

Recomendaciones técnicas y ambientales para el empleo de áridos reciclados

La economía circular de los RCD como estrategia de adaptación al cambio climático



GAN-NIK

Gestión Ambiental de Navarra
Nafarroako Ingurumen Kudeaketa





Contenido

1. Introducción	9
1.1. Antecedentes	9
1.2. Objetivo	11
1.3. Legislación, normativa y bibliografía de referencia.	11
2. Recomendaciones técnicas	17
2.1. Árido reciclado en hormigón	17
2.1.1. Legislación, normativa y guías.	17
2.1.2. Propiedades generales	19
2.1.3. Materiales	22
2.1.3.1. Hormigones estructurales	22
2.2. Árido reciclado en carreteras	29
2.2.1. Normativa	29
2.2.2. Propiedades generales	29
2.2.3. Materiales	41
2.2.3.1. Explanadas	42
2.2.3.2. Firmes	48
2.3. Árido reciclado en caminos	62
2.3.1. Normativa	62
2.3.2. Propiedades generales	63
2.3.3. Materiales	67
2.4. Árido reciclado en vías ciclistas	71
2.4.1. Normativa	71
2.4.2. Propiedades generales	72
2.4.3. Materiales	74
2.4.3.1. Explanada	74
2.4.3.2. Firmes	76
2.5. Árido reciclado en huecos mineros	80
2.5.1. Normativa	80
2.5.2. Propiedades generales	82
2.5.3. Materiales	87



3.Recomendaciones ambientales	94
3.1. Introducción	94
3.2. Principales contaminantes de los residuos de construcción	97
3.3. Condicionantes para el riesgo ambiental	99
3.3.1. Fuente	99
3.3.2. Vía de transporte	101
3.3.3. Medio receptor	101
3.4. Lixiviación	102
3.4.1. Factores que influyen en la lixiviación	102
3.4.2. Tipos de ensayos de lixiviación	103
3.4.3. Ensayos de lixiviación en Europa	104
3.5. Requisitos ambientales en función de la aplicación	113
3.5.1. Aplicaciones consolidadas	116
3.5.2. Aplicaciones no consolidadas	116



Índice de tablas

Tabla 1. Recomendaciones sobre el empleo de árido (reciclado o natural) en función del material a fabricar.	10
Tabla 2. Legislación de la gestión de RCD en la Unión Europea- España- Navarra.	12
Tabla 3. Clasificación de los áridos reciclados según la composición de la fracción gruesa	15
Tabla 4. Reducción de la resistencia a compresión en función de la cantidad y tipo de árido reciclado empleado	21
Tabla 5. Reducción del módulo de elasticidad en función de la cantidad y tipo de árido reciclado empleado	22
Tabla 6. Condiciones físico-mecánicas de los áridos para hormigón estructural según la EHE-08 y el Código Estructural	23
Tabla 7. Especificaciones físicas para el árido reciclado a emplear en la fabricación de hormigón estructural.	23
Tabla 8. Comparativa de la composición del árido grueso reciclado entre la EHE-08 y el Código estructural	24
Tabla 9. Requisitos de los áridos reciclados en función de diferentes normativas para hormigones estructurales	25
Tabla 10. Cementos recomendados en función del uso de hormigones no estructurales y normativa de aplicación	26
Tabla 11. Requisitos para áridos reciclados en hormigones no estructurales y de limpieza según la guía de referencia	28
Tabla 12. Categorías de tráfico en función de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados (IMDp)	30
Tabla 13. Tipos de explanadas en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (MPa)	31
Tabla 14. Tipos de áridos reciclados a emplear en explanadas según la aplicación y la guía de referencia	32
Tabla 15. Tipos de áridos reciclados a emplear en firmes según la aplicación y la guía de referencia	36
Tabla 16. Artículos de referencia en función del tipo de material a utilizar en explanadas	42
Tabla 17. Características para la clasificación de los materiales para conformar terraplenes	43
Tabla 18. Especificaciones químicas para empleo de suelos reciclados según las guías de referencia sobre áridos reciclados	45
Tabla 19. Requisitos sobre el índice CBR	47
Tabla 20. Artículos de referencia en función del material a emplear en la ejecución del firme	48
Tabla 21. Prescripciones para el árido grueso en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado	51
Tabla 22. Prescripciones para el árido fino en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado	51
Tabla 23. Curva granulométrica para el árido fino en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado	52
Tabla 24. Huso granulométrico para el árido reciclado en hormigón seco compactado	52
Tabla 25. Requisitos adicionales para árido grueso en hormigones compactados con vibrados	53
Tabla 26. Comparativa de requisitos químicos para áridos reciclados en firmes establecidos en las guías de referencia	54
Tabla 27. Husos granulométricos en función de la clasificación de la zorra reciclada y de la guía de referencia	55
Tabla 28. Requisitos para áridos gruesos para zorras recicladas en función de las guías de referencia	56
Tabla 29. Requisitos para áridos finos para zorras recicladas en función de las guías de referencia	57
Tabla 30. Requisitos adicionales para zorras recicladas	57
Tabla 31. Requisitos adicionales para zorras recicladas	58
Tabla 32. Propiedades de los áridos para el empleo como suelocemento o gravacemento	59
Tabla 33. Propiedades de los áridos gruesos para el empleo como gravacemento	61



Tabla 34. Propiedades de los áridos gruesos para el empleo como gravacemento	61
Tabla 35. Tipo de explanada en función del índice CBR	63
Tabla 36. Tipología de estructura de caminos	64
Tabla 37. Tipo de explanada en función del CBR para pavimentos de hormigón	66
Tabla 38. Recomendaciones de los caminos con pavimento de hormigón en función del tráfico.	66
Tabla 39. Requisitos técnicos de zahorras recicladas para caminos según las guías de referencia	69
Tabla 40. Clasificación de tráfico de baja intensidad.	72
Tabla 41. Capacidad de soporte mínimo del plano de explanada	75
Tabla 42. Requisitos para los materiales granulares en las capas de estanqueidad, drenaje y filtro	87
Tabla 43. Requisitos generales para la capa de sellado	92
Tabla 44. Criterios sobre los residuos de construcción en Estados miembros de la Unión Europea.	95
Tabla 45. Clasificación austriaca para determinar a posteriori los límites de lixiviación.	104
Tabla 46. Límites de lixiviación en diferentes países europeos	112
Tabla 47. Aplicaciones sujetas a una norma armonizada	114
Tabla 48. Límites de contaminantes para aplicaciones no ligadas según las normas/guías de referencia	118



Índice de figuras

Figura 1. Evolución de la capacidad portante a lo largo del tiempo de tres áridos diferentes.	9
Figura 2. Evolución del comportamiento de zahorras a la resistencia de compresión.	10
Figura 3. Aplicación de la legislación en la Unión Europea- España- Navarra	11
Figura 4. Sección tipo de las partes de una carretera.	30
Figura 5. Tipos de suelos para la explanada	31
Figura 6. Tipos de formación de explanada en función de la tierra subyacente y la categoría de explanada	32
Figura 7. Tipos de formaciones de explanada en función de la tierra subyacente y la categoría de explanada	33
Figura 8: Catálogo de secciones de firmes para las categorías de tráfico pesado T00 a T2	34
Figura 9: Catálogo de secciones de firmes para las categorías de tráfico pesado T3 a T4	34
Figura 10. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T2.	36
Figura 11. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T3.	37
Figura 12. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T3.	37
Figura 13. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E1 y tráfico T4.	38
Figura 14. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T4.	38
Figura 15. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T4.	39
Figura 16. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T22.	39
Figura 17. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T31 y T32.	40
Figura 18. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T31 y T32.	40
Figura 19. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T41 y T42.	41
Figura 21. Tipos de secciones de firmes para caminos rurales	65
Figura 22. Secciones de firmes de pavimentos de hormigón	67
Figura 23. Esquema y composición de un carril bici	73
Figura 24. Drenaje de las vías ciclistas	73
Figura 25. Tipo de secciones de explanadas para vías ciclistas	74
Figura 26. Secciones tipo de explanadas mejoradas para vías ciclistas en el País Vasco	75
Figura 27. Tipo de secciones de firmes para vías ciclistas con tráfico T45	77
Figura 28. Tipo de secciones de firmes para vías ciclistas	78
Figura 29. Distribución de las plantas de reciclaje de gestores autorizados donde se han tomado las muestras para la caracterización del precribado de los finos	81
Figura 30. Esquema de referencia de restauración de huecos mineros con residuos inertes.	83
Figura 31. Esquema de referencia de restauración de huecos mineros con residuos no peligrosos.	84



Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD).	84
Figura 32. Proceso general de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo.	85
Figura 33. Proceso general de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo.	88
Figura 34. Límites de lixiviación para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013	90
Figura 35. Límites del contenido total de los parámetros orgánicos para residuos inertes según la Orden AAA/661/2013	91
Figura 36. Comparativo del contenido de Molibdeno, del resultado de ensayo de percolación y de la prueba por lotes.	94
Figura 37. Principales contaminantes de diferentes residuos de construcción y demolición basados en los límites de admisión de residuos inertes en vertederos y según los ensayos de lixiviación L/S y pH.	97
Figura 38. Cadena de factores que influyen a que se origine un riesgo ambiental	99
Figura 39. Métodos de ensayos para los tres escenarios posibles en función de la permeabilidad del material	100
Figura 40. Aplicaciones sujetas a una norma armonizada	113

A photograph of a dirt path winding through a dense forest. The trees are tall and thin, with green foliage. The ground is covered in fallen leaves and small plants. A large, semi-transparent green circle is overlaid on the left side of the image, partially obscuring the path and trees. The text "1. Introducción" is centered in the lower half of the image.

1. Introducción



1. Introducción

1.1. Antecedentes

En la fase inicial del proyecto europeo Poctefa RCdiGreen se analizó la situación actual en la Comunidad Foral de Navarra donde se detectó la necesidad del sector en aunar criterios técnicos y ambientales para el árido reciclado. Esto permitiría un aumento de confianza en su utilización llevando consigo una mayor comercialización.

En diferentes países europeos y comunidades autónomas dentro del Estado español, se ha desarrollado bibliografía específica sobre áridos reciclados a partir de diferentes experiencias reales piloto que han permitido conocer las características de estos materiales. Por ejemplo, en el estudio que sirvió para realizar la guía de “Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición” del País Vasco, se ha observado que existen propiedades, como la absorción o el coeficiente de los Ángeles, con peor calidad inicialmente en los áridos procedente de residuos de construcción y demolición (en adelante RCD) que en los áridos naturales. Esto es debido a que las partículas de árido reciclado tienen adherido mortero de cemento en su superficie. Sin embargo, se ha comprobado que el mortero de cemento, al contener cemento anhidro en su composición, favorece a que el material mejore su comportamiento con el paso del tiempo ya que se produce un fenómeno de autocementación del material. La mejora de la capacidad portante de estos materiales no sólo es por el proceso de autocementación sino que también contribuye la reacción puzolánica entre los finos cerámicos y la portlandita presente en los restos de hormigón en presencia de agua.

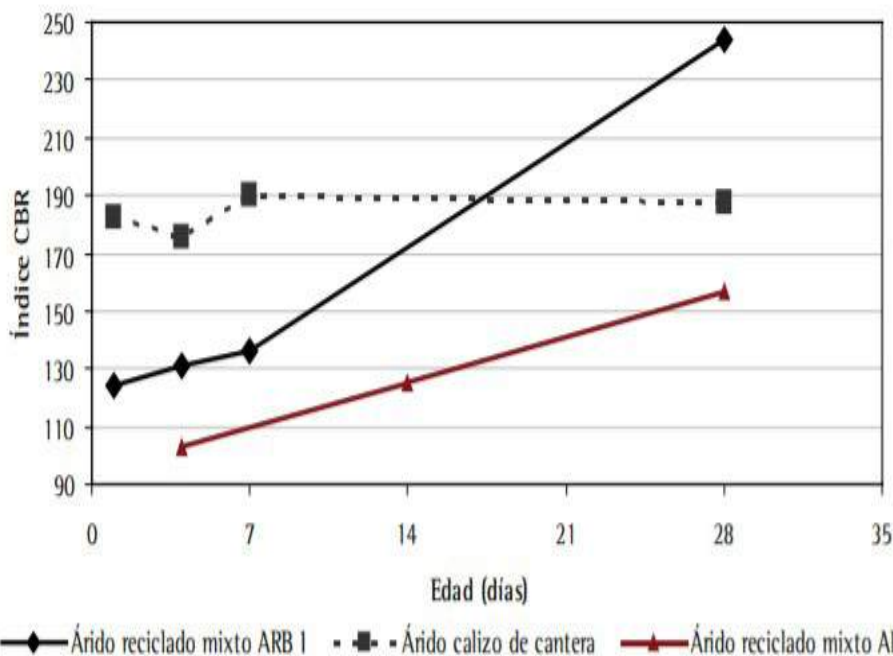


Figura 1. Evolución de la capacidad portante a lo largo del tiempo de tres áridos diferentes.

Fuente: Usos de áridos mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición¹

¹ https://www.btbab.com/wp-content/uploads/documentos/legislacion/PUB_2011_006_f_C_001_aridos.pdf



Otro ejemplo, que ha permitido observar el comportamiento a largo plazo de los áridos reciclados fue la ejecución experimental de los ramales de la conexión de la carretera A-367 (desde la venta del Córdoba) con la A-357 que sirvió de base para realizar las recomendaciones sobre áridos reciclados realizados por la Junta de Andalucía. En el análisis que se realizó en este tramo se observó que, al cabo de los años, el módulo de las zahorras de hormigón y mixtas superaban al de cantera, llegando a valores similares a los de un suelocemento. Esta propiedad es interesante ya que podría generar una reducción de los espesores de los paquetes de firmes similares a los establecidos con suelocemento.

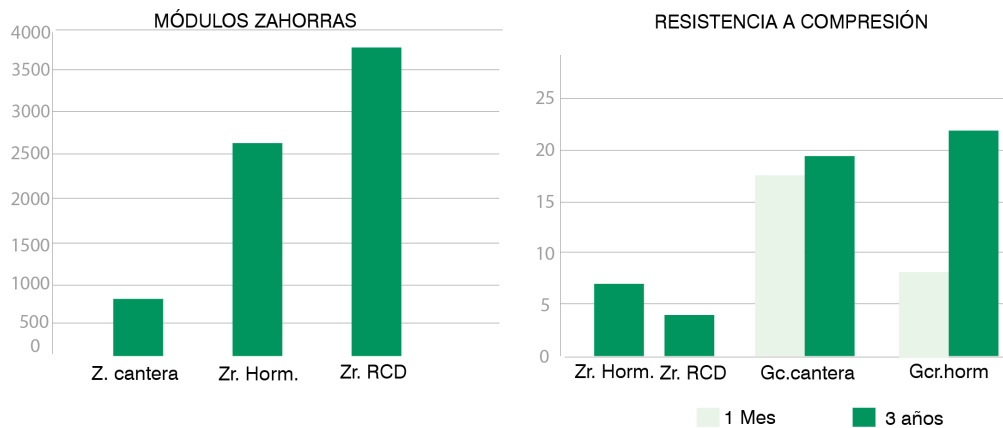


Figura 2. Evolución del comportamiento de zahorras a la resistencia de compresión.

Fuente: Jornada sobre la calidad de los áridos RCD. Reglamento Agrega realizada por el Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra S.A.¹

No obstante, aunque se han determinado usos potenciales para estos materiales, se debe tener en cuenta que para ciertas aplicaciones los áridos naturales siguen presentando mejores cualidades que los áridos reciclados. En la tabla 1 se muestran los materiales donde se emplean áridos en los que es más favorable usar áridos con procedencia natural de cantera o con procedencia de una valorización de RCD según los estudios del Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra S.A.

TIPO DE MATERIAL	TIPO DE ÁRIDO RECOMENDADO
Suelo seleccionado	Procedente de RCD
Suelo tolerable	Procedente de RCD
Zahorra reciclada	Procedente de RCD
Gravas drenantes	Procedente de cantera
Arena para camas de tubería	Procedente de RCD
Suelocemento	Procedente de RCD
Gravacemento	Procedente de cantera
Hormigón	Procedente de cantera
Mezcla bituminosa	Procedente de cantera

Tabla 1. Recomendaciones sobre el empleo de árido (reciclado o natural) en función del material a fabricar.

Fuente: Jornada sobre la calidad de los áridos RCD. Reglamento Agrega realizada por el Centro de Estudios de Materiales y Control de Obra S.A.

¹ https://www.dipucadiz.es/export/sites/default/transicion-ecologica-y-desarrollo-urbanosostenible/galeria_de_ficheros/docu_cursos_jornadas/jornada_RCD/Calidad-Aridos-Reciclados-Manuel-Salas-CEMOSA.pdf



Dentro de los materiales que alcanzan mejores calidades con áridos naturales, se han desarrollado estudios para analizar hasta qué porcentaje de sustitución de este árido por reciclado podría ser considerado para obtener calidades semejantes como es el caso del hormigón.

