bortello Rojas y Guegella Bustamante (2008). | Long.: 65 m Alto: 20 m Anchura en coronación= 11,5 m | NFU | | Núcleo | Capa de suelo seguida de geotextil y una capa de un metro de espesor de NFU. Por encima capa de suelo. Para alturas mayores colocar sobre lo anterior geotextil+NFU+geotextil+capa suelo. | Asiento en capa inferior= 21 cm. Asiento en capa superior= 26 cm. Temperatura en capas de NFU= 17,5-19,5 °C | Gran parte de los asientos son debido al asiento de la cimentación (16 cm) |
| Autovía Cubillos-Torena (León). Fuente: Bargaño Muñoz. (2009). | Altura máxi.= 2 m | Estériles carbón | $C_u = 9$ (suelo poco uniforme) $C_c = 3,18$ (buena graduación) LL= 22,5% LP= 15,5% IP= 7% CBR= 14 Hinchariento= 0 Dens. max= 2 t/m ³ Hum. opt.= 7,9% Mat. Orgánica= 0 | Núcleo | Tongadas de 40 cm aprox. Compactador de rodillo vibratorio Tandem de 18 t. Mínimo 10 pasadas. | Las compactaciones alcanzaron una media del 100% de la densidad del Próctor Modificado. | |
| Polígono industrial de Riaño (León). Finalización 1985. Fuente: González Cañibano et al. (1986). | | Estériles carbón | % pasa tamiz 80= 95% % pasa tamiz 2= 30% % pasa tamiz 0,08= 5% Dens. max= 2,17 y 2,19 kg/dm ³ Hum. opt= 6,7-7% CBR= 10 Hinchariento nulo | | Tongadas de 70 cm aprox. | Densidad= 1,93-2,17 kg/dm ³ Humedad= 3,5-7,1% | Compactar el material con humedad óptima por debajo de éste en tongadas que no excedan los 50 o 60 cm de espesor, donde en cada tongada se debe realizar el escarificado del material antes de la colocación de la tongada siguiente. |
| Viales 4104 y 4099 en la localidad de Guadabajaque (Cádiz). 2002.(*) Fuente: Celemin Matachana et al. (2004). | | RCD | Dens. Seca= 1,77 t/m ³ Hum. Opt= 15% CBR= 22 Hinchar. nulo | | | Buen comportamiento posterior. | |
| Puerto de Barcelona (Barcelona). 2009.(*) Fuente: Hortigüela (2009). | | RCD | Granulometría de todo-uno con fracción 20/70 mm | | Tongadas de 30 cm de espesor compactadas con 6 pasadas de rodillo liso vibratorio. | Ev2= 155,17 MN/m ² Ev2/Ev1= 1,83 | Buen comportamiento posterior |

(*) Estos dos casos de rellenos con RCDs no son terraplenes viarios; No obstante, se ha considerado interesante incluir la información disponible.

Tabla 11. Tabla resumen con las particularidades de los materiales ligeros empleados en terraplenes

| Materiales ligeros : Resumen y principales características de los casos revisados | | | | | | | | |
|---|--|---|-----------------------------|--|--------|---|---|--|
| Obra | Problemática | Características geométricas del terraplén | Material marginal empleado | Características relevantes de los materiales | Zona | Disposición realizada | Resultados Comportamiento posterior | Observaciones |
| Urbanización PGOU de Zaragoza, Urbanización plaza de la estación (Zaragoza). Adjudicación 2005. Fuente: Weber (2006). | Posibles sobrecargas por nueva construcción | | Arcilla expandida (arilita) | Granulomet: 8-16 mm Dens. Seca: 325 kg/m ³ Dens. In situ= 500 kg/m ³ Dens. Sat.: 650 kg/m ³ CBR= 11 Ángulo rozamiento= 35° Cohesión nula | Núcleo | Tongadas de 60 cm compactadas con 4-5 pasadas de bulldózer transmitiendo una presión de 4 t/m ² . Material envuelto por geotextil | Buen comportamiento posterior. | Se redujo la carga transmitida en un 75%. |
| Reparación de asientos diferidos en trasdós de estribo de viaducto Barakaldo (Vizcaya). Proyectado en 1999. Fuente: Weber (2006). | Zona de suelos blandos. Debido a imposibilidad de ejecución de cimentación profunda, necesidad de reducir cargas transmitidas. | Cuña de 0 a 4,8 m con 16 m de anchura | Arcilla expandida (arilita) | Granulometría= 8-16 mm Dens. Seca= 325 kg/m ³ Dens. In situ= 500 kg/m ³ Dens. Saturada= 650 kg/m ³ CBR= 11 Ángulo rozamiento= 35° Cohesión nula | Núcleo | Núcleo de arlita envuelto por geotextil de 200 g/m ² . Núcleo 60 cm por debajo de la coronación. Capas de 50 cm de espesor compactadas con pala de orugas que transmitía al terreno una presión de 4 t/m ² . Se daban 4-5 pasadas | Elevada capacidad portante. Buen comportamiento posterior. | Se redujo la carga transmitida en un 70%. |
| Variantes del Puerto de Santa María y Puerto Real (Cádiz). Proyecto licitado 1993. Fuente: Delgado et al. (1996). | Atravesar zona de marisma. Necesidad de tratamientos especiales o reducción de la carga transmitida. | | EPS | | Núcleo | Cuña formada por bloques de EPS colocados sobre capa de suelo seleccionado de 1 m de espesor. Sobre la cuña de EPS 1,5 m de espesor de suelo seleccionado. | Sin datos | Gran reducción de las cargas transmitidas. |

