

Estudios sobre utilización de residuos en terraplenes de carreteras

Studies on the Use of Waste Material in Road Embankments

Fernando Pardo de Santayana^{1*}, Herminia Cano Linares², María Santana Ruiz de Arbulo³, Rafael Rodríguez Abad⁴

Resumen

Se realiza un repaso de los estudios realizados en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en relación con el aprovechamiento de residuos en terraplenes de carreteras desde los años 80 del siglo pasado hasta el presente, escogiendo para ello los cuatro materiales más representativos de estos estudios: las cenizas volantes del carbón, los estériles de carbón, los neumáticos fuera de uso y los residuos de construcción-demolición. Se incluye información sobre el marco legal en España de la utilización de residuos en terraplenes, se hace referencia a los estudios sobre los dos primeros residuos, y se resumen los estudios realizados sobre los otros dos materiales indicados, comentando los aspectos mecánicos y medioambientales de este tipo de aprovechamiento, así como de oportunidad para llevarlo a cabo.

Palabras clave: reutilización de residuos, terraplenes de carretera, cenizas volantes, estériles del carbón, neumáticos troceados, residuos de construcción demolición.

Abstract

The paper presents an overview of the studies carried out at the Geotechnical Laboratory of CEDEX, from the 80s of the last century up to now, in relation to the use of waste materials in road embankments, selecting the four most representative materials of these studies: coal fly ash, coal mining waste, scrap tyres, and construction-demolition waste. Information is included on the legal framework in Spain for the use of recycled materials in road embankments. A reference is made to the first two waste materials, as well as a brief description of the studies conducted on the other two aforementioned materials, commenting on the mechanical and environmental aspects of this type of use, and on the opportunity to put it into effect.

Keywords: re-use of waste materials, road embankment, fly ash, coal mining waste, scrap tires, construction-demolition waste.

1. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS DEL CEDEX SOBRE APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN TERRAPLENES

En la década de los 80 se llevaron a cabo, en el Laboratorio de Geotecnia del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), estudios bastante completos sobre las posibilidades de utilización en terraplenes de carretera de determinados residuos, por iniciativa de la propia Dirección General de Carreteras del entonces Ministerio de Obras Públicas. En particular se estudiaron las cenizas volantes del carbón, los estériles del carbón y diferentes tipos de escorias industriales. Se comentan a continuación algunos de estos estudios.

1.1. Los estudios sobre las cenizas volantes de carbón

La posibilidad de aprovechamiento de las cenizas volantes del carbón (figura 1) en la construcción de rellenos y terraplenes fue estudiada intensamente en los años 80 y 90 del siglo pasado en el CEDEX. El énfasis en estos estudios se puso en la determinación del comportamiento

geotécnico de un material que, aunque parecido a un suelo natural, tenía un origen artificial, y que en aquel periodo se producía en cantidades muy considerables, tanto en Europa como en España. La situación era tal, que se construían grandes depósitos para acumular la producción de este material con el que no se sabía qué hacer. Como ejemplos de estos depósitos se puede citar el depósito tipo presa para almacenar cenizas en Lada, Asturias, o el relleno con cenizas vertidas para ganar terreno al mar en la Bahía de Algeciras, junto a la Central Térmica de Los Barrios. Urgía encontrar maneras de valorizar estos materiales, y se emprendieron diferentes estudios al respecto, entre ellos los estudios en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX sobre el comportamiento geotécnico de las cenizas compactadas.

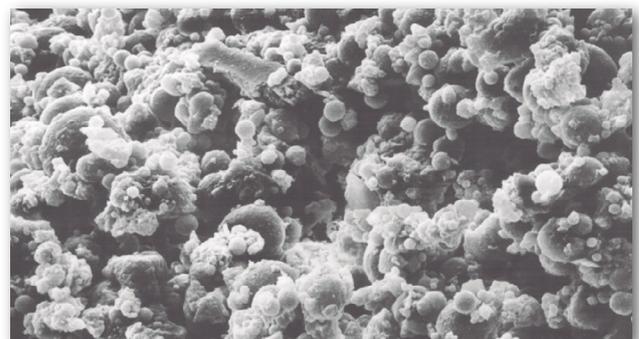


Figura 1. Vista por microscopio electrónica de barrido de muestra de ceniza volante de la central de Los Barrios (Pardo de Santayana, 1993).

* Autor de contacto: F.Pardo.S@cedex.es

¹ Dr. Ingeniero de Caminos, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

² Dra. Ingeniera de Caminos, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

³ Licenciada en Ciencias Geológicas, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

⁴ Licenciado en Ciencias Químicas, Laboratorio de Geotecnia del CEDEX.

La producción en España de cenizas volantes del carbón rondaba en aquella época los 10 millones de toneladas al año.

A partir de los años 90 se produjo un auge en la utilización de las cenizas volantes en cementos y hormigones que cambió radicalmente la situación relativa a su valorización. En el año 2005 se alcanzó un porcentaje de utilización del 58% del total de las cenizas y escorias generadas en dicho año. Hoy en día el sector cementero es, con gran diferencia, el principal cliente de las cenizas y escorias, absorbiendo más del 90% del total consumido. Hay que señalar, sin embargo, que en las últimas décadas, la producción total de cenizas y escorias de carbón ha experimentado una clara tendencia decreciente. Así, en el año 1984 se produjeron un total de 9.130 kt de cenizas en las 22 centrales térmicas de carbón españolas; en 2005 se produjeron 7.524 kt; y en el año 2010 se produjeron en torno a los 1.209 kt, de las cuales 916 kt correspondieron a cenizas y 293 kt a escorias. La tendencia decreciente en la producción de cenizas y escorias es consecuencia de la reducción de la producción y de la utilización de carbón a favor de una mayor producción de electricidad con tecnología de ciclos combinados y a partir de fuentes renovables, y a las políticas de prevención de la generación de CO₂. En 2019 había 15 centrales térmicas de carbón en actividad en España, cuyo carbón era importado en un 90%, aproximadamente, y que generaban el 14 % de la electricidad del país; no obstante, 9 de estas centrales dejan de funcionar en 2020. En cuanto a la minería de carbón nacional, hoy en día es prácticamente residual.

En todo caso, el aprovechamiento de las cenizas volantes como material de terraplén fue profusamente

analizado en los años 80-90 por el CEDEX, mediante una extensa caracterización geotécnica del material, en estudios realizados tanto para la Dirección General de Carreteras, como para el Ministerio de Medio Ambiente. La Monografía CEDEX, M-32 (Pardo de Santayana, 1993) recoge los resultados de estos estudios. También fue analizado por el CEDEX el comportamiento geotécnico del relleno portuario realizado mediante el vertido de cenizas volantes en la Bahía de Algeciras (Santos y Pardo de Santayana, 1989).

A partir de los resultados de los estudios llevados a cabo por el CEDEX, se pudo realizar una caracterización de las cenizas volantes de cara a su valorización como material de terraplén. Como conclusiones se podría destacar que realmente la ceniza volante compactada constituye un material de relleno para terraplenes de características muy satisfactorias en cuanto a resistencia, capacidad portante y deformabilidad, con menor peso específico (terraplén ligero), y con poca relevancia desde el punto de vista ambiental. Su naturaleza, de material fino, tamaño limo, sin cohesión, hace, no obstante, que haya que prestar atención a algunos problemas particulares, como la formación de polvo durante transporte y puesta en obra, o facilidad de erosión por el agua o por el viento, factores que no constituyen, sin embargo, inconvenientes serios para la utilización de las cenizas. Las propiedades puzolánicas de las cenizas material pueden incluso proporcionarles una mejora de sus propiedades mecánicas con el tiempo. La figura 2 muestra un esquema de los terraplenes experimentales ejecutados por el CEDEX durante los estudios sobre estos materiales.