Paulatinamente se siguen desarrollando estudios en las diversas aplicaciones, avanzando en la incorporación de los áridos reciclados en las legislaciones vigentes y elaborando más manuales que fomenten su uso y comercialización.

1.2. Objetivo

El objetivo de este documento es elaborar para la Comunidad Foral de Navarra unas recomendaciones técnicas y ambientales para el empleo de áridos reciclados en los siguientes usos:

- ✓ Hormigones.
- ✓ Carreteras.
- ✓ Caminos.
- ✓ Vías ciclistas.
- ✓ Espacios degradados.

No obstante, no sólo son viables el uso de los áridos reciclados en estas aplicaciones, sino que existen otras, como por ejemplo cubiertas sostenibles o bases de solera, en las que se puede utilizar áridos reciclados siempre y cuando cumplan los requisitos exigidos para ello.

1.3. Legislación, normativa y bibliografía de referencia.

La legislación dentro de la Unión Europea, y en concreto el caso de España, alcanza 3 escalas. Primeramente, se elabora una Directiva Marco que sirve de base para que cada estado miembro desarrolle sus propias regulaciones. Además, España, al ser un Estado de autonomías, otorga potestad a que las comunidades autónomas, para ciertas materias, desarrollen a su vez las regulaciones nacionales en legislación propia para aplicar dentro de su propio territorio.



Figura 3. Aplicación de la legislación en la Unión Europea- España- Navarra

Fuente: Inventarios de emplazamientos de origen, tratamiento y receptores de residuos de construcción y materiales naturales excavado.



Las regulaciones que se han ido adoptando en Navarra en materia de RCD son relacionadas a la gestión y propiedad de los residuos más que recomendaciones técnicas para sus aplicaciones. Siguiendo el esquema de la figura 3, tenemos el siguiente desarrollo legislativo en materia de gestión de RCD:

UNIÓN EUROPEA	ESPAÑA	NAVARRA
Directiva 2018/851¹ , sobre la gestión de residuos de construcción y demolición (deroga a la Directiva 2008/98/CE)	Ley 22/2011² , de residuos y suelos contaminados (actualmente en proceso de modificación)	Ley Foral 14/2018³ de residuos y su fiscalidad.
	Real Decreto 105/2008⁴ , por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición	Decreto Foral 23/2011⁵ , por el que regula la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el ámbito de Navarra

Tabla 2. Legislación de la gestión de RCD en la Unión Europea- España- Navarra.

Fuente: GAN-NIK.

Dentro de estas regulaciones, en concreto el Real Decreto 105/2008 y el Decreto Foral 23/2011, se fomenta y se contempla la posibilidad de recuperar espacios degradados con RCD inertes. Sin embargo, la falta de especificaciones técnicas y ambientales sobre estos materiales hace que, por ejemplo, en Navarra actualmente sólo se autorice la recuperación de estos espacios con materiales naturales excavados sin incluir los áridos procedentes de la valorización de RCD.

Para algunas aplicaciones el Comité Europeo de Normalización (CEN) establece unas **normas armonizadas** que incluyen una serie de requisitos para asegurar una calidad y seguridad adecuada del material con el fin de mejorar su introducción en el mercado. Estas normas son adoptadas y armonizadas en España bajo la aprobación del órgano específico con el nombre **UNE-EN**. En el caso de los áridos, existen las siguientes normas armonizadas cuyas especificaciones técnicas son de obligado cumplimiento para todo tipo de árido independientemente de su naturaleza:

- ✓ UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón. Será anulada por PNE-prEN 17555-1.
- ✓ UNE-EN 13139:2003, corregida por la UNE-EN 13139/ AC: 2004. Áridos para morteros. Será anulada por PNE-prEN 17555-1: Áridos para obras de construcción. Parte 1: Características y por la PNE-prEN 17555-2:2021: Áridos para obras de construcción. Parte 2: Información complementaria.
- ✓ UNE-EN 13043:2003, corregida por la UNE-EN 13043/ AC: 2004. Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas. Será anulada por PNE-prEN 17555-1: Áridos para obras de construcción. Parte 1: Características y por la PNE-prEN 17555-2:2021: Áridos para obras de construcción. Parte 2: Información complementaria.
- ✓ UNE-EN 13242:2003+A1:2008. Áridos para capas granulares y capa tratadas con conglomerantes

1 <https://www.boe.es/doue/2018/150/L00109-00140.pdf>

2 <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-13046>

3 <https://oprec-navarra.com/ley-foral-de-residuos-y-su-fiscalidad/>

4 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-2486>

5 <https://bon.navarra.es/es/anuncio/-/texto/2011/69/0/>



hidráulicos para su uso en capas estructurales. Será anulada por PNE-prEN 17555-1: Áridos para obras de construcción. Parte 1: Características y por la PNE-prEN 17555-2:2021: Áridos para obras de construcción. Parte 2: Información complementaria.

- ✓ UNE-EN 13450:2003, corregida por la UNE-EN 13450/ AC:2004. Áridos para balasto. Será anulada por Áridos para obras de construcción. Parte 1: Características y por la PNE-prEN 17555-2:2021: Áridos para obras de construcción. Parte 2: Información complementaria.
- ✓ UNE-EN 13383-1:2003, corregida por la UNE-EN 13383-1/ AC: 2004. Escollera. Parte 1: Especificaciones. Será anulada por PNE-prEN 13383-1: Escolleras. Parte 1.
- ✓ UNE-EN 13055-1-1:2003, corregida por la UNE-EN 13055-1/ AC: 2004. Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigones, morteros y lechadas. Será anulada por PNE-prEN 13055: Áridos ligeros.
- ✓ UNE-EN 13450:2003, corregida por la UNE-EN 13450/AC:2004: Áridos para balasto. Será anulada por PNE-prEN 13450-1 y PNE-prEN 13450-2.

Estas normas conllevan la obligatoriedad de comercializar los áridos, independientemente de su naturaleza, con marcado CE. Las legislaciones vigentes para hormigones y carreteras se basan y hacen referencia a estas normas armonizadas y, aunque introducen el empleo de árido procedente de la valorización de RCD, las especificaciones son difíciles de cumplir por las propias características de los áridos reciclados.

Por otro lado, no todas las aplicaciones tienen una normalización con lo que los requisitos exigibles en ellas pueden variar en función del proyectista o la Dirección de Obra. Estos usos serían más asequibles a la hora de emplear materiales reciclados, sin embargo, la incertidumbre del modo de ejecutar las unidades de obra con estos materiales y la durabilidad de su calidad con el transcurso del tiempo han originado que su comercialización tampoco haya sido alta.

Para facilitar el uso de los áridos reciclados, tanto en usos normalizados como no normalizados, se han realizado diferentes guías a nivel estatal específicas sobre ellos:

- ✓ **Guía del MITECO para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)**¹
- ✓ **Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), proyecto GEAR.**²

De manera paralela, diferentes comunidades autónomas han ido desarrollando sus propias guías basadas en experiencias y estudios en sus propios territorios. A lo largo del documento se hará referencia, en función del uso, los manuales autonómicos más interesantes que han ayudado a redactar las recomendaciones técnicas y ambientales para Navarra.

Todas guías específicas sobre áridos reciclados tienen en común que se aconseja clasificar los áridos reciclados por su composición en función de la proporción de las siguientes fracciones:

¹ https://www.miteco.gob.es/images/es/guia_rehabilitacion_huecos

² https://www.apabcn.cat/Documentacio/areatecnica/PDFS_RENART/R30630.pdf



- ✓ Ru: Productos pétreos.
- ✓ Rc: Hormigón y mortero.
- ✓ Rb: Cerámico.
- ✓ Ra: Asfalto.
- ✓ X: Otros.
- ✓ FL: Material flotante.

Generalmente, el análisis de su composición se debe realizar bajo la norma UNE-933-11. Como ejemplo, en la tabla 3 se muestran los valores para clasificar los áridos en función de la “Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)”, el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados”¹, las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s”² y la Orden del 12 de enero de 2015 del País Vasco³.

	TIPO DE ÁRIDO	Rc+Ru+Ra (%)	Rc+Ru (%)	Rc (%)	Ra (%)	Rb (%)	X (%)	FL (cm ³ /kg)	Yeso
GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD	Árido reciclado de hormigón (ARH)	-	≥ 90	-	≤ 5	≤ 10	≤ 1	-	-
	Árido reciclado mixto de hormigón (ARMh)	-	≥ 70	-	≤ 5	≤ 30	≤ 1	-	-
	Árido reciclado mixto de cerámicos (ARMc)	-	< 70	-	≤ 5	> 30	≤ 1	-	-
	Árido reciclado mixto con asfalto (ARMa)	-	-	-	5- 30	-	≤ 1	-	-
Continúa en página siguiente									

1 <http://www.aridosrcdandalucia.es/rcd/wp-content/uploads/2017/03/Libro-catalogo-de-firmes-vers-impresa-en-pdf.pdf>

2 <http://citopcyL.es/wp-content/uploads/2021/02/Guia-CITOPCyL-Recomendaciones-uso-aridos-con-RCDs-Oct19-comprimido.pdf>

3 [https://www.legegunea.euskadi.eus/eli/es-pv/o/2015/01/12/\(8\)/dof/spa/html/webleg00-contfich/es/](https://www.legegunea.euskadi.eus/eli/es-pv/o/2015/01/12/(8)/dof/spa/html/webleg00-contfich/es/)



Viene de página anterior

	TIPO DE ÁRIDO	Rc+Ru+Ra (%)	Rc+Ru (%)	Rc (%)	Ra (%)	Rb (%)	X (%)	FL (cm ³ /kg)	Yeso
CATÁLOGO DE FIRMES Y UNIDADES DE OBRA CON ÁRIDO RECICLADO DE RCD/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's	Zahorra reciclada de hormigón (ZarHor)	-	≥ 90	-	-	-	< 1	< 1	-
	Zahorra reciclada mixta I (ZarM I)	≥ 70	≥ 55	-	-	-	< 1	< 1	-
	Zahorra reciclada mixta II (ZarM II)	≥ 70	≥ 55	-	-	-	< 2	< 2	-
	Zahorra reciclada asfáltica (ZarA)	≥ 90	-	-	≥ 50	-	< 1	< 1	-
	Suelo seleccionado reciclado (SSR)	-	-	-	-	-	< 3	< 2 ¹	< 1
	Suelo tolerable reciclado (STR)	-	-	-	-	-	< 5	< 2 ¹	< 2
	Suelo cemento reciclado (SCR)	-	-	-	-	-	< 1	< 1	-
	Gravacemento reciclado GCR32	-	≥ 90	-	≤ 5	≤ 5	< 1	< 2	-
	Gravacemento reciclado GCR20	-	≥ 90	-	≤ 5	≤ 5	< 1	< 2	-
	ORDEN 12 DE ENERO	Árido reciclado de hormigón (AR-H)	-	≥ 90 ²	≥ 50	≤ 10	≤ 10	≤ 1 ³	≤ 5
Árido reciclado mixto (AR-M)		-	≥ 70 ²	-	≤ 10	≤ 30	≤ 1 ³	≤ 5	≤ 0,8

¹ En caso de no estar cubierto por otras capas, el límite se reducirá a < 0,5 cm³/kg.

² En estos componentes se incluye el vidrio siempre y cuando su proporción sea inferior o igual al 2%.

³ Contenidos en improprios de madera, papel, cartón o restos orgánicos inferior al 0,8%.

Tabla 3. Clasificación de los áridos reciclados según la composición de la fracción gruesa

Fuente: Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de residuos de construcción y demolición y Recomendaciones de uso de RCD.

Aunque estas clasificaciones pueden facilitar la comercialización, no deben ser utilizadas como un elemento limitador para aceptar o no la utilización de un árido reciclado. La calidad técnica del material, independiente de su composición, es el elemento que tiene que determinar la viabilidad de uso del material en una aplicación. Es decir, si el árido reciclado no se adapta a la categoría indicada para determinada aplicación, pero, aun así, presenta características geométricas, físicas y químicas adecuadas a su uso en ella de acuerdo con los límites establecidos, el material puede ser utilizado en el uso planteado. En el apartado 2 sobre recomendaciones técnicas se hará referencia a estas clasificaciones. Las recomendaciones técnicas expuestas en este documento han servido de base para la comparativa que hizo Nobatek/ Inef 4 entre regulaciones francesas y españolas incluidas en el documento "Granulats recyclés : documents de référence et conditions de valorisation" del proyecto Poctefa RCdiGreen.

A photograph of a dirt path winding through a dense forest with tall trees and green foliage. A large, semi-transparent green circle is overlaid on the left side of the image. The text '2. Recomendaciones técnicas' is centered in white on the path.

2. Recomendaciones técnicas



2. Recomendaciones técnicas

2.1. Árido reciclado en hormigón

2.1.1. Legislación, normativa y guías.

En España, el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio de 2021, aprobó el **“Código Estructural”**¹ que engloba tanto las estructuras de hormigón, metálicas como mixtas. Este código deroga a la **“Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)”**², aprobado por el Real Decreto 1247/2008, que tenía por objeto regular el proyecto, ejecución y control de las estructuras de hormigón, tanto en obras de edificación como de ingeniería civil, garantizando la seguridad de las mismas, preservando la de las construcciones que en ella se sustentan y la de los usuarios que las utilizan. La fecha de entrada en vigor del Código estructural es el 10 de noviembre de 2021 y no será de aplicación a los proyectos cuya orden de redacción o de estudio, en el ámbito de las Administraciones públicas, o encargo, se hubiese efectuado con anterioridad a esta fecha, ni a las obras de ellos derivadas, siempre que estas se inicien en un plazo no superior a un año para las obras de edificación (10 de noviembre de 2022), ni de tres años para las de ingeniería civil (10 de noviembre de 2024), salvo que por el correspondiente órgano competente, o en su caso por el promotor, se acordase acomodar el proyecto al contenido del “Código Estructural”.

Como la entrada en vigor del Código Estructural está en proceso, en este apartado se describen las especificaciones técnicas tanto del **Código Estructural**, establecidas en el **artículo 30.8**, como de la **EHE-08**, incluidas en su **anexo 15: Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados (HR)**. En general, la Instrucción del Hormigón (EHE-08) incorpora mayor número de recomendaciones que el Código Estructural, sin que se haya incorporado otros tipos de áridos reciclados para este uso.

Dentro de las mismas premisas incluidas en el Código Estructural y la EHE-08 se especifica que los requerimientos para áridos reciclados son complementarios a los indicados para áridos convencionales y, por tanto, se deben cumplir las prescripciones de áridos convencionales siempre y cuando no se contradigan con las especificaciones concretas para áridos reciclados. Además, en ambas normativas se establece que los áridos deben tener marcado CE, independientemente de su naturaleza, según la norma **UNE-EN 12620: “Áridos para hormigón”**, y las propiedades definidas en la declaración de prestaciones (DdP).

Para el hormigón no estructural la Instrucción del Hormigón (EHE-08) incluye un anejo, el **anexo 18: Hormigones de uso no estructural**. Estos hormigones se clasifican en:

- ✓ Hormigones de Limpieza (HL): Cuyo objetivo es evitar la desecación del hormigón estructural durante su vertido, así como una posible contaminación de éste durante las primeras horas de su hormigonado.
- ✓ Hormigones no Estructurales (HNE): Cuyo objetivo es conformar volúmenes de material resistente como, por ejemplo, los utilizados en aceras, bordillos o rellenos. Su resistencia mínima característica será de 15 N/mm².

1 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2021-13681>

2 https://www.mitma.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPH/instrucciones/EHE_es/



En el caso del Código Estructural se incluye un anejo sobre hormigones de limpieza, el **anejo 10: Hormigones de limpieza**, pero no incluye un apartado específico para hormigones no estructurales, aunque se hacen matices sobre esta tipología de hormigones en criterios muy concretos a lo largo del documento general del Código Estructural.

Por otro lado, en la **Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)**¹ se incluyen recomendaciones para la aplicación de áridos reciclados en hormigones en masa:

- ✓ Hormigones estructurales (HE) hasta una resistencia característica de 30MPa.
- ✓ Hormigones no estructurales (HNE) hasta una resistencia característica de 20MPa.
- ✓ Hormigones de limpieza (HL) con un contenido mínimo de cemento de 150 kg/m³.

Además, y aunque no se analice en este documento, la Guía en su apartado 10.4 especifica las recomendaciones para el uso de áridos reciclados en elementos prefabricados: bordillos, bovedillas, bancos o bloques.