publicados, no se ha podido tener acceso a la información. Todo este trabajo ha sido recopilado como parte de una tesina del Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cementaciones del CEDEX (Urreta Jainaga 2013). En dicha tesina se recogen y describen más detalladamente todos los casos analizados.

Cada uno de los casos ha sido revisado detalladamente; analizando, sintetizando y extrayéndose los aspectos más relevantes en relación con las particularidades de los materiales empleados, los aspectos de puesta en obra y disposición de los materiales y el comportamiento posterior técnico y medioambiental. Asimismo, se ha pretendido identificar cuáles han sido los tratamientos que han dado buenos resultados para poder tenerlo en cuenta en futuras actuaciones, aunque, en relación con este último aspecto son muy pocos los casos que mencionaban esta información.

El resultado de este análisis se ha recogido en tablas, con el fin de que los datos relevantes quedasen reflejados de una forma cómoda y global de visualizar. Se presenta una tabla para cada uno de los grupos de nuevos materiales considerados (tabla 9 para los materiales marginales naturales, tabla 10 para los residuos y tabla 11 para los materiales ligeros).

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido hacer un balance de un gran número de actuaciones realizadas desde que la nueva redacción del artículo 330 del PG-3 en el año 2000 posibilitó el empleo de materiales marginales naturales, artificiales y residuos en rellenos en terraplén.

La información sobre las 24 experiencias de obras revisadas, se ha analizado, sintetizado y presentado en tablas, recogiendo los aspectos relativos a la problemática y particularidades de los diferentes materiales, las soluciones adoptadas para su disposición en las distintas partes del terraplén, y a los tratamientos empleados, identificando en algunos casos los que han dado buenos resultados o han mostrado un comportamiento posterior adecuado.

Como conclusiones más relevantes del estudio se presentan las siguientes:

- El hábito de emplear materiales marginales y residuos para la construcción de terraplenes se está extendiendo en España pero todavía no es una práctica muy habitual. No existen muchos casos documentados y tampoco existen guías o recomendaciones técnicas de aplicación que pudieran ayudar a fomentar su uso.
- El empleo de estos nuevos tipos de materiales se limita en la gran mayoría de los casos al núcleo del terraplén.
- La práctica más extendida en España para el empleo de materiales marginales expansivos se realiza mediante su estabilización con adición de cal. Para su aprovechamiento en núcleo de terraplén, en la mayoría de las experiencias revisadas se ha visto que el porcentaje de cal añadido está en torno al 2%. Si se emplea en espaldones o cimientos los porcentajes son algo más elevados, en torno al 2,4%.

En el caso de empleo de materiales arcillosos, yesíferos o no, la compactación se realiza habitualmente mediante compactadores de pata de cabra, con un espesor medio de tongada de 30 cm.

Los residuos que se han utilizado en rellenos en España de los que se ha podido extraer información son: los "Neumáticos Fuera de Uso troceados (NFU)" troceados, los estériles de carbón y los "Residuos de Construcción y Demolición (RCD)".

Los NFU troceados, debido a su forma y tamaño son materiales difíciles de compactar pero, se pueden compactar con rodillo liso vibratorio en tongadas de 40 cm, con un número de pasadas del orden de 8 a 10, algo mayor que para otros materiales.