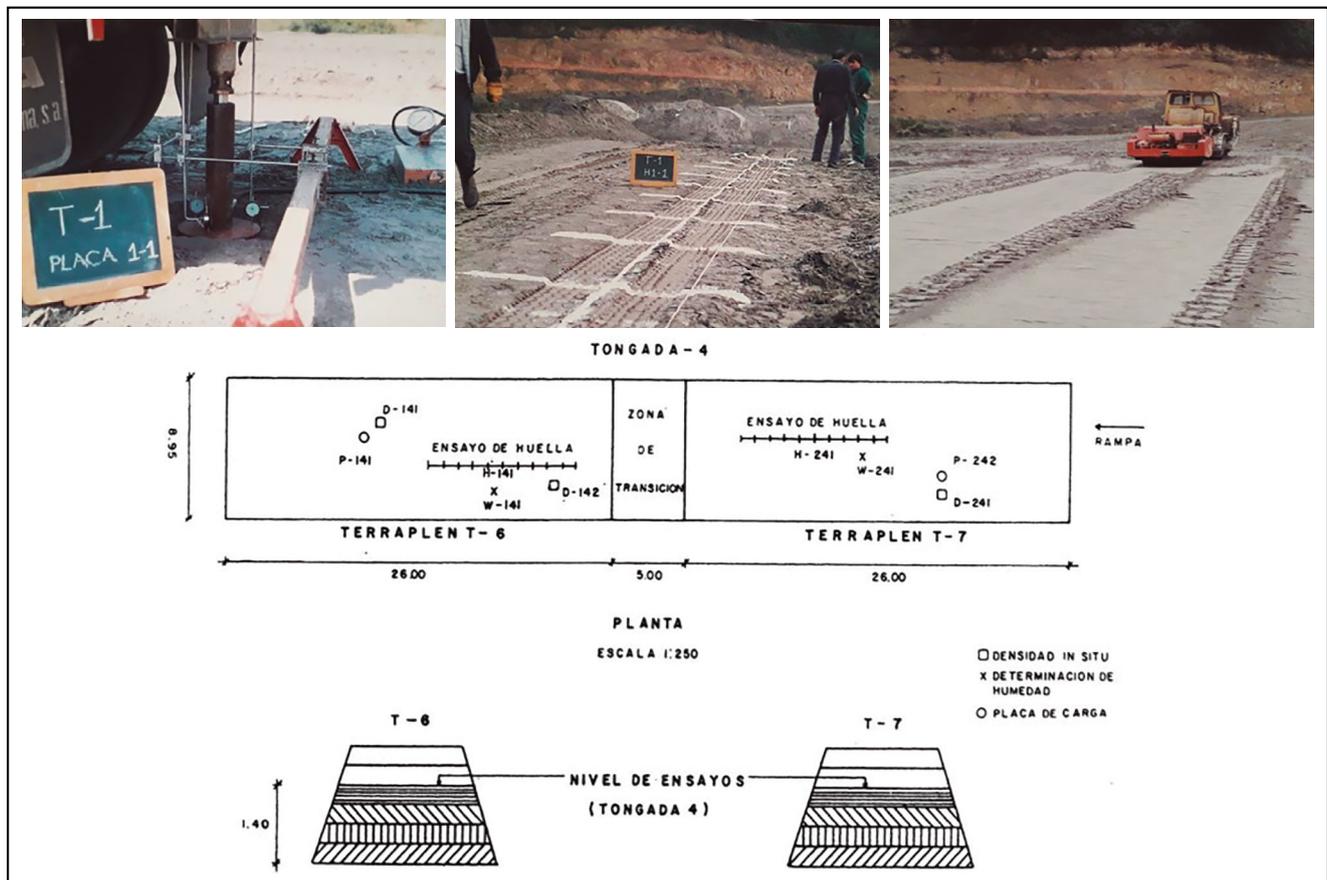


Figura 2. Terraplenes experimentales de cenizas volantes (Pardo de Santayana, 1993).

1.2. Otros residuos estudiados por el CEDEX antes de 2000: los estériles del carbón

Se llevaron a cabo en los años 90 estudios para la aplicación de estériles de carbón en terraplenes y carreteras de forma conjunta por Hunosa, el Ministerio de Obras Públicas y el CEDEX. Un ejemplo de estos estudios fue el llevado a cabo por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, conjuntamente con HUNOSA y la Escuela de Minas de Oviedo, sobre la utilización de estériles de carbón en estructuras de tierra reforzada (Pardo de Santayana *et al.*, 1994). Se analizaron los estériles más significativos de toda España, de lavadero y de escombrera, y entre éstos últimos, estériles rojos y estériles negros, y en base a ello se seleccionaron cuatro tipos, representativos de entre aquellos con mayores aptitudes: estériles de escombrera negros, y estériles rojos cumpliendo determinadas limitaciones fisicoquímicas. Con ellos se llevaron a cabo ensayos de caracterización y geotécnicos. En particular, se realizaron ensayos de resistencia al corte con distintos elementos de refuerzo (flejes metálicos, geomallas, bandas poliméricas, e, incluso, tiras de cinta transportadora usada). Se idearon y realizaron ensayos de durabilidad de estos elementos, manteniéndolos cierto tiempo enterrados en cajas con estériles. Asimismo se construyó un relleno de prueba a escala real utilizando dos sistemas de muro de tierra reforzada con elementos poliméricos y dos tipos de estériles (figura 3).

De los ensayos en laboratorio se dedujo que, en general, las características geomecánicas de estos materiales, y especialmente los altos valores del ángulo de rozamiento de los estériles (entre 36° y 40° para los estériles negros, y por encima de los 40° para los rojos), cumplían sin problemas con lo exigible al material de relleno en muros de tierra reforzada. Se determinaron los coeficientes de rozamiento con los diferentes elementos de refuerzo (tabla 1).

Tabla 1. Relación entre el ángulo de rozamiento estéril-refuerzo y el ángulo de rozamiento de varios estériles de carbón (Pardo de Santayana *et al.*, 1994)

Estéril	$tg\phi_a/tg\phi$		
	Fleje metálico	Geobanda polimérica	Cinta transportadora usada
Reicastro (rojos)	0,73	0,46	0,52
Pumardongo (negros de escombrera)	0,80	0,50	0,62
San Pedro (negros de escombrera)	0,78	0,48	0,48
Toralín (negros de relavado)	0,69	0,43	0,56
media	0,75	0,47	0,54

En relación con la utilización de estériles en muros de tierra armada con flejes metálicos, algunas de las muestras mostraban propiedades (contenido en sulfatos, cloruros, resistividad) que las situaban al borde de lo admisible según las especificaciones de Tierra Armada para obras inundables, aunque para obras en seco la mayoría las cumplían sin problemas. Sin embargo, no se observaron inconvenientes para la utilización de refuerzos de naturaleza

polimérica, adecuados, en principio, para suelos potencialmente agresivos para las armaduras metálicas.

Estos estudios contribuyeron en su tiempo a ampliar las posibilidades de utilización de los estériles en obras de carretera. Al contrario del caso de las cenizas, volúmenes apreciables de estériles de carbón se han utilizado en la construcción de terraplenes de carreteras, especialmente en las regiones del Noroeste de España desde 1990.

2. MARCO NORMATIVO EN LA ACTUALIDAD

2.1. El Plan Estatal Marco de Residuos (PEAMAR) 2016-2022

Los antecedentes del Plan Estatal Marco de Residuos se encuentran en la Directiva europea 2008/98/CE Marco de Residuos (DMR), que obliga a los Estados Miembros a establecer, como instrumento esencial para desarrollar las políticas de residuos, planes de gestión de residuos que den cobertura a todo el territorio geográfico de cada Estado; la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que transpone dicha Directiva en España; y el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015.

En noviembre de 2015 se aprobó en España el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, instrumento para orientar la política de residuos en España. El Plan incluye los residuos domésticos y comerciales, los residuos industriales, los residuos con legislación específica, los residuos agrarios y los residuos sanitarios. Se incluye también un apartado relativo a suelos contaminados. En el PEMAR, el reciclaje o la valorización material de los residuos desempeñan un papel primordial. El Plan dedica apartados específicos a diferentes tipos de residuos, de los cuales, se pueden destacar, por sus mayores posibilidades, eventualmente, de utilización en terraplenes, los siguientes:

- Neumáticos al final de su vida útil (neumáticos fuera de uso, NFU).
- Residuos de construcción y demolición (RCD).



