

EL PROBLEMA DE LA CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LOS RCD PARA SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN DE TERRAPLENES EN ESPAÑA

The problem of the CDW environmental characterization for their use in earthworks in Spain

María Santana^a, José Estaire^a

^a Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, España

RESUMEN – El uso de residuos para la construcción de terraplenes es una medida que aumenta la sostenibilidad de estas obras de tierra y que está relacionada con las políticas de economía circular impulsadas por la Unión Europea (UE). Los residuos de construcción y demolición (RCD) representan un importante volumen dentro de los residuos generados. Su utilización para la construcción de terraplenes debe estar precedida por la verificación de que dichos materiales cumplan los requisitos técnicos y medioambientales de las normas correspondientes. Los requisitos medioambientales no están claramente definidos en la normativa española. La forma habitual de comprobar que los residuos no suponen un peligro para el medio ambiente es mediante la realización de ensayos de lixiviación. El problema surge en la elección del tipo de ensayo de lixiviación a emplear y la interpretación de los resultados obtenidos. En este trabajo se recoge la clasificación y usos de los RCD, los ensayos de lixiviación más habituales para su caracterización ambiental y los criterios con los que os resultados de dichos ensayos pudieran ser comparados para su correcta interpretación. Por último, se hace una reflexión sobre posibles escenarios en los que se utilicen RCD dentro de los terraplenes para evitar su afección al medio ambiente.

SYNOPSIS – The use of waste for the construction of embankments is a measure that increases the sustainability of these earthworks and links with the circular economy policies promoted by the European Union (EU). Construction and demolition waste (CDW) represent a significant volume of waste generated. Its use for the construction of embankments must be preceded by verification of technical and environmental requirements. The latter is not clearly defined in Spanish legislation. The usual way of verifying that the waste does not pose a danger to the environment is to carry out leaching tests. The problem arises when it comes to deciding what type of leaching test to use and what to compare the results with. This paper presents the classification and uses of CDW, the most common leaching tests for its environmental characterization and the criteria with which these values can be compared. Finally, a reflection is made on the possible scenario where waste can be used in embankments to avoid affecting the environment.

Palabras Clave – Áridos reciclados, ensayos de lixiviación, valores límite.

Keywords – Recycled aggregates, leaching tests, limit values.

E-mails: msruiz@cedex.es (M. Santana), jestaire@cedex.es (J. Estaire)

1 – INTRODUCCIÓN

En el año 2018 la Unión Europea (UE) generó un total de 5,2 toneladas de residuos por habitante, de los cuales, un 38,5% fue depositado en vertederos (Eurostat, 2021). En ese mismo año, los residuos de construcción y demolición (RCD) representaban el 36% del total de los residuos generados en la UE y, para el caso concreto de España suponían casi el 28%. Las políticas de economía circular, tanto las que proceden de la UE como las estatales y las autonómicas, están enfocadas a una economía en la que se reduzca la presión sobre los recursos naturales mediante la reutilización y valorización de residuos.

En España los RCD se definen, según el Real Decreto 105/2008 de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, como cualquier sustancia u objeto que, cumpliendo la definición de «Residuo» incluida en el artículo 3.a) de la Ley 22/2011, de 28 de julio, se genere en una obra de construcción o demolición. Esta definición se mantiene vigente en la Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular (BOE nº 85), denominada Ley de Residuos de aquí en adelante. Por otro lado, el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 pretende adaptar los procedimientos de reciclado de materiales a las directivas europeas, marcando para los RCD una serie de objetivos que básicamente consisten en el aumento de la valorización de estos residuos. El Plan incluye orientaciones para conseguir dichos objetivos entre los que se encuentra *“Promocionar la utilización de los materiales procedentes de los RCD valorizables en las obras de construcción, tales como obras de tierra, de capas estructurales (sub-bases de carretera, capa de forma y sub-balasto en obras de ferrocarril), así como la fabricación de hormigones, etc., siempre y cuando se garantice que los materiales reciclados cumplan los requisitos de calidad y prescripciones de la normativa vigente en cada caso”*.

La utilización de los RCD como material para la construcción de terraplenes requiere la previa determinación de sus características geotécnicas que permitan establecer su comportamiento tenso-deformacional, además de garantizar que su utilización no es peligrosa para el medio ambiente.

Los requisitos técnicos de los materiales, ya sean naturales o reciclados, están claramente definidos en función del tipo de aplicación en las normativas correspondientes. Sin embargo, no se establece con claridad cómo garantizar que el empleo de dichos materiales no implica un problema sobre el medio ambiente.

En este trabajo se recopila parte de la normativa autonómica, española y de otros países europeos referente a los áridos reciclados y se centra en analizar cómo encaran y analizan la afección de los áridos reciclados sobre el medio ambiente para su uso como material en la construcción de terraplenes.

2 – LOS ÁRIDOS PROCEDENTES DE LOS RCD

2.1 – Clasificación de los áridos reciclados

Los 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, compuestos fundamentalmente por hormigón, cemento, piedra natural, material bituminoso, cerámicos, papel, plástico y yeso. Estos materiales quedan recogidos en el artículo 30 de la Ley de Residuos. El trabajo de Gálvez-Martos et al. (2018) recoge los rangos porcentuales mínimos y máximos de la composición de los RCD en Europa (mostrados en la Tabla 1).

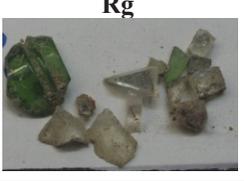
Según la norma EN 12620, el árido reciclado (AR) es *“el árido resultante del tratamiento del material inorgánico previamente utilizado en la construcción”*, siendo el principal producto que se obtiene de la valorización de los RCD.

Tabla 1 – Porcentajes mínimos y máximos de los componentes en los RCD (tomado de Gálvez-Martos et al. 2018).

Componente	Rango (%)
Hormigón y albañilería	40-84
Hormigón	12-40
Albañilería	8-54
Asfalto	4-26
Otros (origen mineral)	2-9
Madera	2-4
Metal	0,2-4
Yeso	0,2-0.4
Plástico	0,1-2
Varios	2-36

El empleo de cualquier material pasa por la identificación del mismo con su correspondiente nomenclatura. En el caso de los áridos reciclados, la composición heterogénea, como queda

Tabla 2 – Componentes de los áridos gruesos reciclados según la EN 933-11.

Componente	Descripción	Componente	Descripción
<p>Rc</p> 	Hormigón, productos de hormigón, mortero, unidades de albañilería de hormigón	<p>Rb</p> 	Unidades de albañilería de arcilla (ladrillos, tejas), unidades de albañilería de silicato cálcico, hormigón aireado no flotante
<p>Ru</p> 	Áridos no tratados, piedra natural, áridos tratados con conglomerantes hidráulicos	<p>Ra</p> 	Materiales bituminosos
<p>X</p> 	Otros: arena, arcilla, metales, madera no flotante, plástico, caucho, yeso	<p>Rg</p> 	Vidrio
<p>FL</p> 	Materiales flotantes	---	---

reflejado en la Tabla 1, es una característica intrínseca que obliga a una subdivisión o clasificación de los áridos que tenga como base este hecho. Tomando como referencia la norma europea EN 13242:2003+A1:2008, la composición de los áridos gruesos reciclados debe realizarse con la norma EN 933-11, cuyos componentes se muestran en la Tabla 2.

Estos componentes (o fracciones) coinciden además con lo recogido en la Ley de Residuos, donde se indica que “A partir del 1 de enero de 2022, los residuos de la construcción y demolición no peligrosos deberán ser clasificados en, al menos, las siguientes fracciones: madera, fracciones de minerales (hormigón, ladrillos, azulejos, cerámica y piedra), metales, vidrio, plástico y yeso. Esta clasificación se realizará de forma preferente en el lugar de generación de los residuos y sin perjuicio del resto de residuos que ya tienen establecida una recogida separada obligatoria. 3. La demolición se llevará a cabo preferiblemente de forma selectiva, y con carácter obligatorio a partir del 1 de enero de 2024, garantizando la retirada de, al menos, las fracciones de materiales indicadas en el apartado anterior, previo estudio que identifique las cantidades que se prevé generar de cada fracción, cuando no exista obligación de disponer de un estudio de gestión de residuos”.

Una vez segregados los RCD por componentes, los áridos resultantes pueden ser clasificados. Si bien es cierto que no existe normativa específica para dicha clasificación, lo más habitual es subdividirlos en función del componente principal, distinguiéndose entre áridos reciclados de hormigón, áridos reciclados asfálticos, áridos reciclados cerámicos y áridos reciclados mixtos

Tabla 3 – Clasificaciones existentes de los áridos reciclados mixtos según varios documentos.