Los RCD y los estériles de carbón se compactan bien con 6 pasadas de rodillo liso vibratorio y tongadas de 30 cm.

Sin embargo, actualmente, los RCD procedentes de hormigones no se emplean en rellenos, ya que tienen usos

Tabla 12. Aspectos más destacables de la puesta en obra realizada en las obras revisadas de materiales marginales, residuos y materiales ligeros en terraplenes viarios

| Característica marginal | Materiales | Zonas del terraplén | Compactación | | | Tratamiento |
|---|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--|------------------------------|--|
| | | | Espesor de tongada (cm) | Tipo compactador | Observaciones | |
| Materiales con elevado contenido de sulfatos | Materiales yesíferos | Núcleo | 25-40 | Pata de cabra | - | Envuelto en geotextil impermeabilizante |
| Materiales de elevado hinchamiento | Arcillas y margas arcillosas | Núcleo, cimientos y espaldones | 30 | Pata de cabra | Compactación del lado húmedo | 2% cal núcleo 2,4 % cal en cimientos y espaldones |
| Residuo | NFU | Núcleo | 40 | Rodillo liso vibratorio | 8-10 pasadas de compactador | - |
| Posibilidad de contener elevado contenido de sulfatos | RCD | - | 30 | Rodillo liso vibratorio | 6 pasadas de compactador | - |
| Material ligero | Arcilla expandida | Núcleo | 50-60 | Compactador sobre orugas, transmitiendo 4 t/m ² . | 4-5 pasadas de compactador | Envuelto en geotextil |
| Residuo | Estériles de carbón | Núcleo | 40-70 | Rodillo liso vibratorio | 10 pasadas de compactador | - |

de mayor valor. Los RCD mixtos de procedencia cerámica tienen una composición heterogénea y deben ser tratados previamente para su valorización, adecuando su granulometría y eliminando los impropios (madera, hierro, vidrio, etc.) así como los componentes con sulfatos y sales solubles; este último tratamiento no resulta a priori viable económicamente lo que ha limitado su empleo hasta la fecha.

De acuerdo con las dos experiencias recopiladas, la arcilla expandida se puede colocar en tongadas de 50-60 cm y compactarla con 4-5 pasadas de compactador sobre orugas transmitiendo una presión de 4 t/m².

Un buen método para la compactación de materiales de vertedero es la de la compactación dinámica.

En la tabla 12 se resumen los aspectos más destacables en relación a la puesta en obra en terraplenes viarios de los materiales marginales, residuos y materiales ligeros considerados en las experiencias prácticas revisadas.

6. AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean agradecer a D. Arkaitz Urreta Jainaga su aportación a estos trabajos con la recopilación de casos desarrollada en su tesina de Máster, así como a D. Álvaro Parrilla Alcaide por la documentación facilitada.

Asimismo, las autoras agradecen al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo.

7. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA Y DE REFERENCIA

Alaejos, P. y Calvo, B. "Construcción sostenible. Primeras experiencias en España. Cátedra Mariano López Navarro. Universidad de Zaragoza. 2010.

Atienza Díaz, M. (2007). Estabilización de terraplenes en la Ruta del Toro. La estabilización de los materiales con cal y el desarrollo sostenible. *II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

- Bocchino, E. (2010). Aplicación de residuos de construcción y demolición en obras de carretera. (Tesina) Master en Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica 2010. Madrid.

Botello Rojas, F. y Guedella Bustamante, E. (2009). Utilización de NFU troceados en terraplenes: vía de servicio y modificación de enlaces San Isidro-Aeropuerto Sur (Tenerife). *Jornadas de Construcción Sostenible y Reciclaje de Residuos*. Universidad de Zaragoza.

Botello Rojas, F., Guegella Bustamante, E., Domingo Ayuso, A. y Del Amo Sanz, E. (2008). Empleo de neumáticos fuera de uso (NFU) triturados como relleno de terraplén: aplicación en la obra Duplicación de la carretera M-111 y Variante de Fuente el Saz. *Rutas nº127*.

Burguillo Muñoz, A. (2009). Utilización de materiales procedentes de la industria minera en la autovía Cubillos-Toreno. *Jornadas de Construcción Sostenible y Reciclaje de Residuos*. Universidad de Zaragoza.