Figura 3. Terraplén de prueba utilizando dos sistemas de muros de tierra reforzada con elementos poliméricos y dos tipos de estériles (Pardo de Santayana *et al.*, 1994).

- Residuos de industrias extractivas (residuos mineros), incluyendo: estériles de carbón; de minerales metálicos; de minerales industriales y de construcción; de rocas ornamentales; y productos de cantera.
- Residuos industriales (sin legislación específica): en esta categoría se incluyen los residuos de combustión, así como los residuos metálicos, férreos (escorias).

2.2. La utilización de residuos en terraplenes de carretera según el PG-3 español

La versión vigente del PG-3, Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, documento con rango normativo de Orden Ministerial, en lo que a construcción de rellenos interesa, viene recogida en la Orden FOM 1382/2002 de 16 de mayo (Ministerio de Fomento, 2002); en ella se actualizaron determinados artículos del pliego relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones. Lo más importante en relación con el aprovechamiento de residuos y subproductos en terraplenes está recogido en la cláusula 330.3.2 “Características de los Materiales”, en la cual se dice: “Además de los suelos naturales, se podrán utilizar en terraplenes los productos procedentes de procesos industriales o de manipulación humana, siempre que cumplan las especificaciones de este artículo y que sus características físico-químicas garanticen la estabilidad presente y futura del conjunto. En todo caso se estará en lo dispuesto en la legislación vigente en materia medioambiental, de seguridad y salud, y de almacenamiento y transporte de productos de construcción”. Esta importante puntualización abrió claramente desde 2002 la posibilidad de utilización de residuos y subproductos en los terraplenes de carretera, obviamente condicionada al buen desempeño mecánico y ambiental de estos materiales.

De las cuatro zonas que constituyen el terraplén (coronación, núcleo, espaldones y cimiento), es el núcleo la que demanda más volumen de material (figura 4). Las otras zonas actúan, en cierto modo, como envoltorio del núcleo, y en función del tipo de residuo puede ser habitual que, por condicionantes de tipo ambiental, se excluya su uso en las

mismas; salvo que el residuo en cuestión no entrañe riesgos ambientales, y no menoscabe o incluso mejore el comportamiento mecánico.

2.3. La utilización de residuos en terraplenes de acuerdo con la normativa europea: normas EN 16907

En 2018 fueron aprobadas las partes 1 a 6 de la norma europea sobre movimiento de tierras EN 16907, *Earthworks*. La Parte 1 (CEN, 2018a) de esta norma se dedica a principios y reglas generales. La posibilidad de utilización de materiales reciclados y subproductos se asume de forma natural a lo largo del documento. Ya en el capítulo de definiciones (3.1) se definen como “materiales” los suelos, rocas, subproductos industriales y materiales minerales reciclados utilizados durante los trabajos de movimiento de tierras para la construcción de estructuras de tierra; y como “estructura de tierras”, la estructura de ingeniería civil hecha de suelos, rocas, subproductos o materiales reciclados, resultantes de los trabajos de movimiento de tierras (desmontes, rellenos estructurales y no estructurales). Hay un apartado, el 6.3, dedicado a la selección de las propiedades del material de relleno y del proceso de compactación, en la cual se dice: “Para materiales reciclados y subproductos, la caracterización debe incluir el contenido de sustancias contaminantes y el comportamiento relativo a su emisión, para evaluar el impacto de utilización del material”.

En el capítulo 6.4.5, sobre materiales específicos, vuelve a hacerse referencia a los materiales no convencionales. Se dice: “El Proyecto de rellenos construidos con algunos tipos de materiales requiere prescripciones específicas que van más allá de las comunes y consideradas válidas en los casos más generales. El primer paso es el conocimiento de las propiedades relevantes a largo plazo de estos materiales, y de su influencia en el comportamiento predecible de la estructura de tierras. Estos materiales pueden ser, ora naturales, ora subproductos o residuos de procesos industriales o mineros, o incluso materiales artificiales específicos. Desde este punto de vista, algunas de las reglas y principios generales incluidos en esta norma pueden ser aplicados de una manera diferente, o incluso resultar inaplicables. Habitualmente, reglas

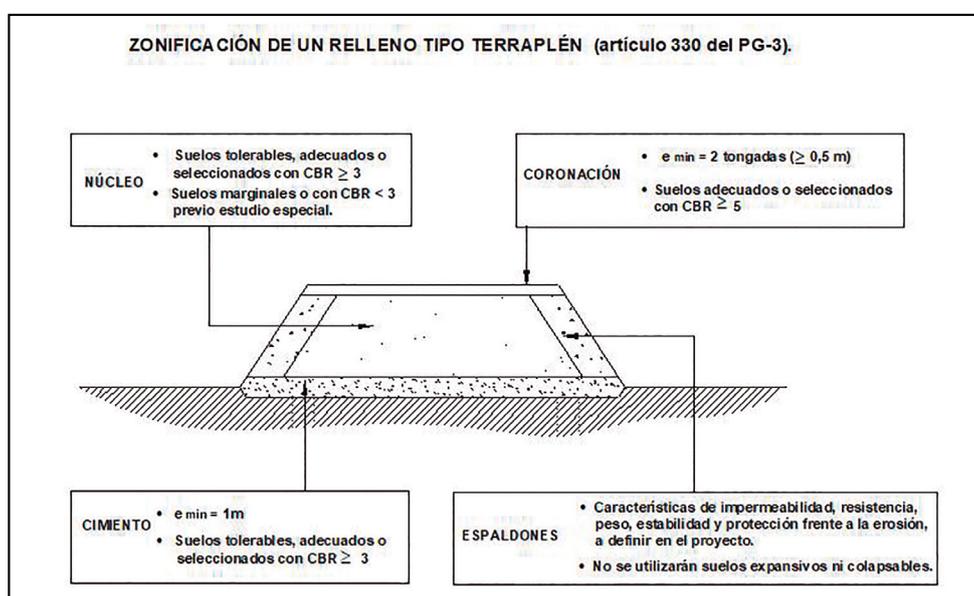


Figura 4. Zonificación de un relleno tipo terraplén de acuerdo con el artículo 330 del PG-3 (Parrilla, 2019).

específicas concernientes a la salud, al medio ambiente y a otros aspectos sectoriales deberían ser tenidas en cuenta”. El capítulo en cuestión proporciona información sólo sobre los materiales naturales (suelos y rocas) que requieren un proyecto específico cuando se utilizan como relleno; pero no lo hace sobre cada residuo específico, subproducto o material artificial de posible utilización. En la norma se incluye una zonificación general de la sección de los terraplenes coincidente con la del PG 3, distinguiendo también entre cimiento, núcleo, espaldones y coronación. La referencia a la utilización de residuos y subproductos aparece también en varios de los anejos de esta Parte 1, que resumen la práctica en diferentes países europeos.

En definitiva, la norma, en su Parte 1, por un lado incorpora con claridad la posibilidad de utilización de residuos y subproductos para la construcción de terraplenes, y por otro lado reconoce que las reglas generales para evaluar estos materiales no tienen por qué ser las mismas que las establecidas para los suelos convencionales.

En la Parte 2 de esta norma (CEN, 2018b), que se refiere a la clasificación de materiales que pueden usarse en rellenos y terraplenes, se incluye una clasificación de los materiales con base en los parámetros relativos a las propiedades intrínsecas de los mismos: distribución granulométrica, plasticidad y contenido en materia orgánica. La clasificación se recoge en el conjunto de tablas 3 de la norma (de la tabla 3a a la tabla 3f). El último grupo incluido en estas tablas (tabla 3f) se corresponde con los materiales de rellenos artificiales (*Fill or Made Ground*), que pueden presentar cualquier tipo de distribución granulométrica. Este grupo de materiales se divide en dos subgrupos: el “FN”, correspondiente a rellenos artificiales contruidos con materiales naturales, y cuyos materiales, por lo tanto, pueden a su vez clasificarse por medio de las tablas 3a a 3e; y el subgrupo “FA”, de rellenos contruidos con materiales manufacturados. Es, por tanto, en este grupo de materiales “FA” donde se pueden incluir los residuos y subproductos utilizables en la construcción de terraplenes.