Ref.	País/CCAA	Deno.	Rc (%)	Ru (%)	Rg (%)	Rb (%)	Ra (%)	X (%)	FL (cm ³ /kg)
¹ Norma firmes	España/Euskadi	AR-M	^a	Rc+Ru+Rg ≥70 ^b	<2	≤30	≤10	≤1 ^c	≤5
² Aprr.eus	España/Euskadi	ARMh	Rc+Ru+Rg≥70			≤30	-	-	-
		ARMc	Rc+Ru+Rg<70			>30	-	-	-
³ Borrador PPT ^d	España/Extrema dura	ARMh	≥70		-	≤30	<5	<1	-
		ARMc	<70		-	>30	<5	<1	-
⁴ Guía Andalucía Central	España/Andalucía	ARM I	≥55 y Rc+Ru+Ra≥70		-	-	≤15	<1	<1
		ARM I	≥55 y Rc+Ru+Ra≥70		-	-	≤15	<2	<2
⁵ Redacción Pliegos ^e	España/Andalucía	ZR RCD	≥70	-	-	≤10	≤5	≤1	≤10
NF-P-18-545	Francia	ARM	Rc+Ru+Rg≥70 y Rg<2			-	-	<1	<5
BRL-2506-1 ^f	Países Bajos	Tipo B	>70		<2	<30	<5	<2	<2
		Tipo C	-	-	<2	>85	<5	<2	<2
DIN 4226-101 ^g	Alemania	Tipo 2	≥70		≤3	≤30	≤1	≤0,5	-
		Tipo 3	≤20		≤5	≥80	≤1	≤0,5	-
PTV-406 ^g	Bélgica	ARM	>50		<2	<50	<5	<1	<5
		ARM ^h	<40		<2	>60	<5	<1	<5
		ARM ⁱ	>70		<2	<30	<5	<1	<2

¹ Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. Gobierno Vasco. 2012

² Usos del Árido Reciclado de RCD Dossier Fichas Técnicas de unidades de obra donde se pueden utilizar Árido Reciclado de RCD y Ejemplos de obras donde se han utilizado Árido Reciclado de RCD en alguna de sus unidades de obra. 2019

³ Borrador de Decreto por el que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas para el uso de áridos reciclados procedentes de RCD en Extremadura. Junta Extremadura. 2019

⁴ Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central. Junta de Andalucía. 2015

⁵ Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD). Junta de Andalucía. 2010

^aSin requisito; ^bRg<2%; ^cyeso inferior a 0,8% y otros <0,8%; ^dUso GEX-ET-02; ^eArtículo Zahorra de RCD; ^fMaterial para relleno; ^gse recogen los valores de los áridos reciclados mixtos; ^hárido reciclado mixto cerámico; ⁱárido reciclado mixto cerámico de calidad

(ARM). Los ARM contienen una mezcla de residuos de hormigón y residuos cerámicos. Representan porcentualmente el mayor volumen del generado en las plantas de tratamiento y el que tiene una revalorización más compleja debido a su composición mixta. Quedan incluidos dentro de la nomenclatura LER (Listado Europeo de Residuos) como 17 01 07. Con objeto de mostrar la variedad de nomenclaturas y subdivisiones posibles de los áridos reciclados mixtos, en la Tabla 3 se muestran varios ejemplos recogidos tanto en documentos nacionales como europeos.

Como se observa en la tabla anterior, cada documento muestra valores diferentes en los porcentajes de los componentes de los ARM. Países Bajos y Alemania incluyen además un tipo de áridos donde el contenido de Rb supera el 80%. Como norma general, en todos los documentos se exige que el contenido en otros componentes “X” (entre los que se encuentra el yeso) sea inferior a valores que oscilan entre 0,5 y 2%. El contenido en partículas flotantes también es diverso, con un rango que impide una presencia superior a entre 1 y 10 cm³/kg. La Tabla 4 recoge la propuesta de clasificación del proyecto europeo Cinderela (2021) para los ARM en la que se incluyen los límites máximos y mínimos de los componentes para dos clases de calidad.

Tabla 4 – Propuesta de clasificación de los ARM (tomado de Cinderela, 2021).

Denominación	Calidad	Rc+Ru+Rg (%)	Rb (%)	Ra (%)	Rg (%)	X (%)	FL (cm ³ /kg)
ARM	Superior	≥70	≤30	≤5	≤1	≤1	≤1
	Inferior	≥50	≤50	≤10	≤2	≤1	≤5

La heterogeneidad en la composición de los áridos reciclados tiene su origen tanto en la procedencia de los residuos de construcción y demolición, como en los métodos de tratamiento o limpieza a los que son sometidos en las plantas de tratamiento. Teniendo en cuenta que la heterogeneidad de los materiales genera variabilidad en las propiedades, es importante obtener áridos reciclados con el mayor grado de homogeneidad posible. Para conseguir esa homogeneidad en su composición es fundamental realizar primero una demolición selectiva en origen, tal y como también contemplan los trabajos de Cinderela (2021) y Saveyn et al. (2014) y que también se exige en la Ley de Residuos y posteriormente una selección y limpieza en las plantas de tratamiento. Uno de los componentes más problemáticos en los áridos reciclados es el yeso, cuyo uso en terraplenes está directamente relacionado con los fenómenos de cambios de volumen, disolución y lixiviación de ese material. En los últimos años se han publicado varios trabajos enfocados a detectar y eliminar el yeso existente en los RCD en las plantas de reciclaje mediante diversas técnicas: por aire y densidad (Ambrós et al., 2017), infrarrojos (Linß et al., 2017), técnicas de imagen (Hollstein et al., 2017) y sistema biológico (Kijjanapanich, 2013).

Según se recoge en la bibliografía, la limitación en el contenido de las diferentes fracciones viene justificado por su aficción a las propiedades técnicas para sus posibles aplicaciones. Así, elevados contenidos en partículas flotantes (FL) pueden generar problemas de comportamiento a largo plazo debido a la evolutividad de materiales como la madera. El componente X incluye el yeso, elemento problemático desde el punto de vista de los fenómenos de cambios de volumen, disolución y lixiviación, como se apuntó anteriormente. Por último, el componente Rb, en el que se incluyen por ejemplo los ladrillos y otros materiales de elevada porosidad, afecta a las propiedades de absorción implicando, entre otras, una necesidad de mayor cantidad de agua para las operaciones de compactación (Herrador et al., 2012).

2.2 – Usos de los ARM en aplicaciones geotécnicas

Se quiere destacar en primer lugar que, en la terminología geotécnica, en ocasiones, el término árido dentro de la construcción de terraplenes queda asociado a las zahorras para su uso en el firme, mientras que para la conformación del terraplén lo habitual es utilizar la palabra genérica

“materiales”. Sin embargo, en este trabajo se hace mención a la palabra árido sin que quede asociado a su uso como zahorras. Además, las normativas de ensayos de caracterización son diferentes para los áridos que para los materiales tipo suelo. En este trabajo se analiza el uso de áridos reciclados para su empleo en la construcción de terraplenes, por lo que se da la circunstancia de la necesidad de emplear normativa de ensayo para áridos y para suelos.

En los últimos años se han publicado numerosos trabajos relacionados con la utilización de los áridos reciclados en aplicaciones geotécnicas. La mayor parte de los mismos están dedicados al empleo de los áridos reciclados en hormigón (Silva et al., 2015, Sharkawi et al., 2016), como base y sub-base de carreteras (Barbudo et al., 2012; Jiménez et al., 2012; Arulrajah et al., 2013) o como relleno de zanjas (Rahman et al., 2014). También es interesante destacar los estudios de empleo de RCD en estructuras de relleno reforzadas con geosintéticos, (Vieira et al., 2016), como relleno de gaviones (Nawagamuwa et al., 2012), relleno de zanjas de tuberías (Rahman et al., 2014), cobertura de vertederos (Harnas et al., 2013), o material para la mejora del terreno por vibración (McKelvey et al., 2002).

En el ámbito español, las comunidades autónomas de Andalucía, Castilla y León, Euskadi y Extremadura han redactado documentos para el uso de los áridos reciclados procedentes de RCD, donde se incluyen criterios específicos para el uso de los ARM para la construcción de terraplenes, como se recopila en la Tabla 5.

Tabla 5 – Cuadro resumen de documentos españoles con referencia al uso de ARM en construcción de terraplenes

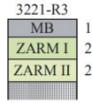
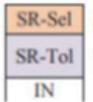
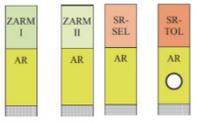
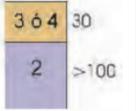
Comunidad Autónoma	Referencia	Uso	Ejemplo	
Andalucía	Catálogo de firmes ¹	Zahorra (ZARM I y ZARM II) en carreteras, caminos rurales, vías peatonales y vías ciclistas		Explanada E2, Tráfico T3B
		Explanada (SR-SEL: suelo reciclado de RCD seleccionado y SR-TOL: suelo reciclado de RCD tolerable)		Explanada E1 sobre suelo inadecuado (IN)
		Rellenos drenantes y zanjas (ZARM I y ZARM II, SR-SEL y SR-TOL)		Tubería flexible bajo zona peatonal
	Recomendaciones redacción pliegos ²	Zahorras artificiales de RCD Suelos reciclados de RCD		
Castilla y León	Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD ³	Firmes de obras viarias Firmes de caminos rurales Acerado y vías peatonales Firmes de vías	Los usos son idénticos a los recogidos en el Catálogo de firmes de Andalucía y con la misma denominación	

Tabla 5 – Cuadro resumen de documentos españoles con referencia al uso de ARM en construcción de terraplenes

Comunidad Autónoma	Referencia	Uso	Ejemplo
		ciclistas Obras de drenaje y zanjas	
Euskadi	Dimensionamiento de firmes ⁴	Suelo seleccionado (tipo 3 o 4) para uso en terraplenes y explanada mejorada	
	Manual uso áridos reciclados en OOPP ⁵	Restauración de canteras, pistas forestales, pistas en vertederos, cubiertas planas, zanjas, terraplenes y rellenos, relleno bajo solera y subbase de secciones peatonales, base de bidegorris, trasdós de muros, explanada, base y subbase de firmes	Explanada mejorada EX2 sobre suelo adecuado
Extremadura	PPT uso áridos reciclados ⁶	ARMh (árido reciclado mixto de hormigón) y ARMc (árido reciclado mixto cerámico) para su uso como zahorra, suelo reciclado, suelo cemento y cama de tuberías	

¹ Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD. Junta de Andalucía, 2016.
² Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD). Junta de Andalucía, 2010.
³ Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's. CITOP, 2019.
⁴ Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco. Gobierno Vasco, 2012.
⁵ Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Gobierno Vasco, 2009.
⁶ Borrador de Decreto por el que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas para el uso de áridos reciclados procedentes de RCD en Extremadura. Junta de Extremadura, 2019.