La gran diferencia que existe entre la Guía y las normativas del Código Estructural y la Instrucción del Hormigón es que la Guía abre la posibilidad de utilizar áridos reciclados mixtos frente a los áridos exclusivamente procedentes de residuos de hormigón que establecen el Código estructural y la EHE-08. Otras normativas internacionales también permiten el uso de áridos reciclados mixtos en hormigones no estructurales como por ejemplo las incluidas en estudios de RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures). En España, el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (en adelante **CEDEX**)² también ha realizado estudios experimentales con áridos reciclados mixtos y cerámicos en hormigones. Concretamente, el árido mayoritariamente cerámico podría ser considerado como árido ligero, debida a su reducida densidad, para la obtención de hormigones ligeros sin finos. En el caso del árido reciclado mixto puede ser adecuado para utilizarse en hormigones no estructurales in situ y en masa, pero no se recomienda su uso en hormigones estructurales. Tampoco se recomiendan estos áridos para la fabricación de elementos prefabricados debido a su alta absorción que genera complicaciones durante el proceso de elaboración de las piezas. El uso de este tipo de áridos reciclados debe ser controlado rigurosamente ya que los hormigones elaborados con estos áridos reducen considerablemente su resistencia en comparación a la de un hormigón convencional y se debe tener en cuenta que pueden generar un aumento del coste de fabricación y una disminución de la sostenibilidad por la mayor demanda de cemento.

¹ https://www.apabcn.cat/Documentacio/areatecnica/PDFS_RENART/R30630.pdf

² <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/35/residuos-de-construccion-y-demolicion/valorizacion/aplicaciones/arido-reciclado-procedente-de-residuos-mixtos-o-ceramicos/212/edificacion-y-obra-publica.html>



2.1.2. Propiedades generales

ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN: EHE-08, CÓDIGO ESTRUCTURAL Y LA GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD

Tanto la EHE-08 como el Código Estructural, se centran en indicaciones para fabricar hormigón con **árido grueso** reciclado procedente de machaqueo **de residuos de hormigón** tanto para hormigones en masa como armados y excluyendo los siguientes hormigones:

- ✓ Fabricados con árido fino reciclado.
- ✓ Fabricados con áridos reciclados de naturaleza distinta del hormigón (áridos mayoritariamente cerámicos, asfálticos, etc.).
- ✓ Fabricados con áridos reciclados procedentes de estructuras de hormigón con patologías que afectan a la calidad del hormigón tales como álcali-árido, ataque por sulfatos, fuego, etc.
- ✓ Fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigones especiales tales como aluminoso, con fibras, con polímeros, etc.

Los hormigones reciclados **no** podrán tener una resistencia característica **superior a 40 N/mm²** y queda **excluido el empleo de árido reciclado en hormigón pretensado**.

Para hormigones estructurales, se recomienda limitar el contenido de este árido reciclado al **20%** en peso sobre el contenido total del árido grueso ya que sus propiedades finales apenas se ven afectadas en comparación con el hormigón convencional. Por ejemplo, la densidad de los hormigones con un porcentaje de árido reciclado igual o menor al 20% se mantienen iguales que las indicadas para hormigón convencional:

- ✓ Hormigón en masa: 2300 kg/m³.
- ✓ Hormigón armado: 2500 kg/m³.

Sin embargo, en porcentajes mayores de árido reciclado la densidad del hormigón reciclado disminuye entre el 5-15% respecto a la densidad de un hormigón convencional. Esta particularidad afecta, por ejemplo, al cálculo de los valores característicos del peso propio, a las dosificaciones a adoptar en la mezcla aumentando el contenido de cemento o disminuyendo la relación agua/cemento o a la necesidad de aumentar los recubrimientos para garantizar la durabilidad de las armaduras de la estructura.

Aun así, queda abierto el uso de mayores porcentajes de árido reciclado siempre y cuando se realicen estudios específicos y experimentación complementaria en cada aplicación. Por ejemplo, ha habido experiencias pilotos con empleo del 100% del árido reciclado como ha demostrado CEMEX en el webinar: Casos prácticos de uso de hormigón con árido reciclado¹.

En la EHE-08 se recomienda que el árido reciclado provenga de un único hormigón de origen ya que,

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=emqvdpyxrfg>



a cuanto mayor heterogeneidad, mayor deberá ser el **control de** sus propiedades especialmente **su absorción, su contenido de finos, su contenido de desclasificados inferiores, su contenido de impurezas y sus características químicas en función del contenido de cloruros, materia orgánica o su reactividad álcali-árido**. Para garantizar un control del origen del árido reciclado se aconseja disponer de un documento de identificación de los escombros originales en el que se incluya:

- ✓ Naturaleza del material (hormigón en masa, armado, mezcla de hormigón, etc.).
- ✓ Planta productora del árido y empresa transportista del escombro.
- ✓ Presencia de impurezas (cerámico, madera, asfalto).
- ✓ Detalles de su procedencia (origen o el tipo de estructura de la que procede).
- ✓ Cualquier otra información que resulte del interés (causa de la demolición, contaminación de cloruros, hormigón afectado por reacciones álcali-árido, etc.).

La **absorción de agua** del árido grueso reciclado es elevada, por lo que para hormigones con más del 20% de árido reciclado es aconsejable utilizar los áridos en condiciones de saturación. Para mantener la humedad, se pueden instalar en las plantas de dosificación sistemas que humedezcan los áridos en las cintas transportadoras, o aspersores de agua en las tolvas de los áridos. La alta absorción de agua también afecta al amasado en estado seco pudiendo requerir mayores tiempos de amasado que en el caso de ser excesivamente prolongado puede generar finos por la friabilidad del mortero adherido al árido reciclado. A la hora de puesta en obra por medio de bombeo, esta absorción también puede alterar la homogeneidad del hormigón teniéndose que controlar mediante ensayos característicos y toma de muestras in situ.

La calidad del árido reciclado influye en la calidad del hormigón, siendo el módulo de elasticidad, la retracción y la fluencia, las propiedades que se ven más afectadas, siendo mayor cuanto más alta es la resistencia del hormigón reciclado. El **módulo de deformación longitudinal** del hormigón disminuye progresivamente al aumentar el porcentaje de árido reciclado por encima del 20%. Orientativamente se puede considerar que un hormigón realizado con un 100% de árido grueso reciclado tiene un módulo 0,8 veces el del hormigón convencional, aunque esto debe ser contrastado por ensayos ya que, por la variabilidad de la calidad del árido, la relación puede ser aún menor. La **retracción** también se ve afectada progresivamente a medida que aumenta la proporción del árido grueso reciclado empleado; a mayor porcentaje, mayor retracción. De forma orientativa se puede considerar que la retracción para hormigones con un 100% de árido grueso reciclado será 1,5 veces la del hormigón convencional; debiéndose comprobar con ensayos por fluctuaciones derivadas de la calidad de los áridos reciclados.



Otra propiedad que aumenta progresivamente en función del aumento del porcentaje de árido reciclado grueso es la **fluencia**; que de forma orientativa en un hormigón reciclado con 100% áridos reciclados gruesos la fluencia será 1,25 veces la del hormigón convencional, aunque, como en los casos anteriores, es recomendable los ensayos para asegurar dicha relación.

ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS O CERÁMICOS: GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD Y CEDEX

El empleo de áridos reciclados mixtos o cerámicos originan un descenso de la **densidad** del hormigón. Cuanto más árido reciclado de esta tipología se emplee mayor será el descenso de la densidad del hormigón obtenido. Para tener un orden de magnitud, según la Guía de áridos reciclados procedentes de RCD, la densidad disminuye por cada 10% de sustitución. Por tanto, de forma orientativa, las densidades del hormigón obtenidas al emplearse áridos reciclados mixtos o cerámicos variarán entre:

- ✓ Hormigón fabricado con árido reciclado mixto: 1700- 2300 kg/m³.
- ✓ Hormigón fabricado con árido reciclado cerámico: 1600 – 2100 kg/m³.
- ✓ Hormigón ligero sin finos: 1400- 1700 kg/m³.

Según los estudios del CEDEX, la **resistencia a compresión** del hormigón reciclado con áridos mixtos varía entre 10 y 40 N/mm² y para hormigones con empleo de áridos reciclados cerámicos varía entre 10 y 20 N/mm². De forma orientativa, el descenso de la resistencia en función del tipo y proporción empleada será el siguiente:

Tipo de árido reciclado utilizado	Proporción empleada	Porcentaje de descenso de la resistencia a compresión
Árido reciclado mixto	Hasta el 50%	10%
Árido reciclado mixto	100%	15%
Fracción fina de árido reciclado	Hasta el 50%	22%
Fracción fina de árido reciclado	100%	43%

Tabla 4. Reducción de la resistencia a compresión en función de la cantidad y tipo de árido reciclado empleado
Fuente: CEDEX.

En el caso de la Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, se establece criterios aún más restrictivos. Orientativamente, se espera que la resistencia a compresión, para contenidos equivalentes de cemento a los de un hormigón en masa convencional, disminuya de la siguiente manera:

- ✓ Para hormigones estructurales en masa, alrededor de un 2,5% por cada 10% de sustitución.
- ✓ Para hormigones no estructurales y de limpieza alrededor de un 2% por cada 10% de sustitución.

La **resistencia a tracción y flexión** de los hormigones reciclados no sufre grandes variaciones frente



a la del hormigón convencional.

El **módulo de elasticidad** disminuye en hormigones fabricados con áridos reciclados frente a hormigones convencionales. Orientativamente, según el CEDEX, las reducciones que se producen son las de la siguiente tabla.

Tipo de árido reciclado utilizado	Proporción empleada	Porcentaje de reducción del módulo de elasticidad
Árido reciclado mixto	Hasta el 50%	10%
Árido reciclado mixto	100%	25%
Árido reciclado cerámico	-	50-67%

Tabla 5. Reducción del módulo de elasticidad en función de la cantidad y tipo de árido reciclado empleado

Fuente: CEDEX.

La Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición establece valores más restrictivos, reduciéndose el módulo de elasticidad 3,4% por cada 10% de sustitución.

La **fluencia y la retracción** es mayor para hormigones reciclados con áridos mixtos y cerámicos frente a los hormigones convencionales. La retracción, según los datos del CEDEX, es aproximadamente un 40% mayor en hormigones reciclados con áridos mixtos y un 20-60% en hormigones reciclados con áridos cerámicos en comparación con hormigones convencionales.

La **permeabilidad** es superior, en torno al 50%, en estos hormigones reciclados. Los hormigones fabricados con áridos cerámicos no tienen una adecuada **resistencia a las heladas**, aunque sí una buena **resistencia al fuego** si se conserva convenientemente seco. También se deberá verificar la **resistencia a los sulfatos** ya que los estudios realizados no aseguran un buen comportamiento frente a estas sustancias.

2.1.3. Materiales

Los componentes del hormigón son cemento, agua, áridos y en algunos casos, aditivos cuyos requisitos varían en función de si son hormigones estructurales o no estructurales.

2.1.3.1. Hormigones estructurales

ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN: EHE-08, CÓDIGO ESTRUCTURAL Y LA GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD

El **cemento** a emplear cumplirá las mismas condiciones que las aplicaciones para el hormigón convencional establecidas en el apartado 28 del Código Estructural y en el artículo 26 de la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08. En el Anejo 6 del Código Estructural y en el Anejo 4 de la EHE-08 se establecen las recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales.

Las condiciones del **agua** vienen estipuladas en el apartado 29 del Código Estructural y en el artículo 27 de la EHE-08 teniendo que cumplirse tanto para la fabricación de hormigón reciclado como



convencional.

Como se ha mencionado anteriormente, ambas normativas recomiendan utilizar una combinación de **árido** grueso natural y reciclado, este último en una proporción menor al 20% del árido grueso total. Los áridos naturales a emplear pueden ser rodados o procedentes de rocas machacadas mientras que los áridos reciclados se recomiendan, según la EHE-08, que provengan de hormigones estructurales sanos o de hormigones de resistencia elevada, verificándose que se cumplen las especificaciones exigidas. Ambos tipos de áridos se deberán acopiar de forma separada e identificada.

Ambas normativas establecen las mismas condiciones físico- mecánicas, tanto en el coeficiente de absorción como en el coeficiente de los Ángeles.

ESPECIFICACIONES	LÍMITES		
	ÁRIDO RECICLADO		ÁRIDO NATURAL (> 80%)
	≤ 20%	> 20%	
Coefficiente de absorción	≤ 7%	(*)	≤ 4,5 %
Coefficiente de los Ángeles	< 40%	-	< 40%

(*) Según la EHE-08, en hormigones reciclados con más del 20% de árido reciclado, la combinación de árido grueso natural y reciclado debería cumplir la especificación que establece la Instrucción, presentando un coeficiente de absorción no superior al 5%.

Tabla 6. Condiciones físico-mecánicas de los áridos para hormigón estructural según la EHE-08 y el Código Estructural
Fuente: GAN-NIK.

Para el caso de los áridos reciclados procedentes de un único hormigón de origen controlado, entendiéndose como tales hormigones de composición y características conocidas, se deberán realizar las comprobaciones indicadas en el artículo 30.7.5 del Código Estructural sobre reactividad álcali-árido. En el caso de áridos reciclados procedentes de hormigones de distinto origen, estos podrán considerarse potencialmente reactivos y se podrá utilizar según los criterios del apartado 30.7.5 del Código Estructural. Estas consideraciones también están especificadas en el artículo 28.7.6 del anejo 15 de la EHE-08.

La EHE-08 incluye además unas recomendaciones sobre granulometría y contenido de terrones de arcilla sobre áridos reciclados no especificadas en el Código Estructural.

ESPECIFICACIONES	ARTÍCULO	LIMITACIONES SEGÚN EL CONTENIDO DE ÁRIDO RECICLADO GRUESO		ÁRIDO NATURAL (> 80%)
		≤ 20%	> 20%	
Tamaño mínimo	28.3. Tamaño máximo y mínimo de un árido	4 mm	4 mm	-
Contenido de desclasificados inferiores	28.4. Granulometría de los áridos	≤10%	≤10%	-
Contenido de partículas que pasan por el tamiz 4 mm		< 5%	< 5%	-
Contenido de terrones de arcilla	28.6. Requisitos físico mecánicos	≤ 0,6%	≤ 0,25%*	≤ 0,15%

* Valor límite en el caso de emplear 100% de árido grueso reciclado. En casos inferiores, se deberá extremar precauciones durante su producción para eliminar al máximo las impurezas de tierras y se cumplan las especificaciones de la Instrucción.

Tabla 7. Especificaciones físicas para el árido reciclado a emplear en la fabricación de hormigón estructural.
Fuente: Anejo 15 de la Instrucción de hormigón estructural EHE-08.



Las impurezas pueden originar un descenso de la resistencia en el hormigón y otros problemas como reacciones álcali-árido por la presencia de vidrio, ataque por sulfatos por la presencia de yeso, desconchados superficiales por la presencia de madera o papel, una elevada retracción por presencia de tierras arcillosas o un mal comportamiento hielo-deshielo por la presencia de algunos cerámicos. Es por ello, que se establecen unos límites de concentración en función de la naturaleza de sus componentes tanto en la EHE como en el Código Estructural, pero difiriendo en algunos parámetros

ELEMENTOS	ANEJO 15 DE LA EHE-08	CÓDIGO ESTRUCTURAL
	MÁXIMO CONTENIDO DE IMPUREZAS EN % DEL PESO TOTAL DE LA MUESTRA	LÍMITE
Hormigón, mortero, material pétreo	-	≥ 95%
Material cerámico	≤ 5	-
Partículas ligeras	≤ 1	≤ 2%
Asfalto	≤ 1	≤ 1%
Otros materiales (vidrio, plástico, metales, etc.)	≤ 1	≤ 0,5%

Tabla 8. Comparativa de la composición del árido grueso reciclado entre la EHE-08 y el Código estructural

Fuente: GAN-NIK.