3. EL CATÁLOGO DE RESIDUOS UTILIZABLES EN CONSTRUCCIÓN

La actividad de construcción es una gran demandante de recursos y materiales, lo que la convierte en un sector con enorme potencial de aprovechamiento de residuos, tanto de los derivados de su propia actividad como de los procedentes de otros sectores. La utilización en la actividad constructiva de materiales procedentes de reciclado de residuos permite, por un lado, reducir la demanda de recursos naturales no renovables, y por otro reducir la cantidad de residuos que se destinan a vertedero sin aprovechamiento. En el año 2002, el entonces Ministerio de Medio Ambiente de España publicó la monografía “El Catálogo de Residuos Utilizables en Construcción”. Su objetivo era contribuir al conocimiento público de los residuos que podían tener su utilidad en las actividades de construcción, buscando contribuir con ello a la demanda de productos reciclados. Este catálogo está a disposición del público en formato electrónico en el portal de la red: <http://www.cedexmateriales.es/>. En este portal se puede acceder a los diferentes contenidos mediante distintos criterios de búsqueda, como pueden ser el tipo de residuo o el tipo de aplicación, e incluye, igualmente,

una pestaña con un buzón de sugerencias a través del cual los interesados pueden remitir cuanta información en relación con los datos, referencias y demás extremos incluidos en el Catálogo estimen conveniente, la cual es analizada por el equipo que se encarga de las actualizaciones del Catálogo. La actualización periódica del catálogo es una de las principales características del mismo, pretendiéndose disponer de un instrumento que permita:

- dar una mayor difusión de la información contenida en el Catálogo, facilitando el acceso a cualquier persona interesada a los distintos materiales potencialmente utilizables, los volúmenes producidos y reciclados, así como a las principales aplicaciones de destino, normativa que las regula, etc.
- facilitar que cuando el equipo encargado del Catálogo actualice la información, ésta esté accesible al público sin esperar a nuevas ediciones de la monografía en formato papel.

La utilización de los residuos contemplados en el Catálogo se encuentra en distintas fases de desarrollo. Para algunos de ellos existe normativa nacional que regula su empleo, y que se relaciona en cada caso. Existen también residuos para los que, en ausencia de normativa española, nacional o regional, se citan normas internacionales que pueden consultarse a título orientativo. Asimismo, la aplicación de algunos de los residuos se encuentra aún en fase experimental, y en estos casos se comentan los resultados hasta ahora obtenidos.

El Catálogo ha sido realizado en el Marco de un Convenio de colaboración entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural del Ministerio para la Transición Ecológica, y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), con base, en gran medida, en los estudios sobre las aplicaciones de determinados residuos realizados por los diferentes centros y laboratorios del CEDEX.

Los residuos incluidos en el Catálogo hasta la fecha son los siguientes:

- Cenizas procedentes de la incineración de biomasa
- Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escorias
- Escorias de acería de horno de arco eléctrico
- Escorias de acería LD
- Estériles de carbón
- Fosfoyeso
- Humo de sílice
- Lodo de depuradoras
- Materiales de dragado
- Neumáticos fuera de uso
- Reciclado de pavimentos asfálticos
- Reciclado de pavimentos de hormigón
- Residuos de construcción y demolición
- Residuos procedentes de la fabricación de hormigón preparado
- Residuos plásticos
- Escorias de alto horno
- Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos (RSU)
- Vidrio reciclado
- Piedra ornamental

4. ESTUDIOS RECIENTES EN EL CEDEX SOBRE UTILIZACIÓN DE RESIDUOS EN TERRAPLENES

4.1. Utilización de neumáticos fuera de uso (NFU) en terraplenes

En años recientes, particularmente entre 2008 y 2015, se han llevado en el CEDEX estudios sobre neumáticos fuera de uso troceados (NFUt) para su utilización en terraplenes, basados tanto en campañas de ensayos de laboratorio sobre muestras de NFUt y sobre mezclas de NFUt y suelo, como de pruebas experimentales en obra (figura 5).



Figura 5. Vista de las muestras de tamaño nominal de 50 mm, y de 100 mm.

En cuestión de normativa, sobre la utilización de neumáticos troceados en aplicaciones de ingeniería civil se ha contado básicamente con la norma estadounidense ASTM D6270-08 *Standard Practice for Use of Scrap Tires in Civil Engineering Applications* (reaprobada en 2012), que proporciona algunas indicaciones sobre métodos de caracterización y de práctica constructiva con este tipo de material (ASTM, 2012). Al tratarse de un material que no se asemeja a los materiales térreos, su caracterización geotécnica da lugar a algunas peculiaridades y dificultades. Por ejemplo, la forma de hacer pasar los trozos de neumáticos por las aberturas de los tamices (permitiendo el paso por la diagonal y el giro de los trozos, o no) influye en las curvas de distribución de tamaños. Por otro lado, la norma ASTM D6270 destaca el peligro de autocombustión de los NFUt debido a que contienen alambres metálicos con diferentes grosores, que van desde decenas de micras hasta

varios milímetros. Este riesgo se reduce considerablemente a medida que la cantidad de fragmentos metálicos sueltos o expuestos disminuye. Se realizaron en el CEDEX determinaciones requeridas por la Norma ASTM D6270 con una cantidad representativa de NFUt, y, adicionalmente, fuera de lo requerido en esta norma, se consideró oportuno cortar los alambres expuestos para poder cuantificar estos fragmentos metálicos en peso y número. Se comentan a continuación algunos de los ensayos geotécnicos y de caracterización ambiental, así como pruebas de puesta en obra, realizados con los NFUt:

Ensayos de compactación de muestras NFUt-suelo:

La realización de ensayos de compactación por apisonado sobre muestras de NFUt no se consideró factible por la naturaleza elástica del material. Se estudió, sin embargo, la compactación mediante ensayos de laboratorio de muestras de NFUt mezcladas, al 50% en volumen, con suelos de buenas características geotécnicas (suelo seleccionado, según el PG-3). Las probetas se prepararon compactadas en un molde de 9 pulgadas de diámetro con la energía del ensayo Próctor Modificado, en cinco capas (figura 6). Los valores de las densidades secas obtenidas se encontraban en torno a $1,8 \text{ t/m}^3$.



Figura 6. Desmontaje del molde de la probeta de compactación de mezcla de NFUt y suelo.

Ensayo de permeabilidad con muestras de NFUt:

La determinación de la permeabilidad de los NFUt en laboratorio fue otro tipo de ensayos con dificultades derivadas de las características físicas de estos materiales. En 2008 se llevaron a cabo ensayos con muestras de NFUt con tamaños nominales de 63,5 mm y 100 mm, empleando para ello dos equipos de permeabilidad de carga constante, con células de diámetros de 15 cm y 21,5 cm de diámetro, respectivamente, obteniéndose resultados de entre $1,1 \times 10^{-3}$ y $5,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ (figura 7). Se realizó posteriormente un nuevo estudio utilizando una célula semiflexible, de 20 cm de diámetro, constituida por una porción de una cámara de NFUt, con un espesor de aproximadamente 2 mm, correspondiente a una rueda de camión agrícola. De esta forma se facilitaba la adaptación de las paredes de la célula al material de NFUt contenido en su interior. Se obtuvo un coeficiente de permeabilidad de $2,1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ (CEDEX, 2012a).



Figura 7. Muestra de tamaño 100 mm compactada en el interior de la célula de permeabilidad.