Los ARM suponen un 80% del volumen total de áridos reciclados producidos en las plantas de tratamiento de los RCD (CEDEX, 2014). Las cantidades tan elevadas de este tipo de árido reciclado hacen necesario que se estudie su utilización en aplicaciones geotécnicas que admitan importantes volúmenes de material. Una de estas aplicaciones es la construcción de terraplenes cuyo estudio preliminar para el caso de España se recoge en el proyecto GEAR (Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de RCD) (2012) y en Santana et al. (2019).

Las conclusiones más relevantes de estos estudios indican la viabilidad técnica del uso de áridos reciclados procedentes de RCD (incluidos los ARM) como material de construcción de terraplenes pero la existencia de problemas medioambientales por la lixiviación de componentes con afección al medio ambiente, principalmente sulfatos. En el presente trabajo se amplía la investigación sobre los requisitos medioambientales que deben ser analizados para su empleo en la construcción de terraplenes.

2.3 – Requisitos físico-químicos de los ARM para su uso en terraplenes

En España, los requisitos para el empleo de materiales en la construcción de terraplenes quedan recogidos en el artículo 330 “Terraplenes” del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (Ministerio de Fomento, 2004), conocido como PG3. Tal y como se recoge en el propio artículo, estas exigencias son aplicables tanto a los áridos naturales como a los procedentes de procesos industriales, indicando de forma explícita: “*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*”. A este respecto, hay que indicar que los ensayos de laboratorio recogidos en dicho pliego para clasificar los materiales en función de su validez para el empleo en terraplenes son ensayos desarrollados para materiales tipo suelo.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que la norma europea EN 13242:2003 también incluye un listado de ensayos para la caracterización de los áridos, incluidos los reciclados para su uso como material de construcción de carreteras. Además, estos son los ensayos de referencia que se utilizan para el marcado CE de los áridos. Este conjunto de ensayos debe considerarse complementario de los indicados en el PG3 que son los obligatorios a cumplir.

En la Tabla 6 se recopilan tanto los ensayos que se incluyen en el artículo de terraplenes del PG3 como en la norma europea EN 13242, relacionados con la caracterización del árido para su uso como material de construcción de terraplenes.

Tabla 6 – Ensayos para el uso de suelos y áridos en terraplenes.

Artículo 330 del PG3		EN 13242	
Ensayo	Norma	Ensayo	Norma
Granulometría	EN ISO 17892-4	Granulometría	EN 933-1
Límites de Atterberg	EN ISO 17892-12	Clasificación componentes	EN 933-11
Contenido en materia orgánica	UNE 103204	Ensayo de Equivalente de arena	EN 933-8
Contenido en yeso	UNE 103201	Peso específico y Absorción	EN 1097-6
Contenido sales solubles distintas del yeso	NLT 114	Sulfato soluble en agua	EN 1744-1
Ensayo CBR	UNE 103502	Compuestos solubles en agua	EN 1744-3
Hinchamiento libre	UNE 103601	Desgaste de Los Ángeles	EN 1097-2
Colapso	NLT 254	---	---

3 – CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS

3.1 – Problemas asociados a la caracterización ambiental de los áridos reciclados

El empleo de materiales distintos a los naturales, como es el caso de los áridos reciclados, en la construcción de terraplenes, está sujeto, como cualquier otro material, al cumplimiento de las especificaciones técnicas exigidas en la normativa para su uso concreto, además de la evaluación de sus características medioambientales. El fin de la evaluación medioambiental es verificar que los materiales utilizados no van a generar impactos adversos para el medio ambiente o para la salud de las personas, de acuerdo con lo dispuesto en la legislación vigente en materia

medioambiental, de seguridad y salud. Estos aspectos quedan recogidos en el artículo 330 de terraplenes del PG-3.

La metodología habitual para determinar la afección de los áridos al medio ambiente es la ejecución de ensayos de lixiviación en laboratorio. Sin embargo, el desarrollo práctico de dicha metodología presenta los siguientes problemas:

- no se ha determinado el tipo de ensayo de lixiviación, de los varios existentes, que se debe emplear en la evaluación medioambiental para el uso de áridos reciclados en la construcción de terraplenes, como se indica en el apartado 3.2;
- no están claramente especificados, en ningún documento normativo en España, los criterios y los valores-límite con los que se deberían comparar los resultados de los ensayos de lixiviación para determinar la validez del uso de estos materiales en la construcción de terraplenes, como se indica en el apartado 3.3.

3.2 – Ensayos de lixiviación

3.2.1 – Ideas generales

Los estudios de evaluación medioambiental de los materiales se vienen haciendo mediante ensayos de lixiviación en los que se trata de determinar, en diferentes situaciones, la liberación al agua de los posibles componentes que pudieran contener dichos materiales y que pudieran generar impactos adversos para el medio ambiente o la salud

En un ensayo de lixiviación se produce la transferencia de los elementos químicos presentes en las fases sólidas a la fase acuosa con la que está en contacto. Para ello, en los ensayos se pone en contacto el material a estudiar con un disolvente líquido (generalmente agua) para determinar los componentes del mismo que se pueden disolver en contacto con el disolvente. La interacción de los materiales con el agua (superficial o subterránea) puede producir procesos de lixiviación y transporte de la fase sólida a la acuosa (Barbudo, 2012). Según Saveyn et al. (2014), los ensayos de lixiviación son más adecuados que los ensayos de contenido total para estos estudios.

Existen varios métodos de ensayo para estudiar la lixiviación de materiales granulares, los cuales se realizan con condiciones diferentes referentes al tamaño de partícula utilizado, la cantidad de material, la relación líquido-sólido (L/S) o la duración del ensayo. Además, la lixiviación va a depender de variables como el pH, tamaño de las partículas, el tiempo de contacto o la relación L/S (Quina et al., 2011).

En general, es posible diferenciar entre los ensayos de tanque, de baño (*bath test*, en su denominación inglesa) y de percolación. Los dos primeros son de ejecución más sencilla y rápida mientras que los ensayos de percolación modelizan mejor las condiciones reales a las que estarán sometidos los áridos. Saveyn et al. (2014) indican que la elección del ensayo de lixiviación más adecuado debe hacerse en función del escenario o condiciones en las que se van a utilizar los áridos. También incluye un análisis de la lixiviación de diferentes metales en función de factores tan importantes como el pH o la relación L/S.

De forma general, y en este contexto, parece relevante recordar que los resultados de los ensayos de lixiviación pueden expresarse como:

- Concentración de los componentes en el eluato (generalmente en mg/l)
- Liberación de componentes, expresado como ratio de masa de sustancia liberada y masa de material ensayado (generalmente en mg/kg)

La relación entre la medida de liberación de componentes y su concentración en el eluato depende de la relación L/S y puede calcularse como se indica a continuación (Saveyn et al., 2014):

Liberación componentes [mg/kg] = Concentración sustancia en eluato [mg/l] x relación L/S [l/kg]

Tal y como se ha señalado anteriormente, la relación L/S del ensayo debe tenerse en cuenta en la interpretación de los resultados obtenidos. Además cabe señalar que, para la mayoría de los componentes que se analizan en los ensayos de lixiviación, los valores máximos obtenidos aparecen durante los primeros estadios de la lixiviación, es decir, con relaciones L/S pequeñas. No obstante, para aquellos componentes cuya lixiviación está controlada por la solubilidad, sus resultados varían con la relación L/S (Saveyn et al., 2014).

3.2.2 – Ensayos de lixiviación normalizados para materiales granulares

Existen tres comités técnicos europeos de normalización (CEN/TC) que desarrollan normas europeas (EN) para la determinación de la lixiviación de diferentes tipos de materiales: el CEN/TC 154 de áridos, CEN/TC 292 de residuos y CEN/TC 351 de productos de construcción. Al analizar las normas elaboradas por estos comités, se observa que cada uno de ellos ha desarrollado la suya propia referente a los ensayos de lixiviación, como se recoge en la Tabla 7.

Tabla 7 – Normas europeas para determinar la lixiviación según los diferentes comités

CEN/TC - Denominación	Norma Europea (EN)
TC 154 - Áridos	EN 1744-3: Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos.
TC 292 - Residuos	EN 12457-1/2/3/4: Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos
	EN 14405: Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente (bajo condiciones específicas).
	EN 14997: Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación. Influencia del pH en la lixiviación con control continuo de pH
TC 351 – Productos de construcción	prEN 16637-1/2/3: Productos de construcción. Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas.

El problema que se plantea en el ámbito de este artículo es que los “áridos reciclados” son, como su nombre indica áridos, cuyo origen son residuos y que pretenden ser utilizados como productos de construcción. Por tanto, el ensayo de lixiviación más adecuado para su caracterización ambiental podría ser cualquiera de los mencionados en la tabla anterior.