A modo de resumen se establecen en esta tabla las características que deben cumplir los áridos reciclados para hormigones estructurales teniendo en cuenta la EHE-08, el Código estructural y la Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD):

TAMAÑO MÍNIMO DE ÁRIDO (MM.)		
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 933-1 y 933-2	4	4
FORMA. ÍNDICE DE LAJAS (%)		
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 933-3	< 35	< 35
CONTENIDO DE DESCALIFICADOS (%)		
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 933-1 y 933-2	≤ 10	≤ 10
CONTENIDO DE PARTÍCULAS QUE PASAN POR EL TAMIZ 4 MM (%) (NATURAL + RECICLADO)		
ENSAYO	LIMITACIONES EHE-08	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 933-1 y 933-2	≤ 5	≤ 5

Continúa en página siguiente



IMPUREZAS (%)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 933-11	Material cerámico: ≤ 5% Partículas ligeras: ≤ 1% Asfalto: ≤ 1% Otros materiales: ≤ 1%	Partículas ligeras: ≤ 2% Asfalto: ≤ 1% Otros materiales: ≤ 0,5%	Partículas flotantes (FL) ≤ 2 cm ³ /kg Materiales bituminosos (Ra) ≤ 1% Otros materiales (metales, plásticos, vidrio,...) (Rg+X) ≤ 1%
CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	LIMITACIONES GUÍA	
UNE 7133	Si contenido de AR es <20%: en A.N. ≤ 0,15 + en A.R. ≤ 0,6 Si contenido de AR es 100%: ≤ 0,25	≤ 0,25	
ABSORCIÓN (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA
UNE-EN 1097-6	Si contenido de AR es <20%: en A.R. ≤ 7 + en A.N. ≤ 4,5 Si contenido de AR es >20%: ≤ 5	Si contenido de AR es <20%: en A.R. ≤ 7 + en A.N. ≤ 4,5	AR + AN ≤ 9
RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN. COEFICIENTE DE LOS ÁNGELES (%) (NATURAL+ RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA	
UNE-EN 1097-2	≤ 40 ¹	≤ 50	
PÉRDIDA DE PESO CON SULFATO DE MAGNÉSICO (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA	
UNE-EN 1367-2	≤ 18	≤ 18	
CONTENIDO DE SULFATOS SOLUBLES (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA	
UNE-EN 1744-1	≤ 0,8	≤ 0,8	
CONTENIDO DE CLORUROS TOTALES (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA	
UNE-EN 1744-1	≤ 0,05	≤ 0,05	
CONTENIDO TOTAL DE COMPUESTOS DE AZUFRE (%) (NATURAL + RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08/ CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA	
UNE-EN 1097-6	≤ 1	≤ 1	
CONTENIDO PARTÍCULAS LIGERAS (%) (NATURAL+ RECICLADO)			
ENSAYO	LIMITACIONES EHE -08	CÓDIGO ESTRUCTURAL	LIMITACIONES GUÍA
UNE 7244	≤ 1	≤ 2	≤ 1

* El límite de la fragmentación de lasaj es basado en el Anejo 15 de la EHE donde se permite la aplicación del árido reciclado en hormigones de resistencias características hasta 40 N/mm². Sin embargo, en el artículo 28.6 de la EHE-08 y en el artículo 30.6 del Código Estructural se especifica que para resistencias características menores a 30 N/mm² (resistencia característica límite para hormigón estructural establecida en la Guía), la resistencia de fragmentación puede ser entre 40 y 50 si se acredita experiencia previa.

Tabla 9. Requisitos de los áridos reciclados en función de diferentes normativas para hormigones estructurales

Fuente: GAN-NIK.



La EHE-08 recomienda los **aditivos** que modifiquen la reología en hormigones con un porcentaje de árido reciclado mayor del 20% ya que ayudan a controlar la absorción de árido como pueden ser los aditivos plastificantes o superplastificantes. Para estudiar la necesidad de incorporar estos aditivos en obra se deberán realizar ensayos característicos. Además, en hormigones que deben cumplir diferentes especificaciones por la exposición a ambientes, como heladas, deberán cumplir las especificaciones pertinentes. El Código Estructural no dispone de ninguna especificación concreta para aditivos en hormigones elaborados con áridos reciclados.

Por tanto, es importante ajustar la **dosificación** de los componentes del hormigón mediante ensayos previos. Los métodos de dosificación habituales para hormigones convencionales son válidos para hormigones reciclados con un porcentaje de árido reciclado no superior al 20%. Sin embargo, los hormigones reciclados con sustituciones superiores al 20% necesitarán un contenido mayor de cemento o una menor relación agua/cemento en su dosificación para obtener resistencias y durabilidades similares a la de un hormigón convencional.

2.1.3.2. Hormigones no estructurales

ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN: EHE-08, CÓDIGO ESTRUCTURAL Y LA GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD

Dentro de este grupo compararemos las especificaciones del Código Estructural, de la EHE-08 y la Guía de áridos reciclados procedentes de RCD para el hormigón de limpieza (HL) mientras que, para otros hormigones no estructurales, usados por ejemplo en aceras o bordillos, haremos referencia exclusivamente a lo incluido en la EHE-08 y a la Guía de áridos reciclados procedentes de RCD.

El **cemento** a emplear para esta los hormigones no estructurales es el establecido en esta tabla:

APLICACIÓN	CEMENTOS RECOMENDADOS	
	EHE-08	CÓDIGO ESTRUCTURAL
Prefabricados no estructurales	Cementos comunes excepto CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C	-
Hormigones de limpieza	Cementos comunes	Cementos comunes
Hormigones de rellenos de zanjas	Cementos comunes	-
Otros hormigones ejecutados en obra	Cementos para usos especiales ESP VI-1 y Cementos comunes excepto CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C	-

Tabla 10. Cementos recomendados en función del uso de hormigones no estructurales y normativa de aplicación

Fuente: GAN-NIK.

En el caso de hormigones de limpieza, tanto la EHE-08 como el Código Estructural, establece estos mismos criterios:

- ✓ Dosificación mínima de cemento de 150 kg/m³.
- ✓ Empleo de hasta un 100% de áridos gruesos reciclados cuando cumpla los requisitos establecidos para áridos reciclados especificados anteriormente.
- ✓ El tamaño máximo de árido es de 30 mm para facilitar la trabajabilidad del hormigón.



Según la EHE-08, en el caso de otros hormigones no estructurales (HNE) el tamaño máximo del árido es de 40 mm.

La Guía de áridos reciclados procedentes de RCD permite el uso de áridos reciclados procedentes de residuos de hormigón tanto para hormigones de limpieza, especificando la misma dosificación mínima que la EHE-08 y el Código Estructural, como para hormigones no estructurales, cuya resistencia característica se recomienda que no supere 20MPa. Además, se especifican otros parámetros tal y como se indica en la tabla 11.



ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS O CERÁMICOS: GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RCD Y CEDEX

Para los requisitos de los áridos reciclados mixtos en hormigones no estructurales se toma como referencia, de forma orientativa, las especificaciones incluidas por CEDEX y las indicadas en la Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).

REQUISITO	NORMA	LÍMITES				
		ÁRIDOS RECICLADOS DE HORMIGÓN			ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS	
		EHE- 08	CÓDIGO ESTRUCTURAL ¹	GUÍA	GUÍA	CEDEX
Absorción	UNE-EN 1744-1	Si contenido de AR es <20%: en A.R. ≤ 7 + en A.N. ≤ 4,5 Si contenido de AR es >20%: ≤ 5	Si contenido de AR es <20%: en A.R. ≤ 7 + en A.N. ≤ 4,5	≤ 9%	≤ 12%	≤ 12%
Contenido de compuestos totales de azufre (S)	UNE-EN 1097-6	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO ₃)	UNE-EN 1744-1	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 0,8%	≤ 1%
Contenido de materiales no deseados (vidrio, plásticos, papel)	UNE-EN 933-11	≤ 1%	≤ 0,5%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%
Índice de lascas	UNE-EN 933-3	< 35%	< 35%	< 35%	< 35%	≤ 35%
Coficiente de Los Ángeles		≤ 40% ²	≤ 40% ²	≤ 50%	≤ 50%	≤ 50%
Descalificados inferiores	UNE-EN 933-1 y 933-2	≤ 10%	-	≤ 10%	≤ 10%	≤ 5%
Contenido de finos	UNE-EN 933-1 y 933-2	≤ 4%	-	≤ 4%	≤ 4%	≤ 4%
Partículas ligeras	UNE 7244	≤ 1%	≤ 2%	≤ 1%	≤ 1%	≤ 1%

¹ Consideraciones exclusivamente para hormigones de limpieza

² El límite de la fragmentación de lascas está basado en el Anejo 15 de la EHE donde se permite la aplicación del árido reciclado en hormigones de resistencias características hasta 40 N/mm². Sin embargo, en el artículo 28.6 de la EHE-08 y en el artículo 30.6 del Código Estructural se especifica que para resistencias características menores a 30 N/mm² (resistencia característica límite para hormigón estructural establecida en la Guía), la resistencia de fragmentación puede ser entre 40 y 50 si se acredita experiencia previa.

Tabla 11. Requisitos para áridos reciclados en hormigones no estructurales y de limpieza según la guía de referencia

Fuente: GAN-NIK.



2.2 Árido reciclado en carreteras

2.2.1. Normativa

En Navarra no hay una regulación de dimensionamiento de firmes de carretera propia como puede ser otras comunidades autónomas como el País Vasco con la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco”¹, publicada en 2012 y modificada con la orden del 19 de octubre de 2017 o Aragón con la publicación de “Recomendaciones Técnicas para el Dimensionamiento de firmes de la Red Autonómica Aragonesa”². Por tanto, para determinar las características a emplear en carreteras nos centraremos la **“Norma 6.1 IC Secciones de Firme. Instrucción de Carretera”**³ publicada en 2003. Esta norma tiene como objetivo el establecimiento de los criterios básicos que deben ser considerados en el proyecto de los firmes de carreteras de nueva construcción, de acondicionamiento de las existentes y, salvo que se justifique en caso contrario, en la reconstrucción total de firmes. Sin embargo, no será aplicable a los pavimentos sobre puentes ni en **túneles ni en proyectos de rehabilitación superficial o estructural** de los firmes y pavimentos de las carreteras en servicio, en los que se seguirá lo establecido en la **“Norma 6.3 IC de Rehabilitación de firmes”**⁴.

Respecto a las especificaciones sobre los materiales a emplear tanto naturales, artificiales como reciclados se incluyen en el **“Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3”**⁵. Aun así, también es de interés la **“Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)”** ya que se centra en criterios exclusivos para áridos reciclados.

Diversas comunidades autónomas han desarrollado sus propias recomendaciones en materia de empleo de áridos reciclados en estructuras de carreteras como Andalucía con el “Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”, Castilla y León con “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” o el País Vasco que incluye diferentes criterios en la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco”. Hay que tener en cuenta que en estas comunidades existen regulaciones propias en materia de carreteras, la “Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía”⁶ en el caso de Andalucía y las “Recomendaciones de Proyecto y Construcción de Firmes y Pavimentos de Castilla y León”⁷ en el caso de Castilla y León, que hace que algún parámetro diste de los valores indicados en la norma 6.1 IC. Estas tres guías autonómicas junto a las Norma 6.1 y 6.3 I.C, el PG-3 y la Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición son las referentes para el análisis de los requisitos técnicos tanto en explanadas, rellenos tipo terraplén como en firmes de carreteras.

2.2.2. Propiedades generales

Uno de los factores para el diseño del firme es su adecuación al tráfico previsto, fundamentalmente al tráfico pesado, durante la vida útil del mismo. Por tanto, la sección estructural del firme dependerá de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp) que se prevea en el carril de proyecto en el primer año de puesta en servicio y que servirá para establecer la categoría de tráfico.

- 1 <https://www.euskadi.eus/norma-para-el-dimensionamiento-de-firmes-de-la-red-de-carreteras-del-pais-vasco/web01-a2garrai/es/>
- 2 <https://www.aragon.es/documents/20127/674325/Normacarretera.pdf/9dad74dd-c3f4-320f-a440-5a43ddcc1aa5>
- 3 https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1010100.pdf
- 4 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-22786>
- 5 <https://www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales>



NORMA/ INSTRUCCIÓN O RECOMENDACIÓN	CATEGORÍAS DE TRÁFICO								
	T00	T0	T1	T21	T22	T31 o T3A	T32 o T3B	T41 o T4A	T42 o T4B
Norma 6.1 I.C.: Secciones de firme	≥ 4.000	≥ 2.000 y < 4.000	≥ 800 y < 2.000	≥ 200 y < 800		≥ 100 y < 200	≥ 50 y < 100	≥ 25 y < 50	< 25
Catálogo de firmes (Andalucía)	≥ 4.000	≥ 2.000 y < 4.000	≥ 800 y < 2.000	≥ 200 y < 800		≥ 100 y < 200	≥ 50 y < 100	≥ 25 y < 50	< 25
Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's (Castilla y León)	-	-	800- 2.000	400- 800	200- 400	100-200	50-100	25-50	0-25

Tabla 12. Categorías de tráfico en función de la Intensidad Media Diaria de vehículos pesados (IMDp)

Fuente: Norma 6.1 I.C. Secciones de firme, Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's

Estas intensidades de tráfico son las mismas que las incluidas en el anejo 1 de la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” cuando se aplica un factor de crecimiento anual medio del tráfico de vehículos pesados del 4% en un periodo de proyecto de 20 años.

En las especificaciones de las 3 comunidades autónomas, el uso de árido reciclado procedente de RCD presenta un buen comportamiento en categorías de tráfico T2 e inferiores, es decir, limitándose su uso para categorías T2 (T22 para el caso de Castilla y León) a T4.

Una vez definido el tipo de tráfico pesado del vial, hay que tener en cuenta que las especificaciones variarán en función de las partes de la carretera donde se quiera aplicar los áridos reciclados, bien sea la explanada, el firme o los arcenes.

Para la **explanada**, según la Norma 6.1 I.C, las recomendaciones de Castilla y León y la Norma para

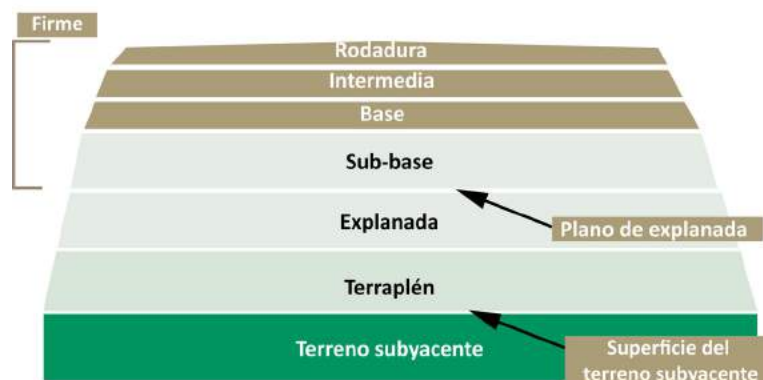


Figura 4. Sección tipo de las partes de una carretera.

Fuente: GAN-NIK.



el dimensionamiento de firmes del País Vasco, se definen 3 tipos, E1, E2 y E3, basados en el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (Ev2), obtenido de acuerdo con la NLT-357 «Ensayo de carga con placa». No obstante, en Andalucía se clasifica basándose en el módulo equivalente Ee calculado de acuerdo al procedimiento descrito en la ICAFIR.

NORMA/ INSTRUCCIÓN O RECOMENDACIÓN	E1 o EX1	E2 o EX2	E3 o EX3
Norma 6.1 I.C.: Secciones de firme	≥ 60	≥ 120	≥ 300
Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados	≥ 60	≥ 100	≥ 300
Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's (Castilla y León)	≥ 60	≥ 120	≥ 300
Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco	≥ 120	≥ 200	≥ 300

Tabla 13. Tipos de explanadas en función del módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (MPa)

Fuente: Norma 6.1 I.C. Secciones de firme, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados, Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's (Castilla y León) y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco

Teniendo en cuenta esta clasificación y en función del tipo de suelo sobre el que se va a realizar la explanada, se proponen diferentes categorías de explanadas que podrá elegir el proyectista en función de la disponibilidad del material y sus espesores. En la figura 5, tenemos el ejemplo de las secciones tipo de la Norma 6.1. I.C aunque el resto de normas sobre carreteras autonómicas también establecen sus propios firmes. La Norma 6.1 I.C también incluye criterios a tener en cuenta a la hora de elegir la sección de la explanada.