Cano, H., Rodríguez, R. y Estaire, J. (2010). *Experiencias del laboratorio de geotecnia en la ejecución de rellenos viarios con neumáticos fuera de uso (NFU)*.

Castanedo, F.J. (2007). Metodología para el encapsulado y estabilización de yesos. *II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

CEDEX-MAGRAMA. (2002). *Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Actualizado 2014*. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/catalogo.aspx>. Última actualización de la web 2013.

Celemín Matachana, M., Cano Linares, H. y de la Oliva García, J.L. (2004). Valorización de los residuos de la construcción y demolición (RCD) mediante su aprovechamiento en la construcción de un terraplén en Guadabajaque (Cádiz). *Simpósio sobre Geotecnia Ambiental y Mejora del Terreno*. Valencia.

Condori Rivera, E. (2009) *Uso de NFU troceados en obras de geotecnia*. Tesina del Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica. 2009, Madrid.

Delgado, J.M., Oteo Mazo, C., Sopeña Mañas, L., Burbano Juana, G. y Bolinaga, F.J. (1996). Los tratamientos de las marismas del Puerto de Santa María y Puerto Real. *Revista de Obras Públicas*, Nº 3354.

Domingo, A., Olías, I., Torroja, J., Castanedo, F. J. y Oteo, C. (2000). Metodología y estudio de la reutilización, con tratamiento de cal, de materiales arcillosos clasificables como marginales e inadecuados en la M-45 de Madrid. *Simpósio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte*. Barcelona.

Estaire Gepp, J. y Rodríguez Abad, R. (2009). *Relleno de terraplenes construidos sobre suelos blandos con NFUs*. Informe del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX. Madrid.

EUROSLAG-EUROREFER. (2012) *Position paper on the status of ferrous slag complying with the Waste Framework Directive (Articles 5/6) and the REACH Regulation*. Abril 2012.

García de la Oliva, J. L. y Valerio Conde, J. (2007). Caracterización del comportamiento de un relleno todo-uno de difícil puesta en obra. *II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

Gonzalez Cañibano, J., García García, M. y Fernandez Valcarce, J.A. (1986). Empleo de los estériles del carbón en la construcción de terraplenes y rellenos. *Simpósio sobre terraplenes, pedraplenes y otros rellenos*. Madrid.

González Tejada, I., Olalla Maraño, C., Romana García, M., Cimaedevila Salcines, A., y García Fernández, V. (2010). *Uso de materiales yesíferos en rellenos de infraestructuras viarias. Rutas, nº137*.

Hortigüela, R. P. (2009). *Formación de explanadas con áridos reciclados en zonas portuarias*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña.

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). (2007). *Soluciones con Aislamiento de Poliestireno Expandido (EPS). Guía técnica para la Rehabilitación de la envolvente térmica de los Edificios*. Madrid.

Morilla, I. (1994). Propuesta de utilización de materiales yesíferos del triásico en el proyecto de terraplenes. *III Simposio Nacional de Geotecnia Vial*. Vigo. Asociación técnica de carreteras.

Oteo Mazo, C. (1994). Reglas generales de proyecto. *III Simposio Nacional de Geotecnia Vial*, Vigo.

Oteo Mazo, C. (2007). Estabilización y refuerzo de materiales marginales *II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

Pardo de Santayana, F. (2004). Materiales no convencionales y residuos de posible utilización en terraplenes. *Comunicación en el "Seminario de valorización de residuos en obras geotécnicas"*, LNEC y Universidad do Minho.

Pardo de Santayana, F. (2006). Aprovechamiento de residuos. *Jornadas sobre Geotecnia y Medio Ambiente*. Sevilla.

Parra Arroya, V. H. (2012). *Utilización de materiales locales y especiales en terraplenes de carretera. Estudio de la utilización en diferentes partes del mundo. Estudios llevados a cabo para el*

pleo de materiales marginales. (Tesina del Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica). Madrid.

Parrilla Alcaide, A. (2007). *Materiales marginales en el PG-3". II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

Parrilla Alcaide, A. y Perucho Martínez, A. (2014). Optimal use of marginal materials in accordance with Spain's PG3 Standard. *Routes-Roads*, N° 362.

Perucho Martínez, A. (2013). Use of marginal materials in road embankments in Spain. *Technical Committee 4.4 Earthworks and unpaved roads, issue 4.4.1: Optimal use of local materials in Earthworks*. Brussels.

PIARC-AIPCR. (1989). Marginal materials-State of the art.