A continuación se resumen brevemente las características más singulares de los ensayos de lixiviación utilizados para el uso de materiales granulares:

- EN 1744-3, conocido como “Método de tanque”: Método de ensayo utilizado para la caracterización de zahorras que además se recoge en el PG3. El ensayo consiste en colocar el árido en un recipiente de malla, situado en el interior de un tanque, y someterlo a lixiviación con agua desmineralizada. El cociente entre el líquido empleado y el sólido (L/S) es de 10 l/kg. La duración del proceso de lixiviado es de 24 horas en las que el agua se mantiene en continuo movimiento mediante agitación magnética.
- EN 12457-3/4, conocido como “Método de volteo”: Método de ensayo de conformidad para el depósito de residuos en vertederos. El ensayo consiste en poner en contacto el árido con agua desionizada en una relación líquido/sólido (L/S) de 10 l/kg. El conjunto se agita durante 24 horas con una volteadora mecánica. La Tabla 8 muestra las diferencias entre la parte 3 y 4 de la norma.

Tabla 8 – Resumen de las características del ensayo de lixiviación UNE EN 12457

Norma	Peso de muestra (g)	Tamaño partícula (mm)	L/S (l/kg)	Tiempo contacto (horas)
EN 12457-3	175	<4	2 y 8	6 + 18
EN 12457-4	90	<10	10	24

- EN 14405, conocido como “Ensayo de columna”: El material granular se pone en contacto con agua que se encuentra en flujo ascendente continuo y a una velocidad determinada. A lo largo del ensayo se recogen los lixiviados con diferentes relaciones L/S (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5 y 10) para determinar la evolución de los componentes lixiviados con el tiempo.
- EN 14997, conocido como “Ensayo dependencia de pH”: Ensayo realizado sobre material granular con una relación L/S de 10 l/kg. Los ensayos se realizan sobre materiales con valores de pH comprendidos entre 4 y 12 (ambos incluidos) y tienen una duración de 24 horas.
- prEN 16637-3, conocido como “Ensayo de percolación”: El procedimiento de ensayo es prácticamente idéntico al anterior, si bien en este ensayo se exige un agua de calidad más pura, el caudal de paso es mayor y se disminuye el tiempo de duración del ensayo.

Según Naka et al. (2016), los ensayos de tanque sirven para comprobar de forma rápida y preliminar el comportamiento de los áridos, pero sus extrapolaciones, debido a que sólo se ensayan con una única relación L/S, no se puede considerar que reflejen fielmente las condiciones reales. Además, el escaso periodo de contacto con el líquido (24 horas) puede no ser suficiente para alcanzar el equilibrio de determinados metales por lo que se infravalora la lixiviación (Löv et al., 2019).

El ensayo de volteo es una primera aproximación al problema de la lixiviación. Su utilización como ensayo de referencia en la disposición de materiales en vertederos hace que sea un método conocido y ampliamente implantado.

Por su parte, los ensayos de percolación de flujo ascendente modelizan más fielmente las condiciones reales y el comportamiento a largo plazo de los compuestos químicos de los áridos en contacto con el agua. Van a simular los procesos de percolación e infiltración del agua a través del material y su lixiviación al medio ambiente (Chai et al., 2009).

Por último, los ensayos de dependencia con el pH aportan información adicional y permiten estudiar diferentes escenarios provocados, por ejemplo, por carbonatación.

Son varios los países europeos que tienen regulación sobre el uso de áridos reciclados para la construcción de obras de tierra, tales como Francia (Cerema, 2011), Finlandia (Ministerio de Medio Ambiente, Finlandia, 2017) y República Checa (Ministerio de Transporte, República Checa, 2011) en los que se establece el ensayo de lixiviación que se debe utilizar para caracterizar el árido reciclado. Por otra parte, otros países también han desarrollado guías o regulaciones para determinar la condición de fin de residuo de diferentes materiales, donde se estipula cual es el ensayo de lixiviación a realizar. En la Tabla 9 se muestran los tipos de ensayos de lixiviación recogidos en varios países.

Por tanto, como se observa del análisis anterior, no existe unanimidad en el tipo de ensayo de lixiviación que debe utilizarse para caracterizar los áridos reciclados, aunque la mayoría parece decantarse por el establecido en la norma EN 12457 (“método de volteo”).

Tabla 9 – Ensayos de lixiviación de referencia en países europeos para el uso de áridos reciclados en obras de tierra y condición de fin de residuo

País	Norma
Alemania	DIN 19528
Austria	EN 12547-4
Bélgica	EN 14405
Dinamarca	EN 12457-1
Finlandia	EN 14405
Francia	EN 12457-2
Italia	EN 12547-2
Países Bajos	EN 14405
Rep. Checa	EN 12457-4
Suecia	EN 12457-4

3.3 – Criterios para determinar la afección al medio ambiente

3.3.1 – Introducción

Una vez realizados los ensayos de lixiviación, los resultados obtenidos deben ser comparados con valores-límite que determinen su afección al medio ambiente. A este respecto, actualmente hay dos posibles criterios sobre los valores-límite que se podrían utilizar:

- los indicados en la Directiva para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero, como se desarrolla en el Apartado 3.3.2.
- los indicados para la determinación de la condición de fin de residuo, especificados en diferentes documentos europeos, como se desarrolla en el Apartado 3.3.3.

A este respecto, hay que indicar que la mayoría de los artículos científicos que analizan el uso de los áridos reciclados en carreteras en España comparan los valores de los ensayos de lixiviación con los límites para el depósito en vertedero (proyecto GEAR, 2012, Barbudo et al., 2012, Galvín et al., 2013, Galvín et al., 2014, Vegas et al., 2015 y Santana et al., 2019).

3.3.2 – Directiva para la eliminación de residuos mediante su depósito en vertedero

La Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, transpuesta al ordenamiento jurídico español mediante el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre y, actualizada por el Real Decreto 646/2020, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, regula el procedimiento para la admisión de residuos en vertedero y clasifica los vertederos en tres tipos (Vertederos para Residuos Inertes, para Residuos No Peligrosos y para Residuos Peligrosos) en función de los residuos que puede almacenar.

En cada caso se establecen los criterios de admisión, según unos valores-límite de lixiviación y de contenido de componentes orgánicos. Para los valores-límite de lixiviación se definen dos supuestos:

- para un lixiviado obtenido según el método de la Norma EN 12457-4:2003 con una relación L/S de 10 l/kg (se trata del método de referencia) y,
- para el primer eluato (C_0), obtenido según el método en columna de acuerdo con EN 14405, con una relación L/S de 0,1 l/kg.

El procedimiento consiste en comparar los valores de los elementos lixiviados, según los procedimientos indicados, con los valores-límites establecidos para los distintos tipos de residuos. En la Tabla 10 se incluyen los valores-límites incluidos dentro del Real Decreto 646/2020. Los

métodos y valores elegidos por España son idénticos a los señalados en la normativa europea, con la única diferencia de que en la Directiva europea se añade, al análisis, el valor obtenido con el ensayo EN 12457-4 con una L/S = 2 l/kg.

Tabla 10 – Valores-límite de lixiviación para residuos recogidos en el RD 646/2020

Componentes	RESIDUOS					
	INERTE		NO PELIGROSO		PELIGROSO	
	EN 12457-4	-EN 14405	EN 12457-4	-EN 14405	EN 12457-4	-EN 14405
	L/S=10 l/kg	C ₀ L/S=0,1 l/kg	L/S=10 l/kg	C ₀ L/S=0,1 l/kg	L/S=10 l/kg	C ₀ L/S=0,1 l/kg
	(mg/kg de materia seca)	(mg/l)	(mg/kg de materia seca)	(mg/l)	(mg/kg de materia seca)	(mg/l)
As	0,5	0,06	2	0,3	25	3
Ba	20	4	100	20	300	60
Cd	0,04	0,02	1	0,3	5	1,7
Cr total	0,5	0,1	10	2,5	70	15
Cu	2	0,6	50	30	100	60
Hg	0,01	0,002	0,2	0,03	2	0,3
Mo	0,5	0,2	10	3,5	30	10
Ni	0,4	0,12	10	3	40	12
Pb	0,5	0,15	10	3	50	15
Sb	0,06	0,01	0,7	0,15	5	1
Se	0,1	0,04	0,5	0,2	7	3
Zn	4	1,2	50	15	200	60
Fluoruros	10	2,5	150	40	500	120
Cloruros	800	450	15.000	8.500	25.000	15.000
Sulfatos	1.000*	1.500	20.000	7.000	50.000	17.000

(*) Aunque el residuo no cumpla estos valores correspondientes al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1 500 mg/l en C₀ con una relación = 0,1 l/kg y 6 000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario utilizar la ensayo de percolación para determinar el valor límite con una relación L/S = 0,1 l/kg en las condiciones iniciales de equilibrio, mientras que el valor con una relación L/S = 10 l/kg se podrá determinar, bien mediante una prueba de lixiviación por lotes, bien mediante una ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local.

El trabajo de Saveyn et al. (2014) recopila, para varios tipos de áridos reciclados, un listado con los componentes liberados por lixiviación que superan los valores-límites establecidos para su depósito en un vertedero para materiales inertes indicados en la Directiva europea. En el caso concreto de los ARM se indica que suelen superarse los límites para el Cd, Pb y cloruros, y que además, en los ensayos de dependencia de lixiviación con el pH también se excede en Sb, V y sulfatos. Cabe recordar que elementos como As, Sb, Se, Mo, V y sulfatos son menos lixiviables con pH de entre 7 y 10.