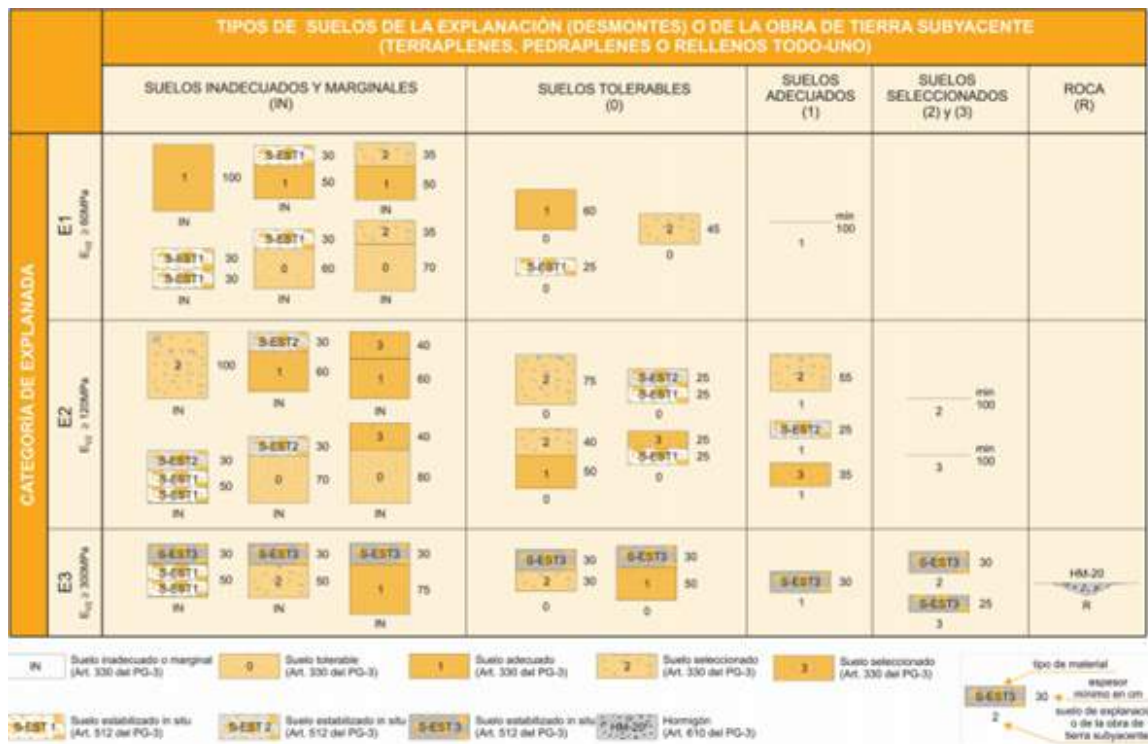


Figura 5. Tipos de suelos para la explanada

Fuente: Norma 6.1 I.C. Secciones de firmes



En el caso de materiales reciclados para explanadas o terraplenes cada guía incluye este tipo de áridos:

GUÍA	TIPO DE APLICACIÓN	TIPO DE ÁRIDOS RECICLADOS
Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD	Suelos seleccionados, tolerables, adecuados y marginales para terraplenes y rellenos localizados.	ARH, ARMh, ARMc y ARMa
	Rellenos localizados de materiales drenantes.	ARH, ARMh y ARMc
Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados	Explanadas y terraplenes.	SR Sel y SR Tol
Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's	Explanadas y terraplenes.	SR Sel, SR Tol, SR Ad, ZarHor y SCR.
Anejo 6 de la Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco	Suelos seleccionados para terraplenes y explanadas mejoradas	AR-H y AR-M

Tabla 14. Tipos de áridos reciclados a emplear en explanadas según la aplicación y la guía de referencia

Fuente: GAN-NIK

Además, tanto el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” como las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's” incluyen secciones tipo para explanadas con áridos reciclados como se observa en las siguientes figuras.

		TIPO DE SUELO DE LA EXPLANACIÓN O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE		
		Suelos inadecuados y marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1			
	E2			
	E3			

IN: suelo inadecuado; S-Tol: Suelo tolerable; S-Ad: Suelo adecuado; SR-Tol: suelo reciclado tolerable de RCD; SR-Sel: Suelo reciclado seleccionado de RCD; S-EST1: Suelo estabilizado tipo 1; S-EST2: Suelo estabilizado tipo 2; S-EST3: Suelo estabilizado tipo 3;

Figura 6. Tipos de formación de explanada en función de la tierra subyacente y la categoría de explanada

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)



		TIPO DE SUELO DE LA EXPLANADA O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (espesor mínimo: 1 m. Si el espesor es menor seleccionar categoría inmediatamente inferior)				
		Suelos inadecuados y marginales	Suelos tolerables	Suelos adecuados	Suelos seleccionados	Roca
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1			<p>Espesor mínimo 100 cm</p>		
	E2				<p>Espesor mínimo 100 cm</p>	
	E3					

IN: suelo inadecuado; S-Tol: Suelo tolerable; S-Ad: Suelo adecuado; SR-Tol: suelo reciclado tolerable de RCD; SR-Ad Suelo Reciclado Adecuado de RCD; SR-Sel: Suelo reciclado seleccionado de RCD; S-EST1: Suelo estabilizado tipo 1; S-EST2: Suelo estabilizado tipo 2; S-EST3: Suelo estabilizado tipo 3; SCR: Suelo-cemento reciclado de RCD

Figura 7. Tipos de formaciones de explanada en función de la tierra subyacente y la categoría de explanada

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's

Por otro lado, los **firmes** se basan en la categoría de tráfico pesado y en el tipo de explanada subyacente que se seleccionarán por parte del proyectista en función de su adecuación técnica y económica. Los tipos de secciones para firme que incluye la Norma 6.1 I.C. Secciones de firmes se pueden ver en las figuras 8 y 9. La nomenclatura de estas secciones se realiza mediante 3 o 4 cifras correspondiendo:

- ✓ La primera (si son tres cifras) o las dos primeras (si son cuatro cifras) indican la categoría de tráfico pesado, desde T00 a T42.
- ✓ La penúltima expresa la categoría de explanada, desde E1 a E3.
- ✓ La última hace referencia al tipo de firme, con el siguiente criterio:
 - 1: Mezclas bituminosas sobre capa granular.
 - 2: Mezclas bituminosas sobre suelocemento.
 - 3: Mezclas bituminosas sobre gravacemento construida sobre suelocemento.
 - 4: Pavimento de hormigón.

El dimensionamiento de estos firmes puede ser diferentes a los incluidos siempre que se justifique desde un punto técnico o/y económico y que conlleve mejores resultados ambientales o de seguridad de la circulación vial. Por tanto, estas secciones son orientativas. En algunas Comunidades Autónomas también se han desarrollado secciones tipo de firmes dentro de sus propias regulaciones.

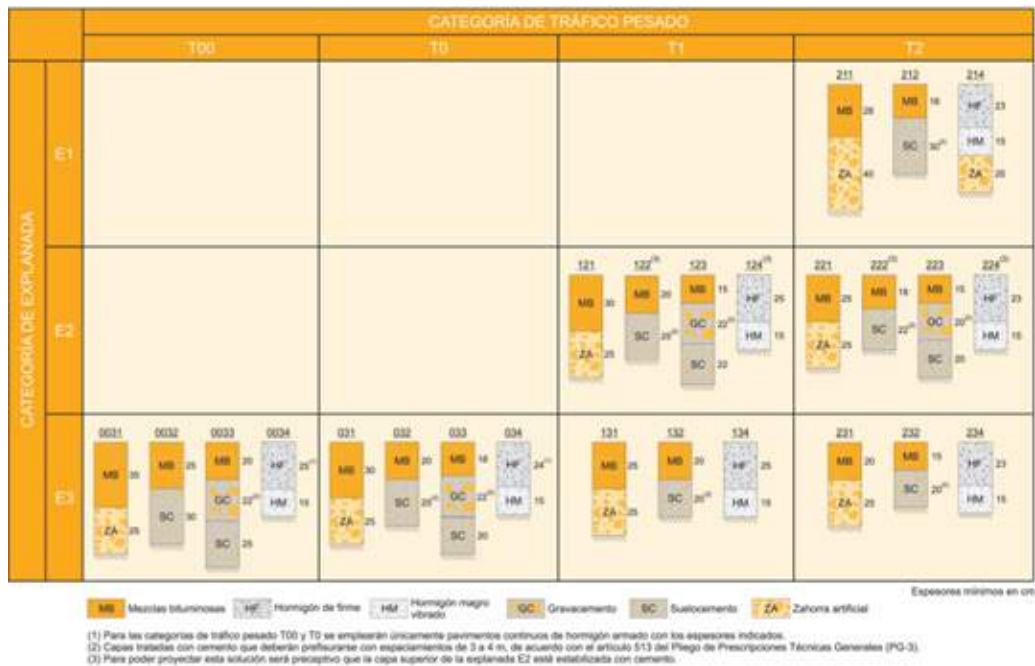


Figura 8: Catálogo de secciones de firmes para las categorías de tráfico pesado T00 a T2

Fuente: Norma 6.1.C. Secciones de firmes.

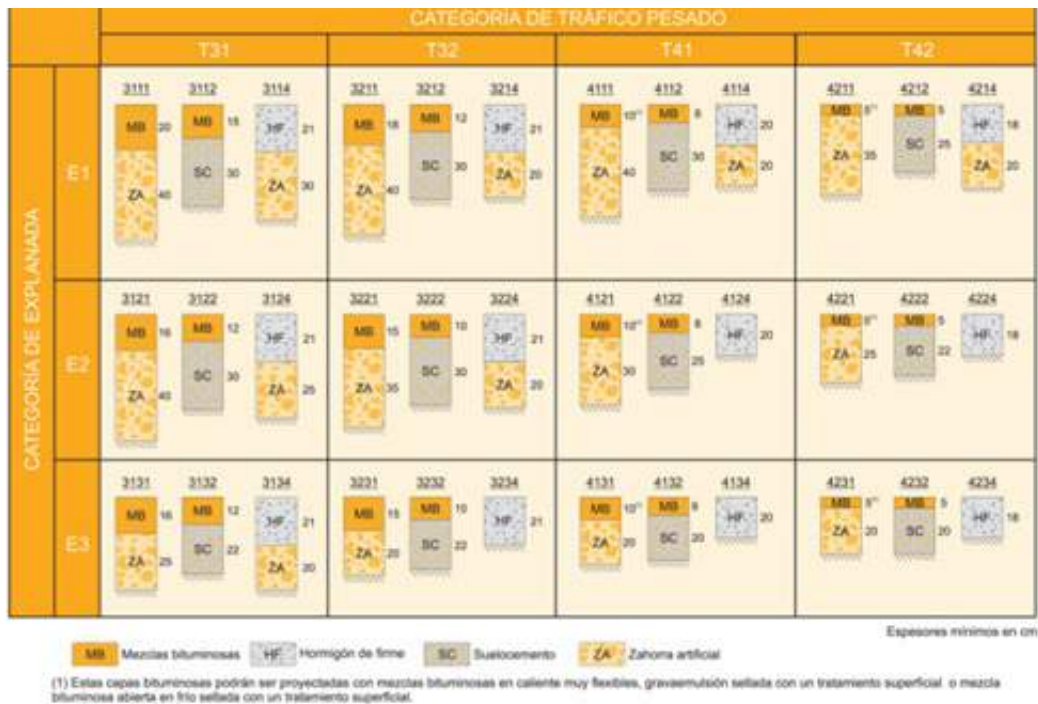


Figura 9: Catálogo de secciones de firmes para las categorías de tráfico pesado T3 a T4

Fuente: Norma 6.1.C. Secciones de firmes.



La Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD establece que se pueden utilizar firmes a base de zahorra reciclada para todas las categorías de tráfico pesados pero las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” de Castilla y León, el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” de Andalucía y la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” sólo permiten el uso de áridos reciclados en firmes flexibles o semirrígidos para categorías de tráfico de T2 a T4. Además, en las Recomendaciones de Castilla y León se restringe el uso de explanadas de baja categoría (E1) para tráficos intensos, priorizándose de esta forma la formación de explanadas de mayor calidad. Por otro lado, en la guía castellano-leonesa y andaluza, no se permite el contacto directo entre mezclas bituminosas y ZARM II por las características plásticas que presentan, siendo recomendable realizar una capa intermedia entre ambos materiales de ZARHor o ZARM I y en las capas de hormigón compactado procedente de reciclado (HCR) que estén en contacto directamente con la explanada, requerirán que la capa superior de la explanada esté tratada con cemento.

GUÍA	TIPO DE APLICACIÓN	TIPO DE ÁRIDOS RECICLADOS
Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD	Zahorra reciclada para bases, sub-bases y arcenes para tráfico T0.	ARH
	Zahorra reciclada para bases, sub-bases y arcenes para tráfico T1 y T2.	ARH, ARMh y ARMc
	Zahorra reciclada para bases, sub-bases y arcenes para tráfico T3 y T4.	ARH, ARMh, ARMc y ARMa
Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD	Zahorra reciclada para bases y sub-bases para caminos con tráfico menor a T4.	ARH, ARMh, ARMc y ARMa
	Suelocemento SC20 de aplicación en calzadas y arcenes T3 y T4.	-
	Suelocemento SC40 de aplicación en calzadas y arcenes T00 y T2.	ARH, ARMh y ARMc
	Gravacemento GC20 de aplicación en calzadas y arcenes T00 y T2.	ARH y ARMh
	Gravacemento GC25 de aplicación en calzadas y arcenes T00 y T2.	ARH, ARMh, ARMc y ARMa
	Bases para vías de tráfico T00 a T2.	ARH, ARMh y ARMc
	Capa de rodadura para vías de tráfico T3 y T4.	ARH, ARMh y ARMc
Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados	Zahorra reciclada para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	ZarHor, ZarM I y ZarM II
	Suelocemento reciclado para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	SCR
	Hormigón compactado reciclado para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	ZarHor y ZARM I

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

GUÍA	TIPO DE APLICACIÓN	TIPO DE ÁRIDOS RECICLADOS
Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's	Zahorra reciclada para bases y capas intermedias de firmes para tráfico de T22 a T4.	ZarHor, ZarM I y ZarM II
	Suelocemento reciclado para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T22 a T4.	SCR
	Hormigón compactado reciclado para bases, sub-bases y arcenes con tráfico de T22 a T4.	ZarHor y ZARM I
Anejo 5 y 8 de la Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco	Zahorra reciclada para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	AR-H
	Suelocemento reciclado para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	AR-H y AR-M
	Gravacemento reciclado para bases y capas intermedias de firmes con tráfico de T2 a T4.	AR-H

Tabla 15. Tipos de áridos reciclados a emplear en firmes según la aplicación y la guía de referencia

Fuente: GAN-NIK

A continuación, se incluyen las secciones tipo de firmes propuestas con materiales reciclados incluidas en el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” y en las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's”.

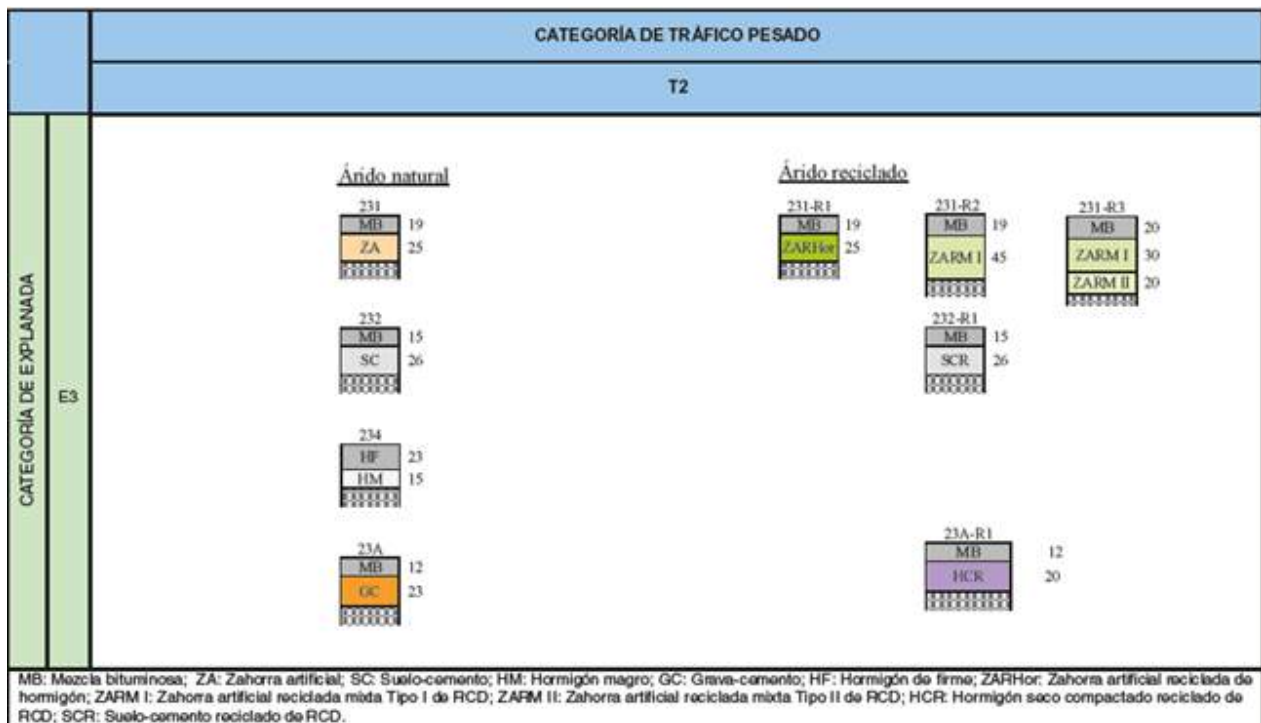


Figura 10. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T2.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)



		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO							
		T3A				T3B			
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E2	<u>Árido natural</u>		<u>Árido reciclado</u>		<u>Árido natural</u>		<u>Árido reciclado</u>	
		3121 MB 16 ZA 30	3121-R1 MB 16 ZARHor 30	3121-R2 MB 16 ZARM I 35	3121-R3 MB 16 ZARM II 20	3221 MB 12 ZA 30	3221-R1 MB 12 ZARHor 30	3221-R2 MB 12 ZARM I 35	3221-R3 MB 12 ZARM I 20 ZARM II 20
		3122 MB 12 SC 30	3122-R1 MB 12 SCR 30			3222 MB 12 SC 29	3222-R1 MB 12 SCR 29		
		3124 HF 21 ZA 25				3224 HF 21 ZA 20			
		312A MB 12 GC 24	312A-R1 MB 12 HCR 20			323A-R1 MB 10 HCR 21			

MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelo-cemento; HM: Hormigón magro; GC: Grava-cemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelo-cemento reciclado de RCD.