PIARC-AIPCR. (1991). Testing of marginal materials.

PIARC-AIPCR. (2007). Promoting use of local materials.

PIARC-AIPCR. (2012). Innovative approaches towards the use of locally available natural marginal materials.

Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, PG-3, Orden FOM/1382/2002. (2002)

Ramírez Rodríguez, A. y García Santiago, J. L. (2013). Estabilización de suelos marginales mediante el empleo de cenizas en la autovía del Olivar: tramo enlace oeste de Baeza-enlace Norte de Puente del Obispo (Jaén). *Carreteras* N° 187.

Rivera Blasco, I. (2005). Terraplenes con yesos en la autopista A-23. Tramo Villanueva de Gállego-Zuera. Provincia de Zaragoza. *Jornada sobre experiencias en el uso de materiales marginales en obras de carretera*. Madrid.

Rivera Blasco, I. (2005). Terraplenes con yesos en la Z-40. Tramo Ronda Sur de Zaragoza. *Jornada sobre experiencias en el uso de materiales marginales en obras de carretera*. Madrid.

Rodríguez Ballesteros, F. *Empleo de suelos marginales arcillosos en núcleos de terraplenes (variantes de Aguilar y de Alcalá de los Gazules)*.

Rodríguez, R., Cano, H. y Estaire, J (2011). Terraplén experimental construido con neumáticos troceados. *Jornada Técnica sobre Experiencias recientes en estructuras de Tierra para Infraestructuras Viarias*. Madrid, febrero 2011.

Rodríguez-Miranda, M. A., Pascual Pastor, F y Bobet Rivas, A. (1986). Diseño, construcción y comportamiento de rellenos tipo "sándwich" en la autopista Bilbao-Behobia. *Simposio sobre terraplenes, pedraplenes y otros rellenos*. Madrid.

Romero. E. (2006). *Residuos de construcción y demolición*. Máster en ingeniería ambiental, 2006-2007.

Sahuquillo Moragón, E., Carretero García, I. y Díez Rubio, F. (2002). Empleo de suelos marginales en el tramo I de la M-45 de Madrid. *Rutas* N°88.

Santamaría Arias, J. (2000). Principales Innovaciones. Ministerio de Fomento. *Jornadas de presentación de la O.C. 326/00 (PG-3 Geotecnia vial)*. Madrid.

Simic, D. (2007). Experiencias del tratamiento con cal en las autopistas M-50 y R-4. *II Jornada sobre materiales marginales en obras viarias*. Sevilla.

Soriano, A. (2002). Los materiales yesíferos en la construcción de terraplenes. *Jornadas sobre los suelos marginales en la construcción de Obras Lineales, INTEVI*. Sevilla.

Urreta Jainaga, A. (2013). *Utilización de materiales locales y especiales en terraplenes en España. Recopilación de casos. Datos geotécnicos y de ejecución*. (Tesina del Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica). Madrid.

WEBER (2006). *Aplicaciones geotécnicas arlita Leca*.

Las Medidas Naturales de Retención de Agua: del diseño a la implementación a través de proyectos europeos

Natural Water Retention Measures (NWRM): from Design to Implementation through European Projects

Fernando Magdaleno Mas^{1*}, Gonzalo Delacámara Andrés²

Palabras clave

servicios ecosistémicos;
infraestructuras verdes;
restauración ambiental;
proyectos europeos;
CETA;

Resumen

El Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX ha trabajado, durante los últimos años, en diversos proyectos europeos relacionados con el diseño e implementación de medidas naturales de retención de agua. Se trata de un conjunto de medidas impulsadas por la Unidad de Agua de la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea, relacionadas con el concepto de las infraestructuras verdes, que intentan integrar, desde el enfoque de la multifuncionalidad, diversos requerimientos normativos y técnicos relacionados con la mejor adaptación del territorio frente a fenómenos hidrometeorológicos extremos, la conservación y protección ambiental, y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. A lo largo de este artículo se repasa el concepto y los mecanismos de diseño y ejecución de dichas medidas, ilustrando su aplicación mediante ejemplos desarrollados por el CETA desde 2008 en la Comunidad Foral de Navarra (sistema fluvial Arga-Aragón). Para la puesta en marcha de estos trabajos, el CETA ha colaborado con diversas administraciones hidráulicas y ambientales. Asimismo, ha cooperado estrechamente con centros de investigación, como el Instituto IMDEA Agua, con el que ha colaborado en un proyecto europeo relacionado con la definición, evaluación y divulgación de las medidas naturales de retención de agua en las diferentes demarcaciones hidrográficas europeas.