3.3.3 – Determinación de la condición de fin de residuo

La Directiva Marco de Residuos y su transposición en España a través de la Ley de Residuos define los conceptos de subproducto y condición de fin de residuo, conceptos ambos que se mantienen en la futura Ley de Residuos y suelos contaminados. En la Ley de Residuos (BOE nº 85)), la condición de fin de residuo queda definida en su artículo 5, donde se indica: “Determinados tipos de residuos, que hayan sido sometidos a una operación de valorización, incluido el reciclado, podrán dejar de ser considerados como tales, a los efectos de lo dispuesto en esta Ley, siempre que se cumplan todas las condiciones siguientes: a) Que las sustancias u

objetos resultantes se usen habitualmente para finalidades específicas; b) que exista un mercado o una demanda para dichas sustancias u objetos; c) que las sustancias u objetos resultantes cumplan los requisitos técnicos para finalidades específicas, la legislación existente y las normas aplicables a los productos; y d) que el uso de la sustancia u objeto resultante no genere impactos adversos para el medio ambiente o la salud...”. Además, en el segundo apartado del mismo artículo se apunta a que “en la determinación reglamentaria de los criterios específicos se tendrán en cuenta los estudios previos realizados para este fin ...”.

La UE, consciente de el problema generado por los RCD, lleva impulsando desde hace años proyectos para estudiar su valorización y reutilización: RE4-project, VEEP, Interreg, Cityloops, Green Instruct, Hiser, C2CA, CDWaste-ManageVET, entre otros.

El trabajo publicado por Saveyn et al. (2014) es una primera aproximación al intento de fijar valores-límite de los componentes que pueden producir afección al medio ambiente que se producen por la lixiviación de áridos procedentes de diferentes residuos. Entre los áridos reciclados analizados se incluyen los procedentes de RCD, pero también otros tan variados como escorias de altos hornos o arco eléctrico, cenizas de fondo y cenizas volantes de incineración de residuos urbanos, troceado de neumático fuera de uso, etc. La virtud de este trabajo es que unifica todos los valores al transformarlos a una misma unidad (expresa los valores-límite de los elementos en mg/kg para una relación L/S de 10 l/kg) lo que facilita grandemente su comparación.

Por su parte, el proyecto europeo Cinderela incluye dentro de sus tareas la redacción del documento “End of Waste criteria protocol for waste used as aggregates” (Cinderela, 2021). Una de las partes del trabajo recopila la normativa de ensayo de lixiviación utilizada por varios países europeos para evaluar la afección al medio ambiente de los áridos reciclados (entre los que se incluyen los áridos procedentes de los RCD) y los valores-límites de metales, cloruros, fluoruros y sulfatos establecidos por dichos países.

Los valores recogidos tanto en el proyecto Cinderela (2021) como en el trabajo de Saveyn et al. (2014) así como los valores-límite para el depósito de materiales inertes en vertederos, según la

País	Categ	Componente – Valor límite lixiviado (mg/kg en L/S=1/10 l/kg)														Norma	
		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Mo	Ni	Se	Sb	Zn	Cl-	F-	SO ₄	EN
1 España (Euskadi)		0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5	0,5	0,4	0,1	0,06	10	800	10	6000	1
		0,5	10	0,05	0,5	0,5	0,01	0,5		0,1	0,1		30	1000	15	2500	2
Eslovenia		0,1	5	0,025	0,5	0,5	0,005	0,5	0,5	0,4	0,6	0,3	2	800	10	1000	
Bélgica		0,8		0,03	0,5	0,5	0,02	1,3		0,75			2,8				
Países Bajos	^{a-c}	0,9	22	0,04	0,63	0,9	0,02	2,3	1	0,44	0,15	0,17	4,5	616	55	1730	4
	^{b-d}	2	100	0,06	7	10	0,08	8,3	15	2,1	3	0,7	14	8800	1500	20000	4
2 Alemania	Z0/Z1.1	0,14		0,015	0,125	0,2	0,005	0,4		0,15			1,5	300		200	2
	Z1	0,2		0,03	0,25	0,6	0,01	0,8		0,2			2	500		500	2
	Z2	0,6		0,06	0,6	1	0,02	2		0,7			6	1000		2000	2
Austria	^a A	0,5	20	0,04	0,3	0,1	0,01	0,5		0,4	0,1	0,06	4	800	10	1500	1
	¹ A+	0,5	20	0,04	0,5	1	0,01	0,5		0,4	0,1	0,06	4	800	10	2500	1
	² B	0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5		0,6	0,1	0,1	18	800	15	5000	1
Dinamarca	^b Cat1	0,071	1,8	0,006	0,055	0,2	8E-04	0,045		0,043	0,037		0,44	440		1000	3
	^c Cat2	0,071	1,8	0,006	0,055	0,2	8E-04	0,045		0,043	0,037		0,44	440		1000	3
	^c Cat3	0,45	24	0,13	2,8	9	8E-04	0,45		0,3	0,11		6,6	8800		16000	3
Francia	¹ A	0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5	0,5	0,4	0,1	0,06	4	800	10	1000	1/2
	^k B	1	40	0,08	1	4	0,02	1	1	0,8	0,2	0,12	8	1600	20	2000	1/2
	¹ C	1,5	60	0,12	1,5	6	0,03	1,5	1,5	1,2	0,3	0,18	12	2400	30	3000	1/2
	^m Excl.	2	100	1	10	50	0,2	10	10	10	0,5	0,7	50	15000	150	20000	1/2
	ⁿ 2A	0,8	56	0,32	4	50	0,08	0,8	5,6	1,6	0,5	0,4	50	1000	60	10000	1/2
Suecia	^p 2B	0,5	28	0,16	2	50	0,04	0,5	2,8	0,8	0,4	0,2	50	5000	30	5000	1/2
Directiva UE-Inerte	^p	0,09		0,02	1	0,8	0,01	0,2		0,4			4	130		200	4
Directiva UE-Inerte		0,5	20	0,04	0,5	2	0,01	0,5	0,5	0,4	0,1	0,06	4	800	10	1000	1

¹Orden 12 de enero 2015 con los requisitos para la utilización de los áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición, en aplicaciones no ligadas. ²Ver apartado 4.1 para más detalle de condiciones de uso.
^a Aplicación abierta (infiltración 300 mm/año); ^b Aplicación cubierta (infiltración 6mm/año); ^c Sn= 0,4 mg/kg; ^d Sn=2,3 mg/kg; ^e Clase A utilizada sin cubierta superior y en zonas hidrogeológica poco delicadas, o en aplicación cubierta en zonas hidrogeológicas delicadas, ^f Clase A+ en aplicaciones cubiertas y zonas hidrogeológicas delicadas, ^g Clase B en aplicaciones cubiertas y condiciones hidrogeológicas poco delicadas. ^h Categoría 1 se usa para la construcción de carreteras, caminos, aparcamientos, barreras acústicas, diques, presas, relleno de zanjas. ⁱ Categoría 2 y 3 se utiliza en aplicaciones más restrictivas que afectan al espesor y cubierta superior. ^j Materiales utilizables en la construcción de carreteras. ^k Debe cumplirlo el 80% de las muestras. ^l Debe cumplirlo el 95% de las muestras. ^m Debe cumplirlo el 100% de las muestras. ⁿ No pueden utilizarse en la construcción de carreteras. ^o Cubierto con una capa impermeable (asfalto, hormigón...) con una pendiente mínima del 1%. ^p Terraplenes cubiertos con al menos 30 cm de material natural con una pendiente mínima del 5% para limitar la infiltración de agua. ^q Uso sin restricciones
1 EN12457-4; 2 EN 12457-2; 3 EN 12457-1; 4 EN 14405

Fig. 1 – Recopilación de valores-límite de lixiviación para uso de áridos reciclados

Directiva europea (veáse la fila “UE-inerte”) se han recopilado e integrado en la Figura 1. En dicha figura se han coloreado las celdas en función de si los valores-límite exigidos por cada país son mayores (verde), menores (rojo) o iguales (amarillo) de los exigidos para el depósito en vertedero. En esta recopilación únicamente se recogen los valores de los compuestos inorgánicos lixiviados, no obstante, tanto la legislación de vertederos como los trabajos antes mencionados recopilan valores-límite de contenido total de compuestos orgánicos, como PCB, BTEX o asbestos.

Tal y como se observa en la figura anterior, son varios los países en los que los valores-límite establecidos para la condición de fin de residuo son inferiores (coloreados en rojo) que los estipulados en la directiva europea de vertedero para materiales inertes. Este es el caso de Dinamarca, Suecia y Alemania, para sus categorías más restrictivas. El resto de los países tienen algunos elementos con límite más restrictivos y otros con valores iguales (coloreado en amarillo) o incluso superiores (coloreados en verde) a lo estipulado para su depósito en vertederos inertes. En Euskadi y en Francia se han adoptado valores-límite menos restrictivos o iguales a los estipulados en la directiva de vertedero inerte.

4 – FACTORES CONDICIONANTES EN LA LIMITACIÓN DE LOS VALORES DE LIXIVIACIÓN

4.1 – Influencia de la localización de los áridos reciclados en el terraplén

Tal y como se ha comentado con anterioridad, en España no existe una normativa estatal específica dedicada al empleo de los áridos reciclados procedentes de los RCD para su uso en terraplenes, aunque sí se dispone de algunas recomendaciones y guías a nivel autonómico. Por otra parte, son varios los países europeos que han desarrollado esta temática y cuentan con documentos que recogen los requisitos físico-químicos y medioambientales para su empleo. Algunos de estos documentos técnicos también regulan las condiciones de puesta en obra de los materiales para garantizar que no generen impactos adversos para el medio ambiente o la salud.