Figura 11. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T3.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO							
		T3A				T3B			
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E3	<u>Árido natural</u>		<u>Árido reciclado</u>		<u>Árido natural</u>		<u>Árido reciclado</u>	
		3131 MB 13 ZA 25	3131-R1 MB 13 ZARHor 25	3131-R2 MB 13 ZARM I 20	3131-R3 MB 15 ZARM I 20 ZARM II 20	3231 MB 11 ZA 20	3231-R1 MB 11 ZARHor 20	3231-R2 MB 11 ZARM I 40	3231-R3 MB 11 ZARM I 20 ZARM II 20
		3132 MB 12 SC 22	3132-R1 MB 12 SCR 22			3232 MB 10 SC 22	3232-R1 MB 10 SCR 22		
		3134 HF 21 ZA 20				3234 HF 21			
		313A MB 12 GC 22	313A-R1 MB 12 HCR 20			323A-R1 MB 10 HCR 20			

MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelo-cemento; HM: Hormigón magro; GC: Grava-cemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelo-cemento reciclado de RCD.

Figura 12. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T3.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

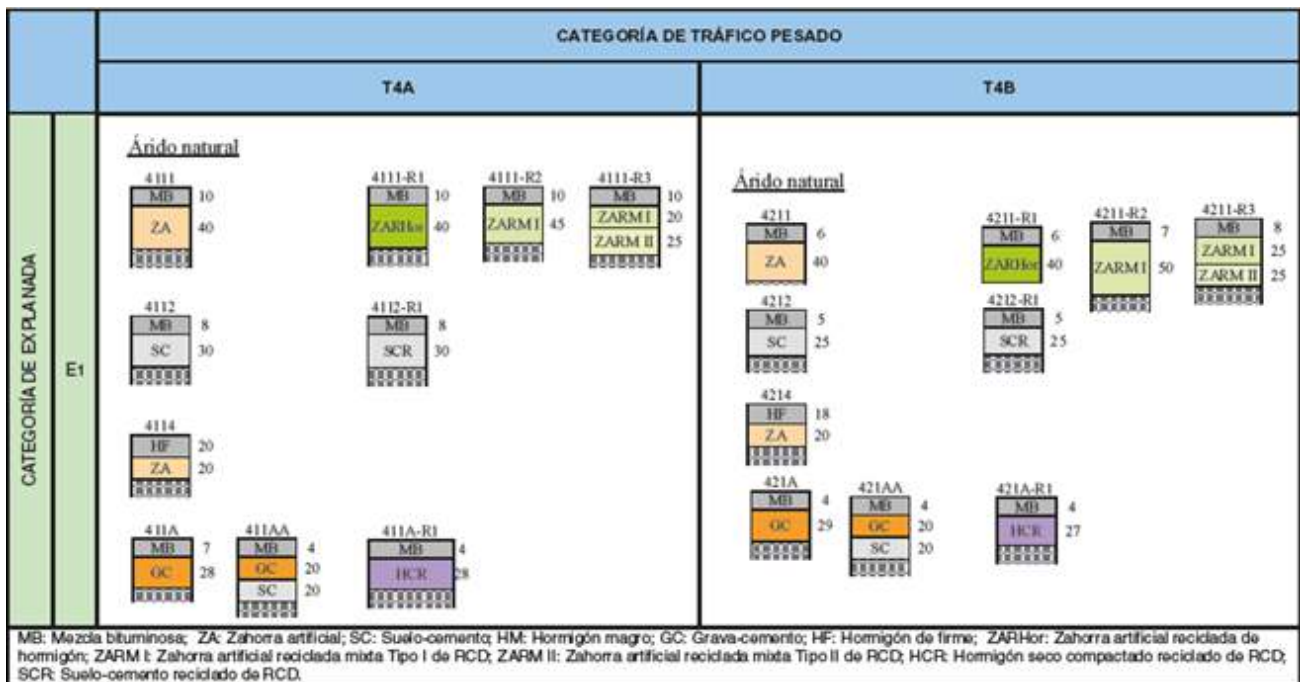


Figura 13. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E1 y tráfico T4.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

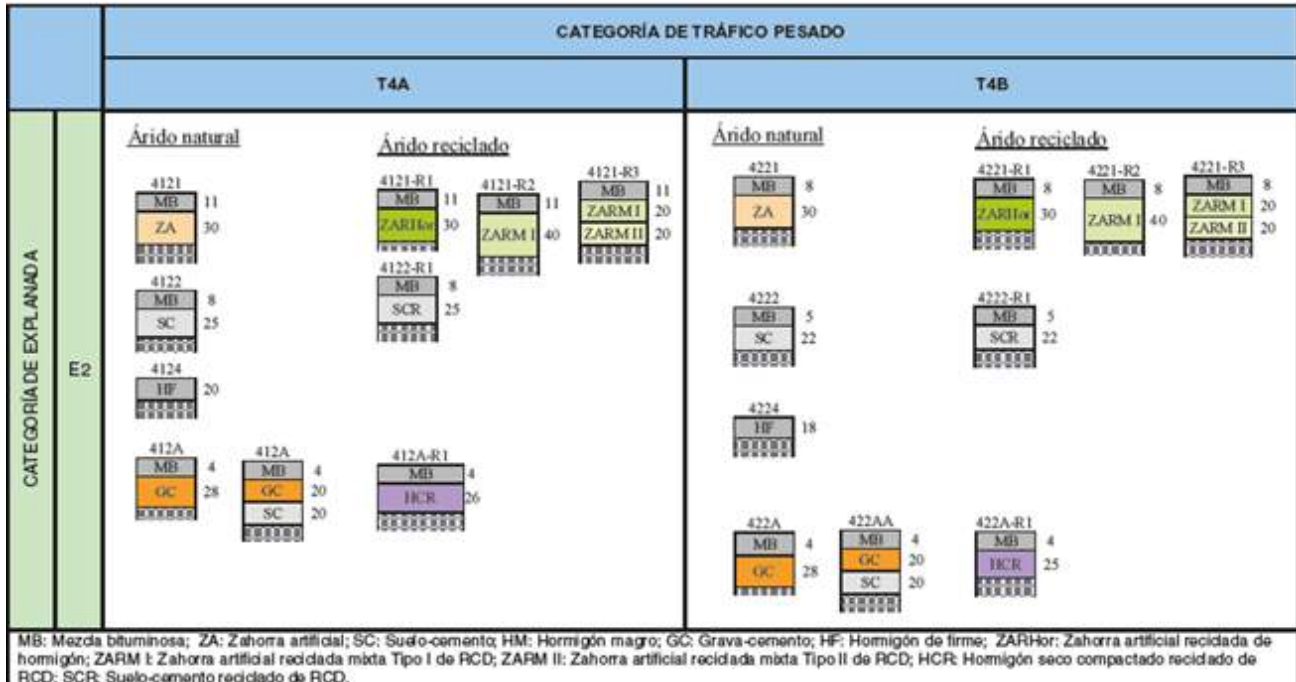


Figura 14. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T4.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

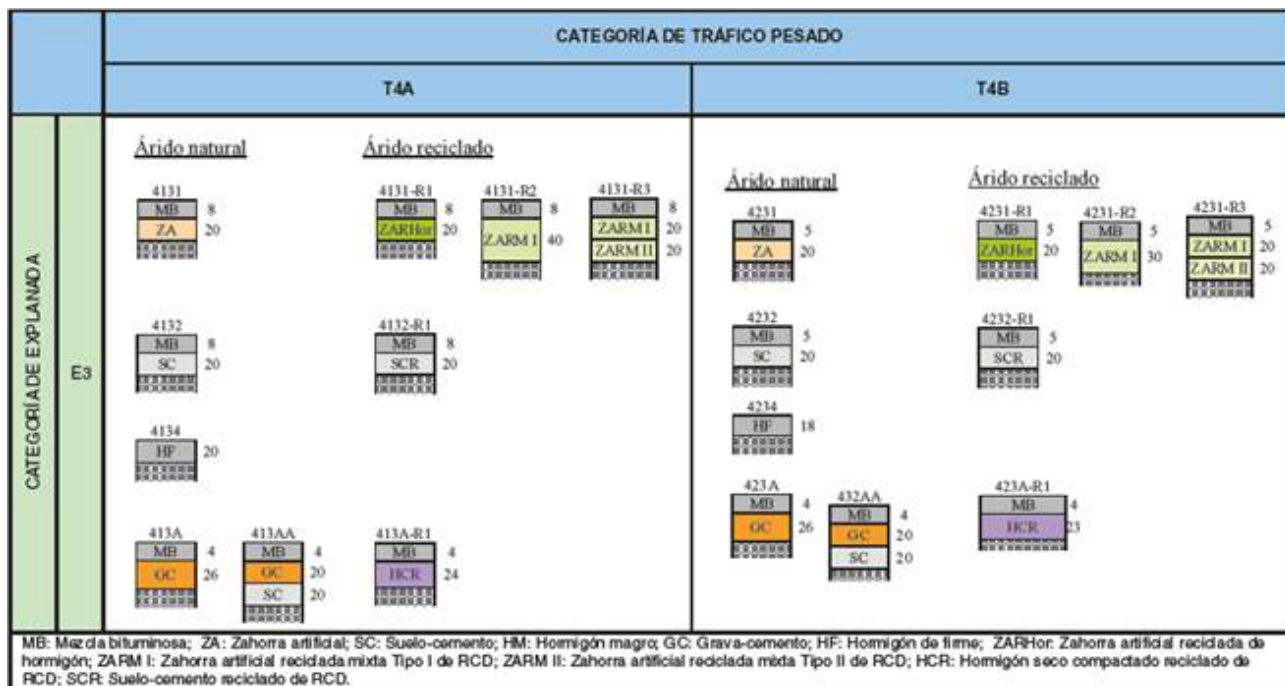


Figura 15. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T4.

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

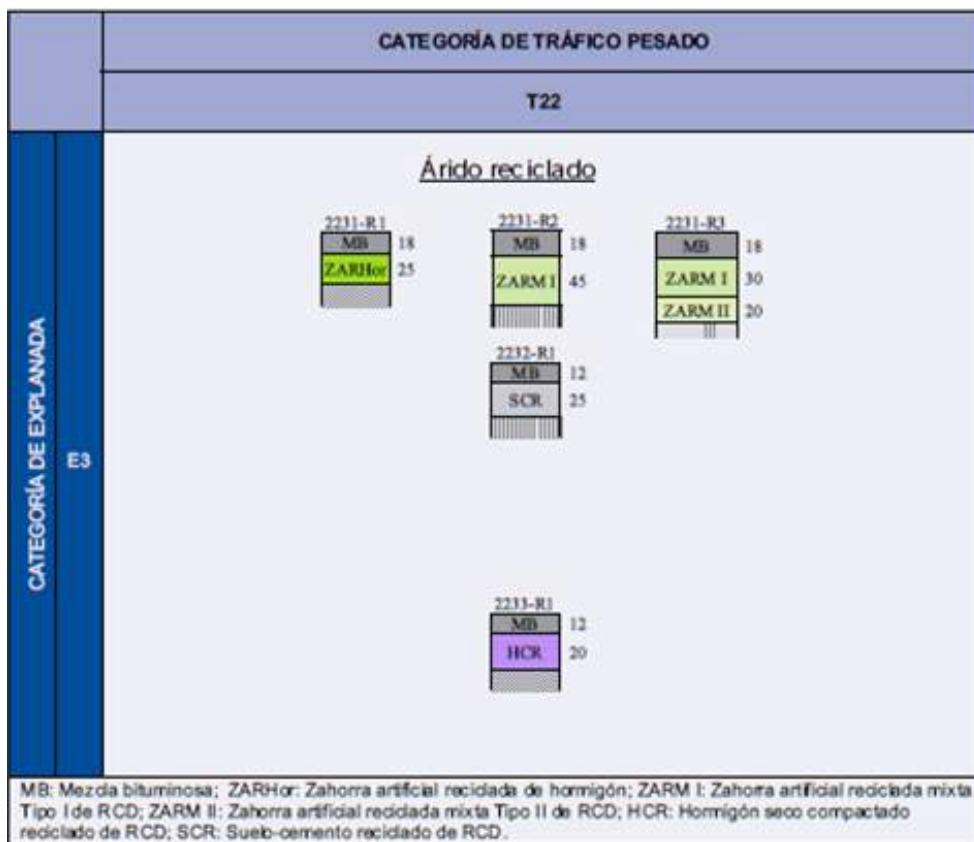


Figura 16. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T22.

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's

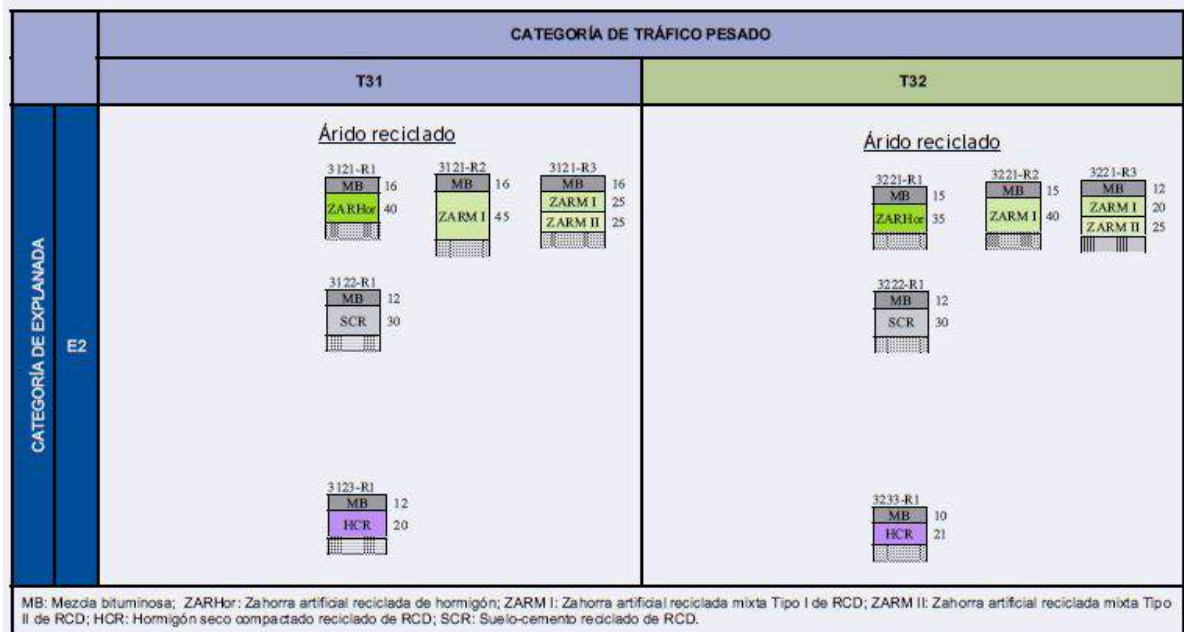


Figura 17. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E2 y tráfico T31 y T32.

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's.

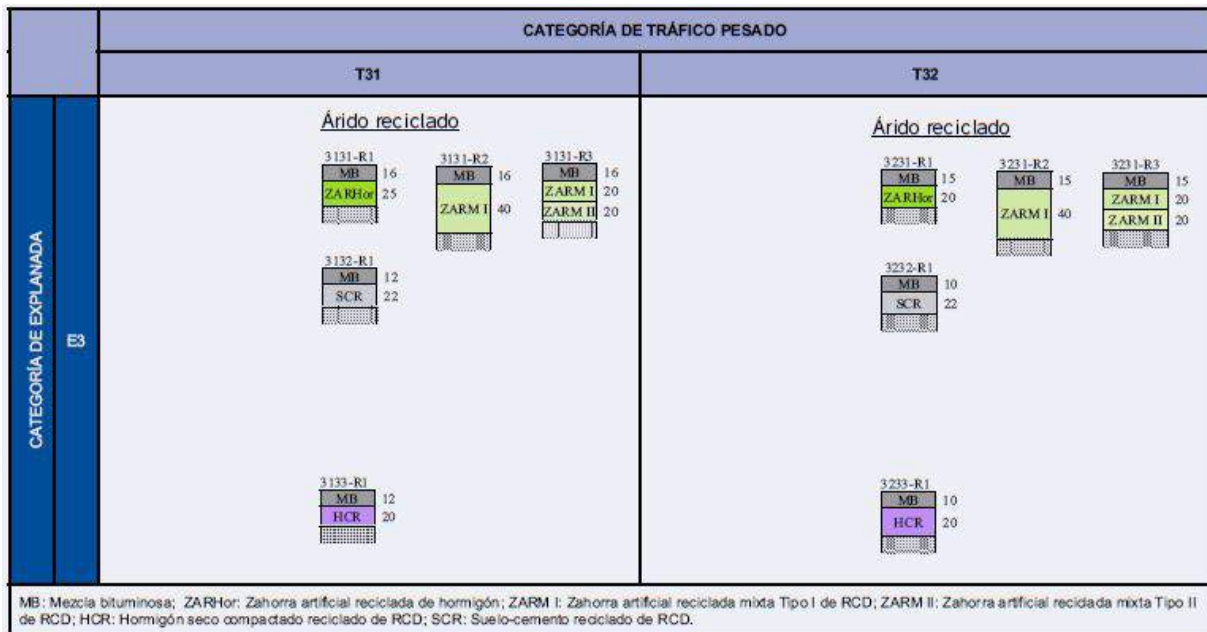


Figura 18. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T31 y T32.