Keywords

ecosystem services;
green infrastructures;
ecological restoration;
European projects;
CETA;

Abstract

The Centre for Applied Techniques Studies (CETA) of CEDEX has been working over the last few years in different European projects related with the design and development of natural water retention measures (NWRM). These are a number of measures, boosted by the Water Unit of the Environment Directorate-General of the European Commission, with close links to green infrastructures, which try to integrate, from a multifunctional approach, different legal and technical requirements aimed at a better adaptation to extreme hydrometeorological events, environmental protection and conservation, and maintenance of ecosystem services. This paper reviews the underpinning foundations of the concept and the mechanisms for designing and implementing NWRM. It also shows the way they can be applied, by presenting different initiatives developed by CETA since 2008 in Navarre (Arga-Aragón river system). For fulfilling those works, CETA has collaborated with environmental and hydraulic authorities of Navarre. It has also actively cooperated with research centres, such as the Institute IMDEA Water, specifically in a European project devoted to the diffusion, assessment, and presentation of NWRM within the context of the EU River Basin Districts.

1. INTRODUCCIÓN

Las Medidas Naturales de Retención de Agua (en adelante, NWRM, acrónimo de su traducción inglesa: Natural Water Retention Measures) pueden definirse como medidas multifuncionales que plantean la protección de los recursos hídricos y la resolución de problemas relacionados con el agua a través de la restauración o mantenimiento de los ecosistemas naturales, así como de las características y atributos propios de las masas de agua, en todos los casos mediante procedimientos y procesos naturales (NWRM, 2014).

Las NWRM son medidas orientadas a salvaguardar la capacidad natural de almacenamiento de agua mediante la restauración, mantenimiento o mejora de características naturales de diferentes ecosistemas acuáticos o de ecosistemas terrestres vinculados. Pueden ejecutarse individualmente o en combinación con otras medidas (naturales o no) y en relación a una amplia gama de usos del suelo, desde la agricultura al desarrollo urbano.

Quizás lo más relevante de las NWRM es que se refieren, por un lado, a un único fin (proteger y mejorar el potencial de retención de agua de diferentes ecosistemas) y, por otro, a un conjunto específico de medios para conseguirlo (restaurar o mejorar los ecosistemas mediante procesos naturales). En relación a su fin y, como se indica a continuación, contribuyen a no pocos objetivos ambientales, económicos y sociales, más allá de su contribución a la

* Autor de contacto: fernando.magdaleno@cedex.es

¹ Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, Madrid, España.

² Instituto IMDEA Agua. Alcalá de Henares, Madrid, España.

gestión de los recursos hídricos. Sin embargo, el verdadero rasgo diferencial de estas medidas es el conjunto de medios que emplea para alcanzar ese fin; eso las convierte en medidas orientadas a emular las funciones naturales que desempeñan los ecosistemas acuáticos cuando no han sido gravemente intervenidos.

El principal mecanismo de acción de las NWRM es la mejora de la capacidad de retención de agua del suelo, los acuíferos y los ecosistemas acuáticos, contribuyendo al tiempo a la mejora de su estado. La aplicación de las NWRM apoya el desarrollo de las conocidas como infraestructuras verdes, mejora el estado cuantitativo de las masas de agua, y reduce la vulnerabilidad del territorio frente a fenómenos de inundaciones y sequías. Influye también positivamente en el estado ecológico y químico de las masas de agua, al restaurar el funcionamiento natural de los ecosistemas y los servicios ambientales que proveen. Los ecosistemas restaurados contribuyen finalmente tanto a la adaptación como a la mitigación frente al cambio climático (Strosser *et al.*, 2015).

La mayor y mejor capacidad de retención de agua por parte de ríos, humedales, llanuras de inundación y otro tipo de ambientes favorece el almacenamiento superficial, sub-superficial y subterráneo durante los periodos de mayores precipitaciones, reduciendo los caudales punta y el estrés hídrico durante las épocas de sequía (ICPDR, 2014).