Ensayos de corte directo en caja de 1x1 m:

Se han realizado ensayos de resistencia al corte en la caja de 1x1 m del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX sobre muestras de NFUt de diferentes tamaños nominales (25 mm, 50 mm y 100 mm) y otras provenientes de terraplenes experimentales (figura 8). La densidad inicial del material colocado en la caja era del orden de 0,5 t/m³, pasando a valores entre 0,6 y 0,9 t/m³ (figura 9), en función de la carga vertical aplicada (hasta 100 kPa). Adicionalmente, se han realizado ensayos en cajas de corte menores, de 30x30 cm, con NFUt de 25 mm de tamaño nominal. A

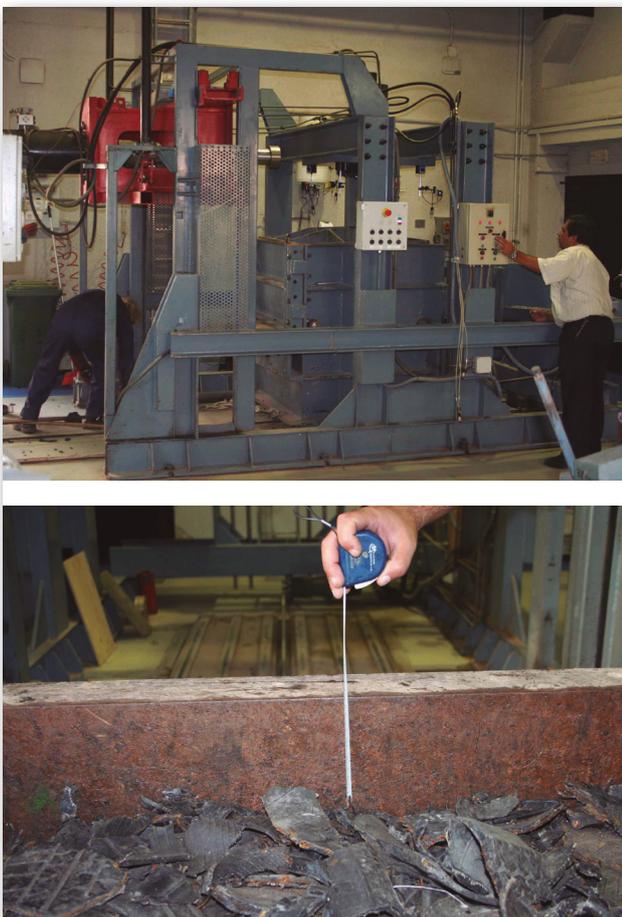


Figura 8. Ensayos de corte directo en la caja de 1x1 m sobre NFUt.

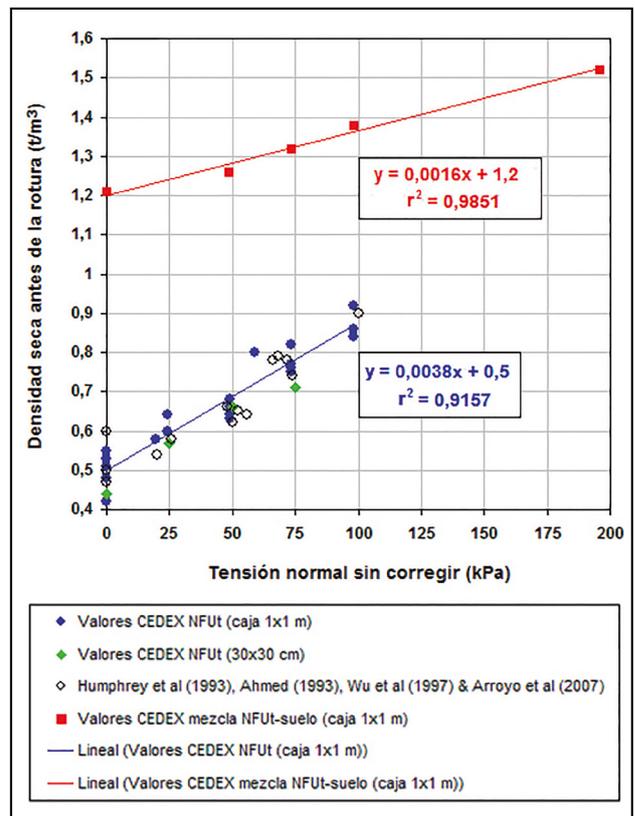


Figura 9. Relación entre densidad y carga vertical de NFUt y de mezclas de NFUt-suelo obtenida en los ensayos en el CEDEX.

partir de los ensayos, se pueden establecer valores representativos de la resistencia al corte de este material: cohesión de 10 kPa y ángulo de rozamiento de 28°. Igualmente

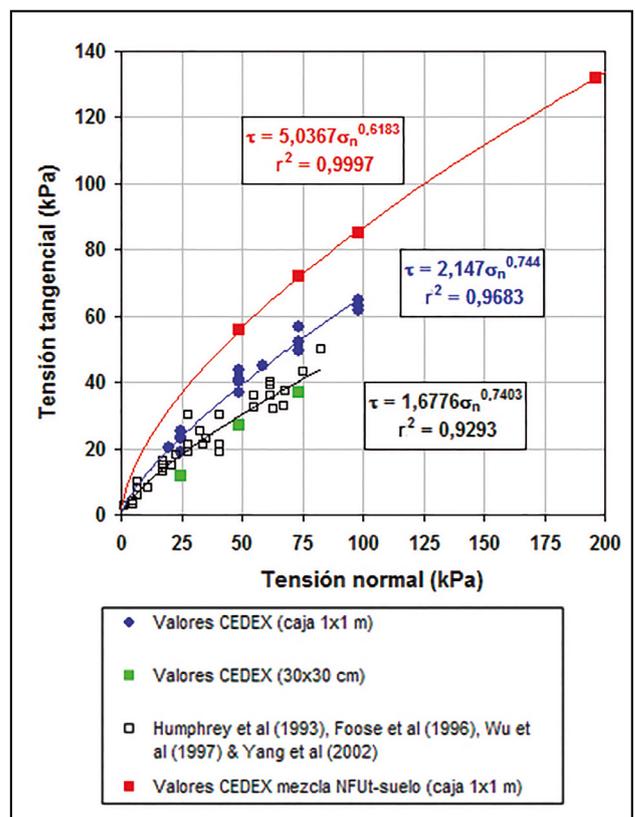


Figura 10. Resultados de los ensayos de corte directo realizados en el CEDEX sobre muestras de NFUt y mezclas NFUt-suelo seleccionado (CEDEX, 2012a).

se han realizado en la caja de 1x1m ensayos de corte sobre mezclas de NFUt y suelo seleccionado, con una relación de pesos NFUt/suelo de aproximadamente 1:3 (50% en volumen), y agua suficiente para alcanzar la humedad óptima Próctor Modificado del suelo utilizado; con las mezclas de NFUt y suelo seleccionado, la densidad variaba entre 1,21 (inicial) y 1,26 t/m³ (bajo 100 kPa). En este caso los resultados indican un aumento de la cohesión, hasta valores entre 30 y 40 kPa, y el mantenimiento del mismo ángulo de rozamiento. Por otro lado, los resultados obtenidos en caja de corte de 30x30 cm, parecidos a los obtenidos por otros autores, fueron aproximadamente un 20% inferiores a los de la caja de 1x1 m, revelando la influencia del tamaño del equipo de ensayo.

Ensayo de deformabilidad edométrica:

Se realizaron ensayos de deformabilidad edométrica en la caja de metro cúbico sobre muestras de NFUt de tamaños nominales de 25 y de 100 mm (CEDEX, 2008; y CEDEX, 2012a), aplicando 5 ciclos de carga y descarga, con presiones máximas de 28, 55, 110, 220 y 440 kPa, respectivamente, cada uno de ellos con varios escalones. El tiempo de aplicación de las cargas fue de entre 10 y 30 minutos en los diferentes escalones de carga o de descarga, y de 120 minutos para la carga máxima de cada ciclo. Las formas de las curvas edométricas obtenidas son similares a las de los suelos (figura 11), aunque los valores de la deformación vertical son considerablemente mayores, entre el 30 y 45% para cargas verticales de hasta 400 kPa. Las ramas de descarga-recarga resultan muy paralelas entre sí, independientemente de la presión vertical de partida. Por su parte, las curvas de asiento-tiempo muestran que el asiento producido es prácticamente instantáneo.