La utilización de los áridos reciclados para la construcción de los terraplenes puede hacerse diferenciando, al menos, dos situaciones o escenarios:

- Colocación de los áridos debajo de una superficie impermeable o semi-impermeable.
- Colocación de los áridos sin protección frente al agua de infiltración.

Estas condiciones sobre el empleo de los áridos reciclados van a determinar la mayor o menor exposición del material al agua y, por ende, la relevancia de los fenómenos relacionados con la lixiviación de componentes. Estas condiciones se han tenido en cuenta en algunas de las regulaciones de los países europeos y tienen su reflejo en la adopción de diferentes valores-límite para los componentes lixiviados.

Savey et al. (2014) describen los factores que deberían tenerse en cuenta para establecer valores-límite de los componentes lixiviados: el uso del material con o sin protección por la capa impermeable; el recorrido que tienen los componentes lixiviados, para contemplar el efecto, por ejemplo, de la dilución; y la localización de los puntos donde se evalúa la posible afección de los componentes lixiviados al medioambiente.

Esta metodología de trabajo es la utilizada en las normativas de Alemania y Países Bajos lo que ha dado lugar a diferentes requisitos de colocación de los áridos reciclados, como se muestra en la Tabla 11 con algunos ejemplos recogidos en documentos europeos en función del escenario de su uso.

Tabla 11– Requisitos de colocación de los áridos reciclados en función del escenario

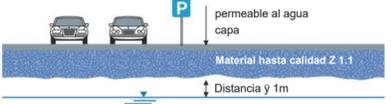
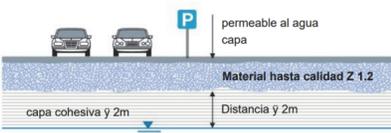
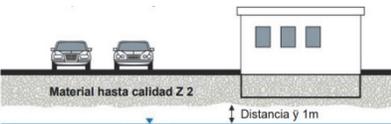
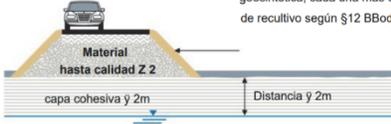
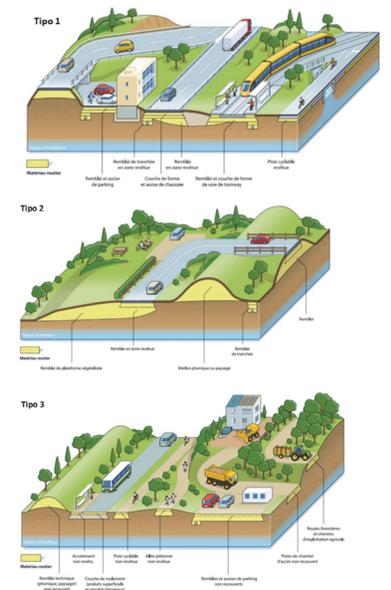
País	Limitaciones/Descripción	Ejemplos
Alemania ¹	<p>Se estudian por separado los usos bajo una superficie impermeable o semi-impermeable suponiendo una infiltración de 6 mm/año, y el uso sin protección con una infiltración de 300 mm/año. Se distinguen 3 zonas de uso:</p> <p><u>Uso Z1.1:</u> a una distancia de al menos 1 m sobre nivel piezométrico (NP) y bajo capa permeable al agua</p> <p><u>Uso Z1.2:</u> a una distancia de al menos 2 m sobre NP y por debajo una capa cohesiva de al menos 2 m de potencia, bajo capa permeable al agua.</p> <p><u>Uso Z2:</u> a una distancia de al menos 1 m al NP, bajo cubierta impermeable al agua. El material reciclado puede estar tratado o ligado. En caso de usarlo como relleno de terraplenes la distancia mínima al NP aumenta a 2 m; debe existir una capa cohesiva por debajo de al menos 2 m y el terraplén debe estar confinado con una capa de 0.5 m de espesor y una $k < 10^{-8}$ cm/s o geomembranas tanto en la parte superior como los espaldones</p>	<p>Uso en estructuras técnicas (abierto)</p>  <p>Uso en estructuras técnicas (abierto)</p>    
Francia ²	<p>Diferencia tres tipos de usos (deben cumplir determinados límites de lixiviación):</p> <p>Tipo 1: para altura máxima de 3 m bajo capa pavimentada</p> <p>Tipo 2: para altura máxima de 6 m y bajo capa de recubrimiento</p> <p>Tipo 3: sin restricciones</p>	
Dinamarca ³	<p>Diferencian tres tipos de residuos (en función de su lixiviación):</p> <p>Categoría 1: usado en terraplenes sin restricciones</p>	

Tabla 11– Requisitos de colocación de los áridos reciclados en función del escenario

País	Limitaciones/Descripción	Ejemplos
	Categoría 2 y Categoría 3: uso con restricciones de espesor (max. 1m) y cobertura superior (asfalto o similar, o mín. 1 m de material de Categoría 1).	
Países Bajos ⁴	Distinguen dos tipos de “Materiales de construcción” en función de la composición (mg/kg) y la cantidad de material contaminante que acaba en el medio por unidad de tiempo (mg/m ² por 100 años). La Categoría 1 puede usarse sin restricciones. La Categoría 2 con medidas de aislamiento.	
¹ Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.2014 (QRB, 2014) ² Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière Les matériaux de déconstruction issus du BTP. CEREMA ³ Statutory Order no. 1662/2010 ⁴ Ministry of VROM (1995) Dutch Building Materials Decree		

4.2 – Restricciones hidrogeológicas de los emplazamientos

La existencia de zonas especialmente sensibles a la contaminación por los componentes lixiviados de los áridos reciclados obliga a considerar la posibilidad de prohibir el uso de los mismos en determinados emplazamientos. El proyecto Cinderela (2021) incluye un apartado de restricciones y prohibiciones de uso de los materiales reciclados con condición de fin de residuo que deberían ser tenidas en cuenta igualmente para la construcción de terraplenes con áridos reciclados procedentes de los RCD. Estas limitaciones están enfocadas a evitar afecciones sobre el medio ambiente, y son las siguientes:

- zonas en contacto directo con agua,
- zonas con cualquier tipo de protección especial dentro de las regulaciones para la conservación de la naturaleza,
- zonas potencialmente inundables,
- zonas cercanas a un curso fluvial, lago o estanque,
- perímetro de protección de las zonas de captación de agua potable, y
- zonas que formen parte del dominio público hidráulico.

Algunos países han incluido restricciones más concretas, como es el caso de Francia, donde se indica que los áridos reciclados deberán colocarse a más de 50 cm por encima del nivel más alto de inundación para un periodo de retorno de 50 años, o el más alto conocido, y a una distancia superior a más de 30 m de cursos fluviales, lagos o estanques. Se amplía hasta 60 m si la altitud del curso fluvial está a más de 20 m por debajo de la base de la estructura y en zonas de especial protección y no podrán ser usados en zonas kársticas. En la Tabla 9 también se recogen instrucciones restrictivas dadas en la normativa alemana, como colocar el árido reciclado a más de 1 metro por debajo del nivel piezométrico e incluso que debe existir una capa de baja permeabilidad entre el material y el nivel piezométrico.

5 – RECOMENDACIONES PARA EL USO DE RCD EN TERRAPLENES

Como se decía en el apartado 3.1, la metodología habitual para determinar la afección de los áridos al medio ambiente presenta dos problemas principales: la elección del ensayo de lixiviación más adecuado para analizar dicho fenómeno y la determinación de los valores-límites con los que los resultados de dichos ensayos deberían ser comparados, que se ven condicionados por la zona del terraplén donde emplearlos y por las posibles medidas que se pueden tomar para aislar los áridos reciclados de su contacto con el agua.

Respecto al ensayo de lixiviación más adecuado para el estudio de la afección mediambiental, parece recomendable utilizar, como primera aproximación al problema, el método de la norma EN

12457-4, dado que es un ensayo rápido (24 horas) y empleado en la mayoría de los países europeos y en los trabajos analizados. No obstante, debería ser complementado con el ensayo de columna EN 14405.

Para determinar los valores-límites con los que comparar los datos obtenidos en los ensayos de lixiviación, parece adecuado tener en cuenta valores-límite de componentes lixiviados propuestos en el proyecto Cinderela (2021) dependiendo de si los áridos reciclados van a estar en contacto directo con el agua o protegidos de alguna manera, al colocarse bajo alguna capa impermeable o semi-impermeable. A este respecto, en la Tabla 12 se muestran los valores propuestos en el proyecto Cinderela y, a modo de referencia, los establecidos para el depósito del material en vertedero de inertes. Con objeto de facilitar su interpretación, las celdas se han coloreada siguiendo el mismo criterio seguido en la Figura 1.

Tabla 12 – Valores-límite de lixiviación para áridos reciclados en aplicaciones granulares en función de la existencia de una capa semi/impermeable (tomado de Cinderela, 2021).