Por tanto, los atributos distintivos de las NWRM, frente a otras medidas de gestión del agua y del territorio, serían los siguientes (NWRM, 2014):

- Están siempre basadas en procesos naturales.
- Son medidas multifuncionales desarrolladas sobre ecosistemas acuáticos y otros ecosistemas vinculados al agua, lo que induce por ejemplo a contemplar no sólo los ríos longitudinalmente sino en sus conexiones laterales.
- La retención natural del agua no es el objetivo final de su desarrollo, sino el mecanismo que hace que estas medidas sean relevantes para la el uso eficiente y la sostenibilidad de los recursos hídricos.
- No son todas ellas medidas que incrementan el agua almacenada en el territorio.
- No son en sí medidas dirigidas a la restauración de ecosistemas naturales degradados a su estado original, aunque algunas de ellas pudieran serlo, sino procedimientos que buscan adaptar los ecosistemas en su estado actual para mejorar o devolverles su funcionalidad regulatoria de los ciclos del agua.

El proyecto piloto “Atmospheric Precipitation - Protection and efficient use of Fresh Water: Integration of Natural Water Retention Measures in River basin management”, fue puesto en marcha por la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea en 2013 (y hasta mediados de 2015) como parte de la iniciativa NWRM de la Unión Europea. El objetivo de esta iniciativa, recientemente finalizada, es conseguir una base de conocimiento sobre las NWRM, contribuir a la creación de una red de profesionales en la materia y desarrollar un manual práctico para su diseño e implementación. Esta iniciativa se ha desarrollado a través de cuatro redes regionales, con el fin de tener en cuenta de forma apropiada la diversidad regional a escala europea:

la red Mediterránea, la red Báltica, la red Oeste de Europa y la red del Danubio. Estas redes fueron definidas sobre la base de sus similitudes bioclimáticas, hidromorfológicas y de gestión del agua. El objetivo de las redes era facilitar el intercambio de experiencias y la discusión sobre problemas y soluciones en un contexto regional, y contribuir al inicio o consolidación de sinergias entre los socios del proyecto.

La región Mediterránea estuvo coordinada por el instituto público madrileño IMDEA Agua. Durante el periodo de realización del proyecto se han llevado a cabo diversos seminarios y encuentros (Alcalá de Henares, Turín, París, Bruselas), con la participación de expertos de los países del arco mediterráneo y de otras regiones europeas, en los que se expusieron diversas iniciativas y ejemplos relacionados con las NWRM. El Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX, a través de un Convenio de Colaboración con IMDEA Agua, colaboró activamente en los seminarios del proyecto y en las publicaciones derivadas, a través de la presentación de diversos casos de estudio. Uno de estos casos de estudio, el relacionado con la restauración del sistema fluvial Arga-Aragón (Navarra) es presentado en la segunda parte de este artículo, como ejemplo integrado de la puesta en marcha de medidas naturales de retención de agua que sirven además a la mejora de la biodiversidad y la mitigación de fenómenos climáticos extremos, aumentando la resiliencia frente a los mismos y, en última instancia, la capacidad de adaptación.

2. LAS MEDIDAS NATURALES DE RETENCIÓN DE AGUA, EN EL CENTRO DE LAS POLÍTICAS EUROPEAS

Las NWRM se encuentran asociadas o directamente vinculadas con diferentes políticas y estrategias europeas relacionadas con la gestión del agua, la ordenación territorial y la biodiversidad (EC, 2014; Strosser *et al.*, 2015). La Comisión Europea ha publicado en los últimos años diversos documentos donde se ponen de manifiesto estos vínculos:

- La Estrategia Europea sobre Adaptación al Cambio Climático (EC, 2013a).
- El Libro Blanco sobre Adaptación al Cambio Climático (EC, 2009).
- La Estrategia Europea sobre Biodiversidad (EC, 2011).
- La Política europea de lucha contra la escasez de agua y la sequía (2012a).
- El Plan de Acción para salvaguardar los recursos hídricos de Europa (EC, 2012b).
- La Estrategia Europea sobre Infraestructuras Verdes (EC, 2013b).

En relación con la gestión del agua y su biodiversidad asociada, las NWRM guardan una estrecha relación con varias de las herramientas de gestión promulgadas por la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), por las Directivas Aves y Hábitat (2009/147/CE y 92/43/CEE, respectivamente) y por la Directiva relativa a la evaluación y gestión del riesgo de inundación (2007/60/CE). En concreto, en este último caso, con las medidas de prevención y protección frente al riesgo de inundación, que en todas las demarcaciones hidrográficas europeas deben establecerse para mitigar los efectos de las crecidas fluviales.