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's.

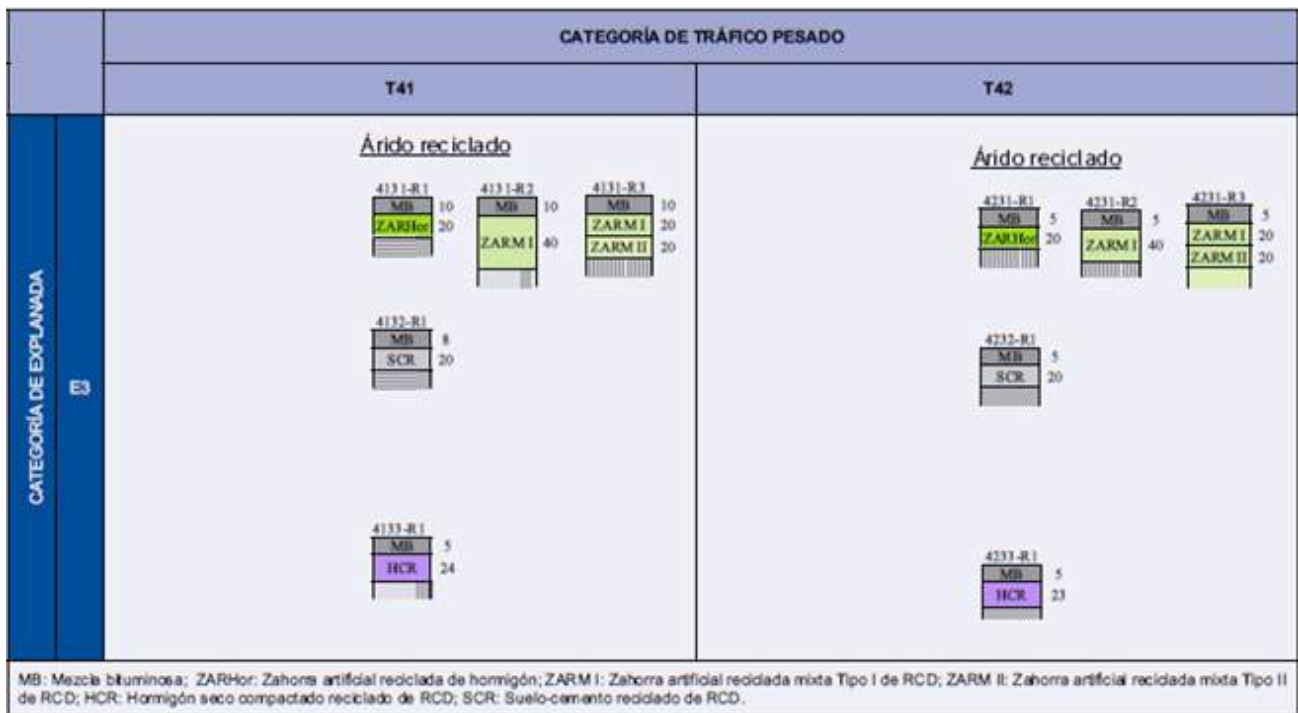


Figura 19. Tipos de secciones con materiales reciclados para firmes con explanada E3 y tráfico T41 y T42.

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's

Además, tanto el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” como las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's” incluyen secciones tipo para explanadas con áridos reciclados como se observa en las siguientes figuras.

La Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD establece que se pueden utilizar firmes a base de zahorra reciclada para todas las categorías de tráfico pesados pero las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's” de Castilla y León, el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” de Andalucía y la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” sólo permiten el uso de áridos reciclados en firmes flexibles o semirrígidos para categorías de tráfico de T2 a T4. Además, en las Recomendaciones de Castilla y León se restringe el uso de explanadas de baja categoría (E1) para tráficos intensos, priorizándose de esta forma la formación de explanadas de mayor calidad. Por otro lado, en la guía castellano-leonesa y andaluza, no se permite el contacto directo entre mezclas bituminosas y ZARM II por las características plásticas que presentan, siendo recomendable realizar una capa intermedia entre ambos materiales de ZARHor o ZARM I y en las capas de hormigón compactado procedente de reciclado (HCR) que estén en contacto directamente con la explanada, requerirán que la capa superior de la explanada esté tratada con cemento.

A continuación, se incluyen las secciones tipo de firmes propuestas con materiales reciclados incluidas en el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados” y en las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's”.



2.2.3. Materiales

Los materiales a emplear en las explanadas, los firmes, los rellenos tipo terraplén y los rellenos localizados deben cumplir las indicaciones que se numeran en el **“Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3”**. Sin embargo, en los artículos del Pliego se indica que el Pliego de Prescripciones Particulares, o en su defecto la Dirección de Obra, puede exigir prescripciones o propiedades adicionales a los que figuran en cada artículo cuando la naturaleza o procedencia del árido así lo requiera. Estas propiedades deberán ser acreditadas mediante ensayos. Además, en el caso de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se deberá aportar documento acreditativo de su origen, de la idoneidad de

2.2.3. Materiales

Los materiales a emplear en las explanadas, los firmes, los rellenos tipo terraplén y los rellenos localizados deben cumplir las indicaciones que se numeran en el **“Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3”**. Sin embargo, en los artículos del Pliego se indica que el Pliego de Prescripciones Particulares, o en su defecto la Dirección de Obra, puede exigir prescripciones o propiedades adicionales a los que figuran en cada artículo cuando la naturaleza o procedencia del árido así lo requiera. Estas propiedades deberán ser acreditadas mediante ensayos. Además, en el caso de los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se deberá aportar documento acreditativo de su origen, de la idoneidad de sus características para el uso propuesto, que han sido debidamente tratados y que no se encuentran mezclados con otros contaminantes.

Sobre las especificaciones concretas para condiciones de áridos reciclados nos centraremos en estas guías:

- ✓ Guía de Áridos Reciclados procedentes de RCD.
- ✓ Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)
- ✓ Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's.
- ✓ Especificaciones incluidas en el anejo 5 y anejo 6 de la Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco.

2.2.3.1. Explanadas

En el caso de la formación de secciones de explanadas, ver apartado 2.2.2 de este documento, se pueden emplear diferentes materiales cuyas especificaciones vienen en el PG-3 tal y como se establece en la tabla 16.



CLASIFICACIÓN DE MATERIALES	ARTÍCULO DE REFERENCIA DEL PG-3
Marginal	330
Tolerable	330
Adecuado	330
Seleccionado	330
Estabilizado in situ	512
Hormigón	610

Tabla 16. Artículos de referencia en función del tipo de material a utilizar en explanadas

Fuente: GAN-NIK

Respecto al suelo estabilizado in situ con cemento o cal queda fuera del alcance del objetivo de este documento por lo que no se analiza su contenido. El artículo 610 del PG-3 sobre hormigón establece que los áridos deben cumplir las prescripciones indicadas en la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08, que en un futuro será el Código Estructural, y, por tanto, deberá cumplir lo especificado en el apartado 2.1 de este documento.

El artículo 330 del PG-3, **terraplenes**, permite el uso tanto de suelos naturales, de productos procedentes de procesos industriales como de manipulación humana, siempre que cumplan las características físico-químicas especificadas en dicho artículo para garantizar la estabilidad presente y futura del conjunto. Los materiales a emplear en terraplenes deben cumplir alguna de estas dos condiciones:

- ✓ Cernido, o material que pasa, por el tamiz 20 UNE mayor del 70 por 100 por ciento ($\# 20 > 70\%$), según UNE 103101.
- ✓ Cernido o material que pasa, por el tamiz 0,080 UNE mayor o igual del treinta y cinco por ciento ($\# 0,080 \geq 35\%$), según UNE 103101.

Además, dependiendo de las diferentes propiedades que se adjuntan en la siguiente tabla, los materiales se clasifican en:

PROPIEDAD	ENSAYO	LÍMITES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MATERIAL			
		SUELO MARGINAL	SUELO TOLERABLE	SUELO ADECUADO	SUELO SELECCIONADO*
Materia Orgánica (MO)	UNE 103204	< 5%	< 2%	< 1%	< 0,2%
Sales solubles (SS)	NLT 114	-	< 1% (excluido el yeso)	< 0,2% (incluido el yeso)	< 0,2% (incluido el yeso)
	NLT 115	-	Yeso < 5%		
Tamaño máximo del árido (D_{max})	UNE 103101	-	-	≤ 100 mm	≤ 100 mm
Cernido de tamiz	UNE 103101	-	-	#2 < 80% y #0,080 < 35%	# 0,40 ≤ 15

Continua en página siguiente



Viene de página anterior

PROPIEDAD	ENSAYO	LÍMITES EN FUNCIÓN DEL TIPO DE MATERIAL			
		SUELO MARGINAL	SUELO TOLERABLE	SUELO ADECUADO	SUELO SELECCIONADO*
Límite líquido (LL)	UNE 103103	-	LL < 65	LL < 40	-
Índice de Plasticidad (IP)	UNE 103104	Si LL > 90, IP < 0,73 (LL-20)	Si LL > 40, IP > 0,73 (LL-20)	Si LL > 30, IP > 4	-
Hinchamiento libre	UNE 103601	< 5%	< 3%	-	-
Asiento en ensayo de colapso	NLT 254	-	< 1%	-	-

* También se considera suelo seleccionado si se cumplen todas estas condiciones:

Cernido por el tamiz 2 UNE, menor del ochenta por ciento (# 2 < 80%).

Cernido por el tamiz 0,40 UNE, menor del setenta y cinco por ciento (# 0,40 < 75%).

Cernido por el tamiz 0,080 UNE inferior al veinticinco por ciento (# 0,080 < 25%).

Límite líquido menor de treinta (LL < 30), según UNE 103103.

Índice de plasticidad menor de diez (IP < 10), según UNE 103103 y UNE 103104.

Tabla 17. Características para la clasificación de los materiales para conformar terraplenes

Fuente: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3

Comparando estas especificaciones con las establecidas en las guías de referencia sobre áridos reciclados se observa que se establecen los mismos criterios a excepción del contenido de materia orgánica y sales solubles, cuyos valores son menos restrictivos. El contenido de sales solubles y yesos puede derivar a problemas de estabilidad del terraplén ya que puede originar la disolución de material por la penetración de agua, conllevando a la aparición de colapsos. Por ello, la “Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición” recomienda un valor de yesos admisibles aproximado al 3% y realizar ensayos de colapso (NLT 254) e hinchamiento (UNE 103601) en los áridos que superen los límites de sales solubles y yesos para verificar si hay colapso o no.



PARÁMETRO	TIPO DE MATERIAL	GUÍA DE REFERENCIA			
		Guía de áridos reciclados procedentes de RCD	Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de RCD	Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's	Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco (Anejo 5)
Contenido de OTRAS SALES SOLUBLES, según NLT 114	S u e l o s seleccionados	< 0,2% (sales y yeso) ó < 1%, si el contenido en yeso es <1.	< 2%.	< 2%.	< 0,7% ²
	S u e l o s adecuados	< 0,2% (sales y yeso) ó < 1%, si el contenido en yeso es <1.	-	< 2%.	-
	S u e l o s tolerables	< 2%.	< 4%.	<4%.	-
	S u e l o s marginales	-	-	-	-
Contenido de YESO, según NLT 115	S u e l o s seleccionados	< 0,2% (sales y yeso) ó < 1%, si el contenido en yeso es <1.	< 2%.	< 2%.	-
	S u e l o s adecuados	< 0,2% (sales y yeso) ó < 1%, si el contenido en yeso es <1.	-	< 2%.	-
	S u e l o s tolerables	< 5%.	<5%.	<5%.	-
	S u e l o s marginales	-	-	-	-

Continúa en página siguiente



Viene de página anterior

PARÁMETRO	TIPO DE MATERIAL	GUÍA DE REFERENCIA			
		Guía de áridos reciclados procedentes de RCD	Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de RCD	Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's	Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco (Anejo 5)
MATERIA ORGÁNICA, según UNE 103204	S u e l o s seleccionados	< 0,2 ó < 2 para ARMa	Procedente de tierras de excavación: < 0,2%.	Procedente de tierras de excavación: < 0,2%.	≤ 0,2% ¹
			Procedentes de RCD: < 1%.	Procedentes de RCD: < 1%.	
			Procedente de bituminoso: < 2%.	Procedente de bituminoso: < 2%.	
	S u e l o s adecuados	< 1 ó < 3 para ARMa	-	Procedente de tierras de excavación: < 1%.	-
			-	Procedentes de RCD: < 1%.	
S u e l o s tolerables	< 1 ó < 3 para ARMa	< 2%.	< 2%.	-	
S u e l o s marginales	< 5	-	-	-	
Pérdida en el ensayo de sulfato de magnesio UNE-EN 1367-2	S u e l o s seleccionados	-	-	-	≤ 18%

¹ Si es mayor a 0,2% se realizará un ensayo de equivalente de arena considerándose aceptable si su valor es superior a 30.

² El ensayo de referencia será el UNE-EN 1744-1 y cuando los materiales estén en contacto con capas tratadas con cemento no podrá ser superior a 0,2.

Tabla 18. Especificaciones químicas para empleo de suelos reciclados según las guías de referencia sobre áridos reciclados

Fuente: Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco.



En el caso de explanadas, la Norma 6.1. I.C. Secciones de firmes establece unas prescripciones complementarias:

- ✓ El empleo de suelos inadecuados sólo será posible si se estabiliza con cal o cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2. En estos casos, el espesor mínimo será de 25 centímetros y el máximo de 30 centímetros.
- ✓ Los suelos tolerables deberán cumplir lo siguiente:



- $CBR \geq 3$.
 - Contenido de Materia Orgánica $< 1\%$.
 - Contenido de sulfatos solubles (SO_3) $< 1\%$.
 - Hinchamiento libre $< 1\%$.
- ✓ Los suelos adecuados, en general, deberán tener un $CBR \geq 5$. En el caso de emplearse para las capas superiores de la explanada deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, $CBR \geq 6$. Además, en el caso de formación de explanadas de categoría E1 sobre suelos adecuados se deberá exigir un CBR mínimo de 6.
 - ✓ Los suelos seleccionados deberán tener:
 - Tipo 2 (ver figura 5). $CBR \geq 10$. En el caso de emplearse para las capas superiores de la explanada deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, $CBR \geq 12$. Además, en el caso de formación de explanadas de categoría E2 sobre suelos seleccionados se deberá exigir un CBR mínimo de 12.
 - Tipo 3 (ver figura 5). $CBR \geq 20$.

Para explanadas, el CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas.



En el caso de terraplenes, se debe cumplir una serie de requisitos en función de la parte de la estructura que se vaya a conformar (ver figura 20). De forma general, salvo especificaciones concretas en los Pliegos de Prescripciones Particulares, los materiales a emplear deberán cumplir las siguientes especificaciones para terraplenes:

- ✓ Coronación: Suelos seleccionados o adecuados con $CBR \geq 5$, según el ensayo UNE 103502. Queda excluido el uso de suelos expansivos o colapsables.
- ✓ Núcleo: Suelos tolerables, adecuados o seleccionados con $CBR \geq 3$, según el ensayo UNE 103502. La utilización de suelos marginales o de suelos con índice $CBR < 3$ puede venir condicionada por problemas de resistencia, deformabilidad y puesta en obra, por lo que su empleo queda desaconsejado y en todo caso habrá de justificarse mediante un estudio especial, aprobado por el Director de las Obras. Lo mismo ocurre con el empleo de suelos colapsables, expansivos, con yesos, con otras sales solubles, con materia orgánica o de cualquier otro tipo de material marginal.
- ✓ Cimiento: Suelos tolerables, adecuados o seleccionados siempre que las condiciones de drenaje o estanqueidad lo permitan, que las características del terreno de apoyo sean adecuadas para su puesta en obra y siempre que el índice CBR, correspondiente a las condiciones de compactación de puesta en obra, sea igual o superior a tres ($CBR \geq 3$), según UNE 103502.
- ✓ Espaldón: Se usarán materiales que satisfagan las condiciones que defina el Proyecto en cuanto a impermeabilidad, resistencia, peso estabilizador y protección frente a la erosión. Queda excluido el uso de suelos expansivos o colapsables.