Compon ente	Valor límite de lixiviación según EN 12457-4 (mg/kg para L/S=10 l/kg)		
	Aplicación granular con superficie impermeable o semi impermeable	Aplicación granular en zonas sin cubrimiento	Vertedero para materiales inertes
As	0,9	0,5	0,5
Ba	25	5	20
Cd	0,05	0,025	0,04
Cr	2	0,5	0,5
Cu	3	0,5	2
Hg	0,01	0,005	0,01
Mo	2,8	0,5	0,5
Ni	0,75	0,1	0,4
Pb	2,3	0,5	0,5
Sb	0,3	0,06	0,06
Se	0,6	0,1	0,1
Zn	10	2	4
F ⁻	55	10	10
Cl ⁻	5000	600	800
SO ₄ ²⁻	6000	1000	1000*

* Aunque el residuo no cumpla este valor, puede considerarse que cumple la admisión si la lixiviación no supera los 1500 mg/l para L/S=0,1 y 6000 para L/S=10

Como se observa en la Tabla 12, los valores-límite, para la condición de fin de residuo, propuestos en el proyecto Cinderela en aplicaciones granulares que se encuentra bajo una capa impermeable son menos restrictivas (color verde) que las recogidas en la directiva de vertederos para material inerte. En el caso de su empleo en zonas sin ninguna protección, los valores son más restrictivos (color rojo) o idénticos (color amarillo) que en dichos vertederos.

Adicionalmente, se podría tener en cuenta la experiencia española en el encapsulamiento de suelos con problemas por su interacción con el agua (suelos colapsables, expansivos, con yeso, con sales solubles) cuando se utilizan como material de construcción de terraplenes. Estos encapsulamientos logran evitar el contacto de los materiales encapsulados con el agua por lo que, en el caso de los áridos reciclados, evitaría la generación de lixiviados y sus problemas derivados.

A continuación, se muestran, en las Figuras 2 y 3, dos esquemas de las secciones tipo empleadas en terraplenes con yeso, documentadas en la bibliografía, y que podrían servir de base para el diseño de terraplenes con áridos reciclados en su núcleo. Como puede apreciarse, el

material a proteger queda encapsulado por capas ejecutadas de tal manera que presentan una elevada capacidad impermeabilizante, bien con material granular bien graduado o bien con suelos estabilizados cal o cemento.

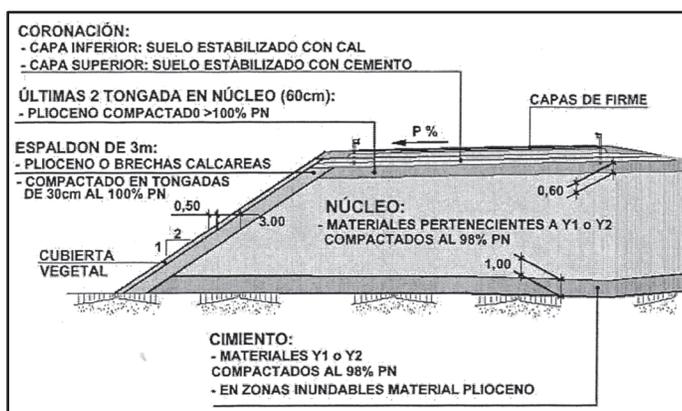


Fig. 2 – Ejemplo de sección tipo de terraplén construido con yeso (tomado de Soriano, 2006)

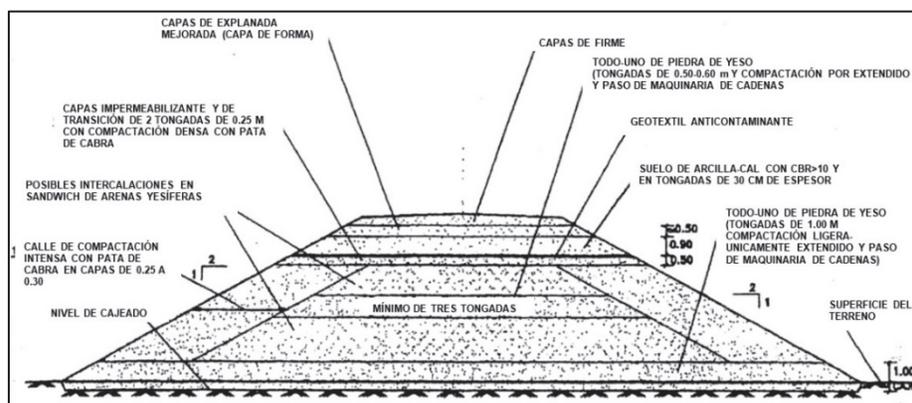


Fig. 3 – Ejemplo de sección tipo de terraplén construido con yeso (tomado de Ayuso et al., 2000)

Por tanto, como primera aproximación al problema, se podría plantear la construcción de un terraplén experimental, donde los áridos reciclados queden encapsulados y que disponga de líxímetros que permitan recoger el agua lixiviada para su posterior análisis y detección de componentes.

6 – RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las conclusiones más relevantes de los estudios llevados a cabo por diferentes países y comunidades autónomas españolas indican la viabilidad técnica del uso de áridos reciclados procedentes de RCD (incluidos los ARM) como material de construcción de terraplenes.

Sin embargo, el uso de los áridos reciclados presenta problemas medioambientales por la lixiviación de componentes con afección al medio ambiente, principalmente sulfatos.

La metodología habitual para determinar la afección de los áridos reciclados al medio ambiente presenta dos problemas principales: la elección del ensayo de lixiviación más adecuado para analizar dicho fenómeno y la determinación de los valores-límites con los que los resultados de dichos ensayos deberían ser comparados, que se ven condicionados por la zona del terraplén

donde emplearlos y por las posibles medidas que se pueden tomar para aislar los áridos reciclados de su contacto con el agua.

En este trabajo se recogen las recomendaciones referidas a ambos aspectos:

- Ensayo de lixiviación de referencia; se recomienda hacer una evaluación preliminar con el método recogido en la norma EN 12457-4, y completarlo con el descrito en la norma EN 14405, en caso de que el resultado sea poco concluyente o en los casos de potencial grave afección medioambiental.

- Valores límite o de referencia; Se recomienda comparar los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación con los valores-límite de componentes lixiviados propuestos en el proyecto Cinderela (2021).

Adicionalmente, se recomienda el encapsulamiento, en el núcleo de los terraplenes, de los áridos reciclados, con materiales de mejor calidad, para evitar el contacto de los áridos con el agua y, por tanto, la generación de lixiviados y sus problemas derivados.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrós, W. M.; Sampaio, C. H.; Cazacliu, B. G.; Miltzarek, G. L.; Miranda, L. R. (2017). *Separation in air jigs of mixed construction and demolition waste*. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste 21-23 June 2017, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

Aprr.eus (2019). *Usos del Árido Reciclado de RCD Dossier Fichas Técnicas de unidades de obra donde se pueden utilizar Árido Reciclado de RCD y Ejemplos de obras donde se han utilizado Arido Reciclado de RCD en alguna de sus unidades de obra*.

Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M. M. & Bo, M. B. (2013). *Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase applications*. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(8), 1077-1088. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000652](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000652)

Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición. (2012). *Proyecto GEAR. Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)*. https://www.btbab.com/wp-content/uploads/documentos/legislacion/Guia_Gerd_2012.pdf

Ayuso, A.D.; Olías, I.; Torroja, J.; Castanedo, F.J.; Oteo C. (2000). *Caracterización de los materiales yesíferos del Mioceno de la cuenca de Madrid para su utilización en cuerpo de terraplenes y realización de un terraplén experimental*. Simposio sobre Geotecnia de las Infraestructuras del Transporte. Barcelona.

Barbudo, M.A. (2012). *Aplicaciones de los áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición en la construcción de infraestructuras viarias*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba

Barbudo, A.; Galvín, A.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Jiménez, J.R. (2012). *Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes*. Waste Management 32 (2012) 1229–1235

BOE nº 85 (2022). Ley 7/2022 de 8 de abril de 2022 *Ley de Residuos y Suelos Contaminados para una Economía Circular*.

CEDEX (2014). *Catálogo de residuos utilizables en la construcción. Residuos de construcción y demolición*. <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/>

CEN/TC 154 Áridos

CEN/TC 292 Caracterización de residuos

CEN/TC 351 Productos de construcción

Cerema. Setra (2011). *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière Les matériaux de déconstruction issus du BTP*. http://www.bretagne.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2016-01_guide_setra_materiaux_de_deconstruction_du_btp.pdf

Chai, J.C.; Onitsuk, K.; Hayashi, S. (2009) *Cr(VI) concentration from batch contact/tank leaching and column percolation test using fly ash with additives*. J. Hazard. Mater. 166, 67–73

Cinderela (2021). *D5.5. End of Waste criteria protocol for waste used as aggregates*. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5ddd89bcf&appId=PPGMS>

Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas de Castilla y León. (2019). *Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's*. <http://www.agerdcyl.es/pdf/Gu%C3%ADa-CITOPCyL-Recomendaciones-uso-%C3%A1ridos-con-RCDs-Oct19-comprimido.pdf>

DIN 19528:2009-01. *Leaching of solid materials - Percolation method for the joint examination of the leaching behaviour of inorganic and organic substances* EN 12620:2003+A1:2009. *Áridos para hormigón*.

EN 933-1:2012 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado*

EN 933-8:2012+A1:2015/1M:2016 *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena*.

EN 933-11:2009. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados*.

EN 1097-2:2021 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 2: Métodos para la determinación de la resistencia a la fragmentación*

EN 1097-6:2014 *Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua*.

EN 1744-1:2010+A1:2013 *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico*

EN 1744-3:2003. *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos*.