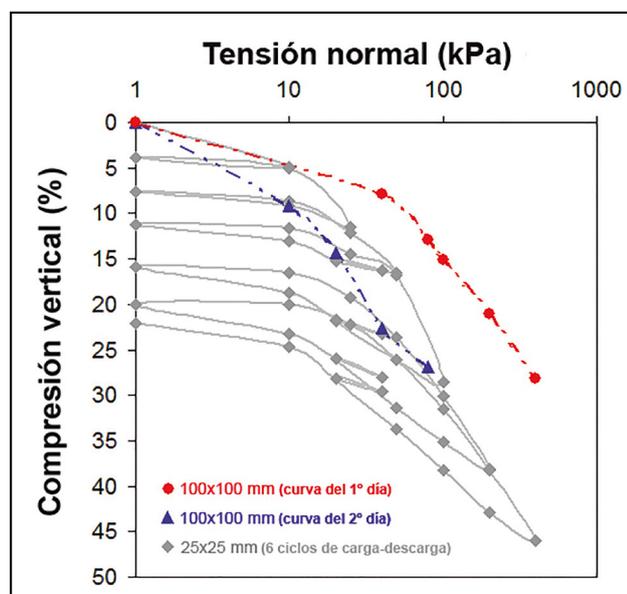


Figura 11. Curvas edométricas obtenidas en ensayos sobre muestras de NFUt en la caja de 1 m³ del CEDEX.

Ensayos de lixiviación de muestras de NFUt:

Buena parte de los estudios llevados a cabo en el CEDEX sobre la utilización de los NFUt en terraplenes se dedicó al análisis del potencial contaminante de este material mediante ensayos de lixiviación en laboratorio. Las piezas de NFUt empleadas como material de relleno en una obra lineal podrían estar bajo el nivel freático o bien en contacto directo con aguas que percolen a través del relleno. En los estudios de laboratorio llevados a cabo se intentó simular ambas situaciones. Las características de los NFUt dificultaban la aplicación de métodos de ensayos diseñados para muestras de suelo, por ejemplo la norma europea UNE-EN 12457-4 (2003); tampoco se pudo aplicar el método sugerido por la norma ASTM D6270-08, desarrollado en la USEPA 1311 (TCLP), por falta de equipo específico. Los ensayos realizados fueron de dos tipos:

- Ensayo de lavado en tanque (Norma NLT-326), destinado a áridos de carreteras, para tamaños máximos de 35 mm (50 mm para los NFUt); la muestra, en un recipiente de malla, se sumerge en un tanque con una relación líquido/sólido (L/S) de 10 L/kg; se mantiene en agitación durante 24 horas.
- Ensayo de inmersión en bañera (sin norma específica); se colocan aproximadamente 50 piezas de NFUt “pequeño” (<50 mm), con un peso total de 2000 g, esparcidas en el fondo de una bañera de plástico (40x60x25 cm) en la que posteriormente se añaden 20 L de agua Milli-Q, (relación L/S de 10 L/kg); se mantienen 30 días sumergidos en agua; el lixiviado se muestrea a 1 hora, y a 1, 2, 3, 4, 7, 14, 21 y 30 días.

La composición química de los extractos obtenidos en ambos tipos de ensayo se analizó mediante el empleo de espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inducido (ICP-AES) y de cromatografía iónica (IC). La calidad de los lixiviados se comparó con los parámetros de agua para consumo humano (BOE, 2003).

De los resultados obtenidos en los ensayos químicos se puede deducir que el empleo de NFUt como material de ejecución de rellenos es viable desde un punto de vista ambiental, ya que el agua que pudiera percolar a través del relleno presenta valores muy bajos de contaminantes, generalmente muy inferiores a los estipulados en la legislación española, referente a la calidad del agua para consumo humano. En el ensayo del tanque, la disolución de contaminantes solubles presentes en las piezas de NFUt se produjo prácticamente durante el primer lavado de la muestra, tras 24 h de ensayo. Sin embargo, la concentración de contaminantes en los lixiviados obtenidos a partir del ensayo de inmersión aumentó a medida que transcurrió el ensayo, especialmente durante los primeros días, ya que se favoreció la oxidación de los alambres expuestos, aumentando sobre todo la cantidad disuelta de Fe, Mn y Zn (tabla 2).

Tabla 2. Comparativa de contenidos lixiviados y valores máximos del R.D. 140/2003

Analito	Concentración en lixiviado (mg/L)			Concentración máx. según R.D. 140/2003 (mg/L)
	Lix. en blanco (1 h)	Lix. en tanque (24 h)	Lix. en bañera (30 días)	
Fe	0,012	0,12	2,6 (0,26 tras día 1)	0,2
Mn	0,004*	0,015	0,2 (0,054 tras día 3)	0,05
Na	0,23	2,3	5,9	200
Zn	0,12	0,09	0,18	-
Cl ⁻	0,46	4,6	8,8	250
SO ₄ ²⁻	0,32	3,2	10,3	250
Parámetro	Valor			Valor máx. según R.D. 140/2003
pH	6,59	6,64	6,89	Entre 6,5 y 9,5
κ (μS/cm)	35,9	36	108	2.500 (20 °C)

*: Contenido inferior al L.L.D. del sistema ICP-AES para ese elemento y método de lixiviación (L/S 10).

Nota: En rojo los contenidos que superan el valor establecido en el R.D. 140/2003.

Pruebas in situ:

Por lo que respecta a pruebas in situ, el Laboratorio de Geotecnia promovió, en colaboración con la iniciativa privada, la realización de terraplenes experimentales, consistentes en bandas de prueba, de 4 m de anchura y 20 m de longitud, dispuestas en una superficie adecuadamente preparada para ello y empleando, como materiales, NFUt y mezclas de NFUt y suelo, previamente preparados y acopiados. No existiendo actualmente en España reglas

técnicas que regulen la utilización de este tipo de material, se recurrió a la ya citada norma de Estados Unidos ASTM D 6270. Como equipos de compactación se utilizaron tanto rodillos lisos (de 93 kN con vibración) y buldócer, adoptando 40 cm de espesor de tongada (tabla 3). Como resultado de estos estudios, el CEDEX estableció una serie de recomendaciones para el diseño y ejecución de rellenos viarios con NFUt, que se recogen en CEDEX (2012b), en gran parte coincidentes con las de la ASTM D 6270 (figura 12).

Tabla 3. Características de diseño de las bandas de prueba con NFUt

Banda	Material	Compactador	Velocidad (km/h)	Espesor de tongada	Nº de tongadas
1	NFU	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	4
2	Mezcla NFU-suelo seleccionado	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	1
3	NFU	Buldócer	3,6	40 ± 10 cm	3
4	Mezcla NFU-suelo marginal	Rodillo liso de 93 kN con vibración	1,5	40 ± 10 cm	3



Figura 12. Ejecución de las bandas de prueba de NFUt mezclado con suelo.

Las recomendaciones constructivas de terraplenes con NFUt se pueden resumir en las siguientes líneas:

- En relación con los tamaños de piezas y contenido de alambres expuestos, utilización de material del Tipo B (Clase II), según Norma ASTM D6270-08.
- Espesor de las capas de NFUt ≤ 3 m, (para evitar problemas de autocombustión).
- Utilización de geotextiles envolviendo los NFUt para evitar migraciones de suelo hacia los huecos.
- Utilización de capas intermedias de material térreo de refuerzo estructural, con espesor mínimo de 1 m.
- Aislamiento frente a la infiltración de agua mediante:
 - Colocación de los NFUt por encima del máximo nivel freático y cota de inundación.
 - Colocación 1 m por encima de la cota superior del terreno natural.
 - Colocación de los NFUt sólo hasta 1 m por debajo del nivel de coronación del terraplén.
 - Utilización de espaldones impermeables.
 - Utilización de pavimento impermeable.

4.2. Utilización de residuos de construcción-demolición

Otros residuos estudiados recientemente en el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX han sido los residuos de construcción-demolición. Se ha realizado un trabajo de caracterización geotécnica básica de estos materiales a partir de un total de 34 muestras, todas ellas definidas como áridos reciclados mixtos, recogidas en 6 plantas de reciclaje distribuidas por todo el territorio español (Santana *et al.*, 2019).

Los residuos de construcción y demolición (RCD) son residuos de naturaleza fundamentalmente inerte generados en obras de excavación, nueva construcción, reparación, remodelación, rehabilitación o demolición. El proceso de generación es, por tanto, muy heterogéneo y da lugar a materiales de composición muy variada (figura 13), compuestos fundamentalmente por hormigón, cemento, piedra natural, material bituminoso, cerámicos, papel, plástico y yeso. Según la norma UNE EN 12620 (“Áridos para hormigón”), (UNE, 2009), el árido reciclado (AR) es “el árido resultante

del tratamiento del material inorgánico previamente utilizado en la construcción”, siendo el principal producto que se obtiene de la valorización de los RCD. Por su parte, se denomina Árido Reciclado Mixto (ARM) al producto que se obtiene del procesamiento de RCD y que contienen una mezcla de residuos de hormigón y residuos cerámicos.

Desde el punto de vista geotécnico, al contrario de lo que sucede con los NFUt, los ARM son mecánicamente bastante asimilables a un suelo granular. La caracterización de los materiales se ha llevado a cabo, por un lado, según los ensayos establecidos en el artículo 330 “Terraplenes” del PG 3, y por otro, al tratarse de áridos, según la norma europea UNE EN 13242:2003+A1:2008 (UNE, 2008) “Áridos para aplicaciones con y sin ligante hidráulico para su uso en ingeniería civil”, la cual se aplica tanto a áridos naturales como manufacturados. También se ha llevado a cabo el ensayo de clasificación por composición UNE EN 933-11 (UNE, 2010), que permite clasificar los componentes de los áridos gruesos reciclados: Rc: Hormigón, Ru: Piedra natural, Rb: Elementos de albañilería, Rg: Material bituminoso, Rv: Vidrio, FL: Material flotante, X: Yeso y otros. Esta clasificación da una idea rápida de los componentes mayoritarios (hormigón o cerámicos) y del grado de limpieza/tratamiento de los mismos (tabla 4).

A pesar de obtenerse elevados valores de CBR (entre 29 y 148), atendiendo los criterios del PG 3 para terraplenes, el 60% de las muestras analizadas se clasifican como Suelo Marginal debido a que el contenido en sales solubles diferentes al yeso es superior al 1%. Varias muestras también contienen porcentajes en sales solubles elevados que no generan variaciones volumétricas en los ensayos de hinchamiento libre ni colapso (tabla 5). Atendiendo a las indicaciones del PG 3, este material podría colocarse en el núcleo del terraplén y, debido a los elevados contenidos en sales solubles y yeso, requerirían un estudio especial.

Desde el punto de vista ambiental, la normativa de terraplenes española no determina los tipos de ensayos de lixiviación que deben llevarse a cabo ni los límites de las sustancias contaminantes. Por su parte, el estudio de este tipo de materiales, dentro de la normativa europea, puede situarse tanto dentro de la directiva para productos de la construcción (CEN TC 351 WG1) como en la directiva



Figura 13. Tipos de áridos reciclados mixtos (ARM) considerados en el estudio del CEDEX en función del grado de tratamiento/limpieza al que son sometidos en las plantas.

Tabla 4. Valores de los componentes según UNE EN 933-11

Planta	Tipo	Rc (%)	Ru (%)	Rb (%)	Ra (%)	Rg (%)	FL (%)	X (%)
1	I	58	21	18	0	0	2	1
	II	48	18	25	3	0	5	1
	III	46	22	18	4	0	8	2
2	I	40	14	32	1	1	9	3
	II	36	18	31	6	0	6	3
	III	28	19	8	8	1	30	6
3	I	35	34	21	2	0	5	3
	II	42	24	23	3	0	6	2
4	I	42	31	19	6	0	1	0
	II	52	25	6	13	0	3	1
	III	40	31	7	14	0	8	0
5	I	43	20	24	4	0	8	1
	II	47	24	19	2	1	7	0
	III	32	24	22	1	0	10	11
6	I	28	29	39	1	1	2	0
	II	17	29	46	2	3	2	1
	III	34	20	27	1	1	15	2

Rc: hormigón, Ru: piedra natural, Rb: ladrillos y azulejos, Ra: material bituminoso, FL: flotantes, X: metales, plástico y yeso.

Tabla 5. Resultados de los ensayos para la clasificación del material según el artículo 330 del PG 3

Planta	Tipo	# 20 (%)*	# 0,08 (%)*	M.O. (%)	Sales Solubles (%)	Yeso (%)	Sales sol. ≠ Yeso (%)	Colapso IC (%)	Hinch. Libre (%)	CBR	Clasif.
1	I	88,6	7,1	0,75	2,50	1,29	1,21	0,01	0,0	117	M
	II	87,6	6,1	0,86	5,98	0,57	5,41	0,17	0,60	107	M
	III	71,3	3,1	0,61	6,65	2,69	3,96	0,25	0,10	77	M
2	I	17,3	1,1	0,87	7,95	6,75	1,25	0,30	0,17	-	I
	II	63,2	1,4	0,78	5,90	5,89	0,01	0,15	0,00	88	I
	III	99,2	4,1	0,64	5,88	2,01	3,87	0,04	1,05	33	M
3	I	82,7	7,2	0,55	4,10	3,99	0,11	0,11	0,70	111	T
	II	90,6	7,7	0,79	4,90	1,85	2,25	0,13	0,32	105	M
4	I	100	2,0	0,59	5,35	1,48	3,87	0,20	0,02	98	M
	II	100	1,8	0,31	8,28	0,61	7,67	0,04	0,46	-	M
	III	100	6,0	0,48	7,87	0,84	7,03	0,04	1,42	127	M
5	I	88,5	0,6	0,34	2,15	1,43	0,72	0,16	1,17	-	T
	II	100	9,2	0,96	2,37	1,35	1,02	0,15	1,30	-	M
	III	46,9	1,6	0,51	2,70	2,17	0,53	0,12	5,07	57	I
6	I	94,7	1,7	0,20	2,48	1,51	0,97	0,35	0,18	-	T
	II	58,7	4,9	0,34	6,10	4,61	1,49	0,14	0,98	148	I
	III	84,0	4,2	0,28	6,95	6,23	0,72	0,04	3,76	29	M
Límites en PG 3 según tipo de suelo	Seleccionado			<0,2	<0,2	-	-				S
	Adecuado		<35	<1	<0,2	-	-				A
	Tolerable			<2	-	<5	<1	<1	<3		T
	Marginal			<5					<5		M

(*Condiciones granulométricas para material de terraplén: # 20 >70% o bien # 0,08>35%).

de rellenos de tierra (CEN TC 292 WG6). Cada uno de estos grupos de trabajo ha definido ensayos de lixiviación distintos. Cuando el CEDEX estaba llevando a cabo el estudio sobre los RCD, se estaban discutiendo a nivel europeo diferentes posibilidades en relación con los ensayos de lixiviación más adecuados para los materiales utilizables en terraplenes, y por ese motivo se consideró

oportuno llevar a cabo ensayos de lixiviación de diferente tipo (tabla 6):

- Ensayo de tanque (NLT 326), para la caracterización de los componentes solubles de los áridos que se usen en carreteras, establecido en el PG 3 para el estudio de las zahorras.

Tabla 6. Características generales de los ensayos de lixiviación realizados por el CEDEX sobre muestras de ARM

Método	Norma	Cantidad muestra (g)	Tamaño (mm)	Relación L/S (*)	Duración (h)
Tanque	NLT 326	2.000	<31,5	10	24
Volteo	UNE EN 12457-4	90	<10	10	24
Columna	prEN 14405	1.000	< 4	0,1/2/10	504 (21 días)

(*)L/S es la relación entre volumen del lixiviante y masa del material (expresada en l/kg).