EN 1744-3:2003 *Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 3: Preparación de eluatos por lixiviación de áridos*

EN 12457-1:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 1: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 2 l/kg para materiales con un alto contenido en sólidos y con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño)*

EN 12457-2:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 2: Ensayo por lotes de una etapa con una relación líquido-sólido de 10 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño)*

- EN 12457-3:2003. *Caracterización de residuos. Lixiviación. Ensayo de conformidad para la lixiviación de residuos granulares y lodos. Parte 3: Ensayo por lotes de dos etapas con una relación líquido-sólido de 2 l/kg y 8 l/kg para materiales con un tamaño de partícula inferior a 4 mm (con o sin reducción de tamaño).*
- 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).*
- EN 13242:2003+A1:2008. *Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerados hidráulicos para uso en capas estructurales de firmes.*
- EN 14405:2017. *Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento en la lixiviación. Ensayo de percolación de flujo ascendente (bajo condiciones específicas).*
- EN 14997:2015. *Caracterización de residuos. Ensayo de comportamiento durante la lixiviación. Influencia del pH en la lixiviación con control continuo de pH.*
- Eurostat (2021). <https://ec.europa.eu/eurostat>
- Gálvez-Martos, J.L.; Styles, D.; Schoenberger, H.; Zeschmar-Lahl, B., (2018). *Construction and demolition waste best management practice in Europe*. Resour. Conserv. Recycl. 136, 166–178.
- Galvín, A.; Ayuso, J.; Agrela, F.; Barbudo A.; Jiménez J.R. (2013). *Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads*. Construction and Building Materials 40 1207–1214.
- Galvín, A.; Ayuso, J.; García, I.; Jiménez, J.R.; Gutierrez, F. (2014). *The effect of compaction on the leaching and pollutant emission time of recycled aggregates from construction and demolition waste*. Journal of Cleaner Production 83 294-304
- GEAR (2012). *Guía Española de Áridos Reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición*. https://www.btbab.com/wp-content/uploads/documentos/legislacion/Guia_Gerd_2012.pdf
- Gobierno Vasco (2009). *Manual de Directrices para el uso de Áridos Reciclados en Obras Públicas de la Comunidad Autónoma del País Vasco*.
- Gobierno Vasco (2012). *Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco*.
- Harnas, F.R.; Rahardjo, H.; Wang, J.Y. (2013). *Design of landfill cover using construction and demolition waste: material characterization and numerical modelling*. In: Proc. 18th SEAGC Conference, 29–31 May, 2013, Singapore
- Herrador, R.; Pérez, P.; Garach, L.; Ordóñez J. (2012). *Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 138 Issue 2 - February
- Hollstein, F.; Wohllebe, M.; Herling, M.; Cacho, I.; Arnaiz S. (2017). *Sorting of construction and demolition waste by hyperspectral-imaging*. International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste 21-23 June 2017, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- ISO 17892-4:2019 *Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 4: Determinación de la distribución granulométrica*.

- ISO 17892-12:2019/A2:2022 *Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 12: Determinación del límite líquido y del límite plástico.*
- Jiménez J. R., Ayuso J., Agrela F., López M. and Pérez A. (2012). *Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads.* Resources, Conservation and Recycling 58 pp 88-97.
- Junta de Andalucía. (2010). *Recomendaciones para la redacción de: Pliegos de Especificaciones Técnicas para el uso de materiales reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD).* (Microsoft Word - RECOMENDACIONES MATERIALES RCD\264s edicion1 abril10.doc) (aridosrcdandalucia.es)
- Junta de Andalucía (2015). *Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central.*
- Junta de Andalucía (2016). *Catálogo de firmas y unidades de obra con áridos reciclados de RCD.* <http://www.aridosrcdandalucia.es/rcd/wp-content/uploads/2017/03/Libro-catalogo-de-firmes-vers-impresa-en-pdf.pdf>
- Junta de Extremadura (2019). *Borrador de Decreto por el que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas para el uso de áridos reciclados procedentes de RCD en Extremadura.* <http://extremambiente.juntaex.es/files/Decreto%20Reglamento%20T%C3%A9cnico%20RCD%20v1%2011-10-2019.pdf>
- Kijjanapanich, P. (2013). *Sulfate reduction for remediation of gypsiferous soils and solid wastes.* Universit'e Paris-Est. English. Tesis doctoral.
- Linß, E.; Karrasch, A.; Landmann, M. (2017). *Sorting of mineral construction and demolition wastes by near-infrared technology.* International HISER Conference on Advances in Recycling and Management of Construction and Demolition Waste 21-23 June 2017, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands
- Löv, Å.; Larsbo, M.; Sjöstedt, C.; Cornelis, G.; Gustafsson, J.P.; Kleja, D.B. (2019) *Evaluating the ability of standardised leaching tests to predict metal(loid) leaching from intact soil columns using size-based elemental fractionation.* Chemosphere, 222, 453–460. [PubMed]
- McKelvey, D.; Sivakumar, V.; Bell, A.L.; McLaverty, G. (2002). *Shear strength of recycled construction materials intended for use in vibro ground improvement.* Ground Improv. 6, 59–68.
- Ministerio de Fomento (España) (2004). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG 3).*
- Ministerio de Medio Ambiente (Finlandia) (2017). *Government Decree on the Recovery of Certain Wastes in Earth Construction (843/2017).* <https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2017/en20170843.pdf>
- Ministerio de Transportes (República Checa) (2011). *TP 210 Užití recyklovaných stavebních demoličních materiálů do pozemních komunikací*
- Ministry of VROM (1995). *Building Materials Decree soil and surface water protection, Bulletin of acts and decrees ('Staatsblad'), no. 567,1995.*
- Naka, A.; Yasutaka, T.; Sakanakura, H.; Kalbe, U.; Watanabe, Y.; Inoba, S.; Takeo, M.; Inui, T.; Katsumi, T.; Fujikawa, T.; et al. (2016). *Column percolation test for contaminated soils: Key factors for standardization.* J. Hazard. Mater. 2016, 320, 326–340. [PubMed]

- Nawagamuwa, U.P., Madarasinghe, D., Goonatillake, M., Karunarathna, H., Gunaratne, M., (2012). *Sustainable reuse of Brownfield properties in Sri Lanka as a gabion fill material*. In: ICSBE-2012: International Conference on Sustainable Built Environment, Kandy, Sri Lanka.
- NLT 114/99. *Determinación del contenido en sales solubles de los suelos*
- NLT 254/99. *Ensayo de colapso en suelos*
- NF-P-18-545. 2011. *Granulats. Éléments de définition, conformité et codification*
- prEN 16637-1. *Productos de construcción. Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas. Parte 1: Guía para la especificación de ensayos de lixiviación y de las etapas adicionales del ensayo.*
- prEN 16637-2. *Productos de construcción. Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas. Parte 2: Ensayo horizontal de lixiviación de superficie dinámica.*
- prEN 16637-3. *Productos de construcción. Evaluación de la emisión de sustancias peligrosas. Parte 3: Ensayo horizontal de percolación con flujo ascendente*
- QRB (2014). *Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.* <https://www.rzens.de/images/download/QRB-Broschuere.pdf>
- Quina, M.J.; Bordado, J.C.M.; Quinta-Ferreira, R.M. (2011). *Percolation and batch leaching tests to assess release of inorganic pollutants from municipal solid waste incinerator residues*. Waste Management 2011, 31, 236–245.
- Rahman, M.A.; Imteaz, M.; Arulrajah, A.; Disfani, M.M. (2014). *Suitability of recycled construction and demolition aggregates as alternative pipe backfilling materials*. J. Cleaner Prod. 66, 75–84
- Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.
- Real Decreto 646/2020, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.
- Santana, M.; Cano, H.; Higuera, C. (2019). *Caracterización de los RCD's para su uso en terraplenes: El caso español*. XXVIth World Road Congress. 6-10 October 2019, Abu Dhabi (United Arab Emirates).
- Saveyn, H.; Eder, P.; Garbarino, E.; Muchova, L.; Hjelmar, O.; van der Sloot, H.; Comans, R.; van Zomeren, A.; Hyks, J.; Oberender, A. (2014). *Study on Methodological Aspects Regarding Limit Values for Pollutants in Aggregates in the Context of the Possible Development of End-of-Waste Criteria Under the EU Waste Framework Directive*. JRC Technical Report. EUR 26769
- Silva R.V., de Brito J., Dhir R.K. (2015). *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. Construction and Building Materials 65 201-217
- Sharkawi, A., Almofty, S. and Abbass, E. (2016). *Performance of Green Aggregate Produced by Recycling Demolition Construction Wastes (Case Study of Tanta City)* Engineering, 8, 52-59. doi:10.4236/eng.2016.82006

Soriano A. (2006). *Terraplenes con materiales yesíferos en la Radial R-4*. Contrastes de las soluciones geotécnicas aplicadas a los accesos de Madrid. Madrid, 26 de octubre de 2006.

Statutory Order no. 1662/ 2010 on recycling of residual products and soil in building and construction work (Denmark).

UNE 103204:2019 *Determinación del contenido de materia orgánica oxidable de un suelo por el método del permanganato potásico*

UNE 103502:1995 *Método de ensayo para determinar en laboratorio el índice C.B.R. de un suelo*

UNE 103601:1996 *Ensayo del hinchamiento libre de un suelo en edómetro*

Vegas, I.; Broos, K.; Nielsen, P.; Lambertz, O.; Lisbona, A. (2015). *Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology*. Construction and Building Materials 75 121-128.

Vieira C.S., Pereira P.M., Lopes M.L. (2016). *Recycled Construction and Demolition Wastes as filling material for geosynthetic reinforced structures. Interface properties*. Journal of Cleaner Production. Vol 124, 15, June, pp 299-311.