- Ensayo de lixiviación por volteo (UNE EN 12457 Parte 4), que se emplea para estudiar la posibilidad de emplazar un residuo en un vertedero; se mantiene el material granular en contacto con el agua durante un tiempo similar al ensayo de tanque (24 h).
- Ensayo de columna (prEN 14405), que analiza el comportamiento de un árido en contacto con el agua a corto y largo plazo simulando la liberación de elementos químicos por percolación del material granular. Este es uno de los ensayos establecidos por el grupo de trabajo de rellenos de tierra. La columna de percolación usada en este estudio tiene 50 mm de diámetro.

Dada la ausencia de normativa específica para la caracterización medioambiental de los ARM, los resultados de los ensayos de lixiviación realizados se compararon, en este caso, con los valores límite de la directiva de vertederos Decisión 2003/33/CE del Consejo del 19 de diciembre de 2002 (Orden AAA/661/2013). Los lixiviados obtenidos del ensayo de tanque (NLT 326) no superaron en ningún elemento los límites para proceder a su colocación en un vertedero de inertes. Los ensayos de volteo (UNE, 2003) mostraron la liberación puntual de Cr, Ni y Hg, así como de cloruros. No obstante, en todos los resultados se supera el contenido en sulfatos de 1.000mg/kg establecido en la Decisión. Los ensayos de columna (prEN 14405), que reflejan el comportamiento del material al ser percolado por agua durante un periodo de tiempo mayor, y con diferentes relaciones líquido/sólido, muestran que, de los elementos analizados, únicamente el sulfato supera los límites para permitir la colocación en un vertedero de inertes. Estos límites son superados por todas las relaciones L/S (0,1, 2 y 10 l/kg). En todo caso, dada la importancia que tiene el pH en la liberación de elementos en los lixiviados, en la actualidad se están realizando ensayos de este tipo, siendo necesario proseguir con los análisis de caracterización ambiental de estos materiales.

5. CONCLUSIONES

El marco normativo relativo a la utilización de materiales marginales y residuos en rellenos de carreteras ha

evolucionado de forma favorable en los últimos años. Para poder utilizar residuos como material de relleno de terraplenes es, en todo caso, necesario realizar estudios sobre su comportamiento mecánico e ingenieril, por un lado, y sobre su potencial contaminante, por otro. En el texto se ha intentado dar una visión de los esfuerzos del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX en este sentido a lo largo del tiempo centrada en cuatro tipos de residuos: cenizas volantes de centrales térmicas de carbón, estériles de carbón, neumáticos fuera de uso troceados y residuos de construcción-demolición.

Por lo que se refiere a la caracterización de los residuos desde el punto de vista geotécnico, y de acuerdo con la nueva normativa europea sobre obras de tierra, se admite que las reglas utilizadas con los materiales térreos naturales pueden no ser de aplicación para determinados materiales, por lo que es precisa la adaptación de estas reglas o el desarrollo de otras nuevas que sirvan para garantizar el buen desempeño mecánico de los materiales. De entre los cuatro residuos presentados, esta circunstancia es más evidente en el caso de los neumáticos troceados.

Relativamente a la caracterización ambiental, hay diferentes criterios en cuanto a los ensayos de lixiviación, ninguno de ellos aún específico para intentar reproducir las consecuencias de la colocación de los materiales en los terraplenes de carreteras. Tampoco está claramente definido con qué baremos se deben comparar los resultados de los ensayos de lixiviación para considerar admisible la utilización de los residuos en los terraplenes, tendiéndose a recurrir a criterios existentes para otras funciones, por ejemplo, la clasificación de residuos para su disposición en vertederos de inertes, de residuos no peligrosos, o de residuos peligrosos.

Siendo imprescindible la realización de estudios previos, el éxito de la valoración de residuos en terraplenes de carretera depende también de cuestiones prácticas y económicas, así como, y especialmente, de la existencia o no de otros tipos de aprovechamiento más ventajosos (ver tabla 7).

Tabla 7. Fortalezas y debilidades sobre la utilización de los cuatro residuos en terraplenes

Residuo	Fortalezas	Debilidades
Cenizas volantes	Características mecánicas buenas e incluso ventajosas en algunos aspectos. Buenas características ambientales.	Gran demanda para la fabricación de cementos y hormigones que absorbe casi toda la producción. Descenso acusado de la producción.
Estériles de carbón	Características mecánicas y ambientales, en principio, satisfactorias.	Desaparición de los estériles de mina y lavadero. Disponibilidad localizada (escombreras). Necesidad de estudios en cada caso.
NFUt	Producción continua. Sistema integrado de gestión.	Reglas de ejecución peculiares y restrictivas. Desarrollo de otras formas de valorización (polvo de neumáticos).
ARM	Material localmente abundante. Buenas características mecánicas. Existencia de red de plantas de tratamiento.	Variabilidad del material. Incertidumbres relativas a los criterios de caracterización ambiental.

6. REFERENCIAS

- ASTM (2012). D6270-08 (Reapproved 2012). *Standard Practice for Use of Scrap Tires in civil engineering Applications*.
- BOE (2003). Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *Boletín Oficial del Estado*. Núm. 45, de 21 de febrero de 2003; referencia: BOE-A-2003-3596.
- BOE (2015). Resolución de 16-nov-2015, de la D. G. de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022. <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2015-13490>.
- CEDEX (2008). Ensayos de caracterización geotécnica de neumáticos fuera de uso (NFU). Informe Técnico del CEDEX para la Dirección General de Carreteras, M. Fomento, Madrid, julio de 2008.
- CEDEX (2012a). Asesoramiento en el Proyecto “Incorporación de neumático troceado como materia prima en la construcción de rellenos”. Caracterización geotécnica y medioambiental de una muestra de neumáticos fuera de uso troceados (NFUt). Informe Técnico del CEDEX para SIGNUS Ecovalor, S.L., Madrid, marzo 2012.
- CEDEX (2012b). Asesoramiento en el Proyecto “Incorporación de neumático troceado como materia prima en la construcción de rellenos. Guía de utilización de neumáticos fuera de uso troceados (NFUt) en rellenos viarios”. Informe Técnico del CEDEX para SIGNUS Ecovalor, S.L., Madrid, junio 2012.
- CEN (2018a). EN 16907-1:2018. Earthworks - Part 1: Principles and general rules. Norma europea. Comité Europeo de Normalización.
- CEN (2018b). EN 16907-2:2018. Earthworks - Part 2: Classification of materials. Norma europea. Comité Europeo de Normalización.
- Ministerio de Fomento (2002). Orden FOM/1382/2002, de 16 mayo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes relativos a la construcción de explanaciones, drenajes y cimentaciones (PG-3).
- NLT (2000). Norma NLT-326/00 Ensayo de lixiviación en materiales para carreteras (método del tanque).
- Pardo de Santayana, F. (1993). Comportamiento geotécnico de cenizas volantes en rellenos compactados y su evolución a lo largo del tiempo. Monografías CEDEX, M-32. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Madrid.
- Pardo de Santayana, F., González Cañibano, J., y Torres, M. (1994). Utilización de estériles de carbón en rellenos de tierra reforzada. *III Simposio Nacional de Geotecnia Vial, Vigo, España, 28 a 30 de septiembre*.
- Parrilla, A. (2019) Campo normativo en Carreteras-Terraplenes. *Máster de Mecánica del Suelo e Ingeniería Geotécnica CEDEX-UNED*. Madrid.
- Santana, M., Cano, H., e Higuera, C. (2019). Caracterización de los RCD's para su uso en terraplenes: El caso español. *26º Congreso Mundial de la Carretera - PIARC. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos, octubre 2019*.
- Santos, A., y Pardo de Santayana, F. (1989). Comportamiento estático-dinámico de un relleno de cenizas volantes en Los Barrios. CEDEX-82-550-5-001. Laboratorio de Geotecnia, CEDEX. Informe para Gibraltar-Intercar, S.A. Madrid: CEDEX.
- UNE (1997). Norma UNE 932-1. Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo.
- UNE (2003). Norma UNE-EN 12457-4:2003 Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 4: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 10 mm (con o sin reducción de tamaño).
- UNE (2008). Norma europea UNE EN 13242:2003+A1:2008. Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.
- UNE (2009). Norma europea UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón.
- UNE (2010). Norma europea UNE-EN 933-11:2009/AC:2010. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.