En resumen, los índices CBR que se podrían exigir en función del uso serían:

USO ESPECÍFICO		CBR (%), según UNE 103502 ¹		
		Suelos adecuados	Suelos tolerables	
Explanadas		$\geq 10^2$ ó $\geq 20^3$	$\geq 5^4$	≥ 3
Terraplenes	Coronación	≥ 5	≥ 5	-
	Núcleo	≥ 3	≥ 3	≥ 3
	Cimiento	≥ 3	≥ 3	≥ 3
Rellenos localizados (Artículo 332 del PG-3)		> 10 ó >20 (para trasdós de obra de fábrica)	> 10 ó >20 (para trasdós de obra de fábrica)	-

1 En el País Vasco, el índice CBR se deberá verificar según la norma UNE-EN 13286-47.

2 En el caso de emplearse para las capas superiores de la explanada deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, $CBR \geq 12$. Además, en el caso de formación de explanadas de categoría E2 sobre suelos seleccionados se deberá exigir un CBR mínimo de 12.

3 En el País Vasco existen secciones donde el suelo seleccionado debe alcanzar índices $CBR \geq 40$.

4 En el caso de emplearse para las capas superiores de la explanada deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, $CBR \geq 6$. Además, en el caso de formación de explanadas de categoría E1 sobre suelos adecuados se deberá exigir un CBR mínimo de 6.

Tabla 19. Requisitos sobre el índice CBR

Fuente: Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3, Norma 6.1 I.C, Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco



2.2.3.2. Firmes

Para todos los materiales de firmes se deberán cumplir las especificaciones indicadas a continuación, sin perjuicio de lo establecido en el Reglamento 305/2011 de 9 de marzo de 2011, del Parlamento Europeo y del Consejo, por el que se establecen las condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción. En la tabla adjunta se muestra una relación de los materiales posibles a emplear con los artículos de referencia del Pliego de Prescripciones Generales PG-3:

MATERIAL DE COMPOSICIÓN DEL FIRME	ARTÍCULO DE REFERENCIA DEL PG-3
Mezclas bituminosas	540/ 542/ 543
Pavimentos de hormigón	550
Hormigón magro vibrado	551
Zahorra	510
Suelos estabilizados in situ	512
Suelocemento o gravacemento	513

Tabla 20. Artículos de referencia en función del material a emplear en la ejecución del firme

Fuente: GAN-NIK

Aparte de las especificaciones del PG-3, existen ciertas particularidades incluidas en la norma 6.1 I.C Secciones de Firmes para cada material y que se desarrollarán en los siguientes apartados. A parte de estos materiales, para la formación de firmes es necesario, en ocasiones, otros materiales como los riegos bituminosos (Artículos 530, 531 y 532 del PG-3) aunque no se desarrollarán en este documento.

En el caso de las mezclas bituminosas, según el artículo 542 del PG-3, se puede emplear áridos reciclados procedente del fresado o de la trituración de capas de mezclas bituminosas en la elaboración de capas base e intermedias de mezclas tipo hormigón bituminoso. El uso de esta tipología de RCD es utilizada en rehabilitación superficial o estructural de firmes cuyas especificaciones se disponen en **la “Norma 6.3 IC de Rehabilitación de firmes”** basándose en las indicaciones del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) o del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras y Puentes (PG-4). Los estudios que se han realizado sobre empleo de áridos reciclados procedentes de hormigón o mixtos en mezclas bituminosas han concluido que por sus características conllevan una mayor demanda de betún y, por tanto, puede ser que ya no sea tan sostenible utilizar material reciclado. Por tanto, en proyectos experimentales que se haga para ello se propone realizar un cálculo sostenible evaluando los beneficios que conllevaría el uso de árido reciclado y el perjuicio del aumento de betún pudiendo ser un uso potencial. Dentro de este documento, no se van a detallar las características técnicas ni ambientales de las mezclas bituminosas.

Pavimentos de hormigón y hormigón magro vibrado

Las **capas realizadas con hormigón** deberán cumplir las prescripciones establecidas en la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08 o del Código Estructural en un futuro, incluidas en el apartado 2.1



de este documento, y las adicionales indicadas en el PG-3 o Norma 6.1 I.C. Concretamente, para los **pavimentos de hormigón** se debe cumplir lo especificado en el artículo 550 del PG-3 y las prescripciones complementarias del apartado 6.2.3 de la Norma 6.1 I.C. Sin embargo, para el caso del **hormigón magro vibrado** se deben seguir exclusivamente las especificaciones del artículo 551 del PG-3. La elección del cemento deberá estar especificada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, por el Director de las Obras. También se deberá fijar el principio de fraguado, bajo la norma UNE-EN 196-3, que, en todo caso, no podrá tener lugar antes de los 100 minutos. La clase resistente del cemento será, salvo justificación en contrario, la 32,5N o la 42,5N. El Director de las Obras podrá autorizar el empleo de un cemento de clase resistente 42,5R en épocas frías. No se emplearán cementos de aluminato de calcio, ni mezclas de cemento con adiciones que no hayan sido realizadas en instalaciones de fabricación específicas. En el caso de pavimentos de hormigón, la utilización de cementos pòrtland con caliza (CEM II/A-L, CEM II/B-L, CEM II/A-LL y CEM II/B-LL) se limitará a la capa inferior de pavimentos bicapa.

En el caso de los áridos, tanto para la capa inferior de pavimentos bicapa de hormigón como para el hormigón magro vibrado, se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en los artículos correspondientes del PG-3 dependiendo del material, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

En términos generales, los áridos no serán susceptibles ante ningún tipo de meteorización o alteración físico-química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en la zona de empleo. Se deberá garantizar tanto la durabilidad a largo plazo, como que no darán origen, con el agua, a disoluciones que puedan dañar a estructuras u otras capas del firme, o contaminar corrientes de agua. Tampoco serán reactivos con el cemento, ni contendrán sulfuros oxidables, sulfato cálcico o compuestos ferrosos inestables, que puedan originar fenómenos expansivos en la masa del hormigón. Por ello, en materiales en los que, por su naturaleza, no exista suficiente experiencia sobre su comportamiento, deberá hacerse un estudio especial sobre su aptitud para ser empleado, que tendrá que ser aprobado por el Director de las Obras.

Para pavimentos de hormigón, dentro de la norma 6.1 I.C, se especifica diferentes condiciones en función el tipo de hormigón a emplear y la categoría de tráfico pesado. En modo resumen, serían las especificadas en la tabla siguiente:

- ✓ Para firmes de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T2 se utilizará hormigón tipo HF-4,5.
- ✓ Para las categorías T1 y T2 podrá emplearse HF-4,0 incrementando en 2 cm los espesores indicados por el Catálogo de secciones de firme (figura 8 de este documento).
- ✓ Para firmes de carreteras con categoría de tráfico pesado T1 y T2 el pavimento será de hormigón en masa, con juntas provistas de pasadores. Si se justificase su conveniencia por razones



Viene de la página antrtiot

técnicas o económicas, para firmes de carreteras con categoría de tráfico pesado T1 podrá también emplearse pavimento continuo de hormigón armado, permitiendo una reducción de hasta 4 cm en los espesores establecidos en el Catálogo de secciones de firme (figura 8 de este documento).

- ✓ Para los firmes de carretera con categoría de tráfico pesado T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42) o eventualmente en arcenes, el pavimento será de hormigón en masa, con juntas sin pasadores. Para estas categorías de tráfico pesado se utilizará hormigón tipo HF-4,0, aunque también podrá utilizarse el HF-3,5 incrementando en 2 cm los espesores dados por el Catálogo de secciones de firme (figura 9 de este documento).
- ✓ La cuantía geométrica del pavimento continuo de hormigón armado será del 0,7% para HF-4,5 y del 0,6% para HF-4,0. Asimismo en este tipo de pavimentos se dispondrán anclajes al terreno en las secciones extremas, así como en las secciones especiales que lo requieran.

Dentro de los artículos correspondientes del PG-3, se determinan las características para áridos gruesos, definidos como la parte del **árido total retenida en el tamiz 4 mm de la norma UNE-EN 933-2**, y áridos finos, correspondiente a la parte del árido total cernida por el tamiz 4 mm de la norma UNE-EN 933-2, que se resumen en las siguientes tablas:

REQUISITO PARA EL ÁRIDO GRUESO	NORMA DEL ENSAYO	PAVIMENTO DE HORMIGÓN (Artículo 550 del PG-3)		HORMIGÓN MAGRO VIBRADO (Artículo 551 del PG-3)
		CARACTERÍSTICAS GENERALES	CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS PARA CAPAS EXPUESTAS DIRECTAMENTE AL TRÁFICO	
Tamaño máximo de árido	UNE-EN 933-1	< 40 mm y < ¼ del espesor de la capa. En capas de hormigón armado continuo: < ¼ de la distancia libre entre armaduras longitudinales.	< 12 mm	< 40 mm
Coefficiente de Los Ángeles (LA)	UNE-EN 1097-2	Árido natural: LA < 35 Árido artificial, siderúrgico o reciclado: LA < 40	Categoría de tráfico T00: LA < 20 Categoría de tráfico T0 y T1: LA < 25	Árido natural: LA < 35 Árido artificial, siderúrgico o reciclado: LA < 40

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

REQUISITO PARA EL ÁRIDO GRUESO	NORMA DEL ENSAYO	PAVIMENTO DE HORMIGÓN (Artículo 550 del PG-3)		HORMIGÓN MAGRO VIBRADO (Artículo 551 del PG-3)
		CARACTERÍSTICAS GENERALES	CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS PARA CAPAS EXPUESTAS DIRECTAMENTE AL TRÁFICO	
Índice de lajas (FI)	UNE-EN 933-3	FI < 35	Categoría de tráfico T00: FI < 20 Categoría de tráfico T0 y T1: FI < 25	FI < 35
Ensayo de sulfato de magnesio (MS)	UNE-EN 1367-2	En carreteras sometidas a heladas con un valor de la absorción (norma UNE-EN 1097-6) es superior al 1%: MS < 15%		-
Proporción de partículas	UNE-EN 933-5	-	Trituradas: ≥ 90% Totalmente redondeadas: < 1%	-
Coefficiente de pulimento acelerado (PSV) a emplear en la capa superior	UNE-EN 1097-8	-	Categoría de tráfico T00 y T0: PSV ≥ 56 Categoría de tráfico T1: PSV ≥ 50	-

Tabla 21. Prescripciones para el árido grueso en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado

Fuente: Extracto de los artículos 550 y 551 del Pliego de Prescripciones Técnicas

REQUISITO PARA EL ÁRIDO FINO	NORMA DEL ENSAYO	ÁRIDO FINO	
		PAVIMENTO DE HORMIGÓN	HORMIGÓN MAGRO VIBRADO
Valor del equivalente de arena (SE_4) del árido fino	Anexo A de la norma UNE-EN 933-8	General: $SE_4 \geq 70$ Frente a heladas: $SE_4 \geq 75$	
Cernido acumulado por el tamiz 0,063 mm	-	-	≤ 8%
Proporción de partículas silíceas	UNE-EN 932-3 o NLT-371	Pavimentos de una sola capa: ≥ 35%, y PSV > 50 para tráfico pesado T00 a T1. Resto de casos: ≥ 30% y PSV > 44.	-

Tabla 22. Prescripciones para el árido fino en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado

Fuente: Extracto de los artículos 550 y 551 del Pliego de Prescripciones Técnicas

Se destaca que en ambos artículos el árido fino recomendado es arena natural rodada. La curva granulométrica para árido fino, según la norma UNE-EN 933-1, en pavimentos de hormigón con categoría de tráfico pesado de T00 a T2 y en hormigones magro vibrado tendrán límites muy similares:



ABERTURA DE TAMIZ (mm) SEGÚN UNE- EN 933-2	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (% en masa)	
	PAVIMENTO DE HORMIGÓN	HORMIGÓN MAGRO VIBRADO
4	81-100	81-100
2	58-85	58-85
1	39-68	39-68
0,5	21-46	21-46
0,25	7-22	7-22
0,125	1-8	1-8
0,063	0-4*	0-6

* Este límite puede ampliarse hasta el 6% para categorías de tráfico pesado T3 y T4, o en la capa inferior de los pavimentos de doble capa, si se cumple lo establecido respecto a composición de los hormigones en la vigente normativa y si se demuestra mediante un estudio específico, que las propiedades relevantes del hormigón fabricado con ese árido fino, son al menos iguales que las de los hormigones con los mismos componentes, pero sustituyendo la arena por una que cumpla el uso.

Tabla 23. Curva granulométrica para el árido fino en pavimentos de hormigón o hormigón magro vibrado

Fuente: Extracto de los artículos 500 y 501 del Pliego de Prescripciones Técnicas

El “Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” y las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” incluye especificaciones para hormigones secos compactados elaborados con áridos reciclados. La resistencia a compresión de este hormigón, comprobado bajo la norma UNE 12390-3, debe ser ≥ 10 MPa. La “Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición” establece criterios para hormigón reciclado compactado con rodillo. Los husos granulométricos son los siguientes:

ABERTURA DE TAMIZ (mm) SEGÚN UNE- EN 933-2	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (% en masa)	
	CATÁLOGO DE FIRMES Y RECOMENDACIONES DE USO	GUIÁ DE ÁRIDOS RECICLADOS
50	100	100
40	100	100
32	100	100
25	100	90-100
20	100	78-100
16	-	67-100
12,5	85-100	55-85
8	52-78	44-68
4	36-58	28-51
2	30-47	19-39
0,5	16-27	7-22
0,063	9-19	1-7

Tabla 24. Huso granulométrico para el árido reciclado en hormigón seco compactado

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s y Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición



En el caso de la Guía se añade alguna especificación adicional para el árido grueso a las establecidas en el PG-3 resumidas estos requisitos en la tabla 25.

REQUISITO PARA EL ÁRIDO GRUESO	NORMA DEL ENSAYO	LÍMITES
Índice de lajas	UNE-EN 933-3	Para T00-T2: $\leq 30\%$ Para T3-T4: $\leq 35\%$
Absorción de agua	UNE EN 1097-6	$\leq 10\%$
Coefficiente de los Ángeles	UNE-EN 1097-2	Para T00 a T2: $\leq 35\%$ Para T3-T4: $\leq 40\%$
Coefficiente de limpieza	NLT 172/86	$\leq 2\%$
Materia orgánica	UNE 103204	$\leq 1\%$
Compuestos de azufre	UNE-EN 1744-1	$\leq 1\%$
Sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1	$\leq 0,8\%$
Sulfatos oxidables	UNE-EN 1744-1	No debe contener
Compuestos solubles en agua	UNE-EN 1744-1	$\leq 1\%$

Tabla 25. Requisitos adicionales para árido grueso en hormigones compactados con vibrados

Fuente: Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición

Zahorra

Para las categorías de tráfico pesado T2 a T4 se podrán utilizar materiales granulares reciclados, áridos reciclados de residuos de construcción y demolición, áridos siderúrgicos, subproductos y productos inertes de desecho, en cumplimiento del Acuerdo de Consejo de Ministros de 26 de diciembre de 2008, por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015, siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas en el artículo 510 del PG-3, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Todas las guías de referencia para este documento sobre áridos reciclados mantienen el criterio de limitar el uso de áridos reciclados en categorías de tráfico pesado T2 a T4 a excepción de la “Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD” que incluye el uso de zahorra reciclada procedente de residuos de hormigón en firmes con categoría de tráfico T0 y el empleo de áridos reciclados de hormigón y mixtos en firmes de categoría T1.

Los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se someterán, en centrales fijas o móviles, a un proceso de separación de componentes no deseados, de cribado y de eliminación final de contaminantes. Las propiedades químicas exigidas en el PG-3 son más restrictivas que en algunas guías sobre áridos reciclados como se muestra en la tabla 26.



PARÁMETROS QUÍMICOS	NORMA DE ENSAYO	PG-3	GUÍA DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCDs				NORMA PARA FIRMES DE PAIS VASCO (ANEJO 5)
				ZARHor	ZARM I	ZARM II	ZARA	
Pérdida de masa en el ensayo de estabilidad a los sulfatos	U N E - E N 1367-2	≤ 18%	≤ 18%	≤ 18%				≤ 18%
Contenido de SO ₃ en agua	U N E - E N 1744-1	SO ₃ < 0,7 %	SO ₃ < 0,5 %	SO ₄ < 0,7 % ¹				SO ₃ < 0,7 % ²
Contenido total de azufre	U N E - E N 1744-1	S < 1% ³	SO ₃ < 1 % ³	SO ₃ < 1,3 %	SO ₃ < 1,8 %	SO ₃ < 1,3 %	-	
Materia orgánica	UNE 103204	-	≤ 0,2%	< 1%	< 2% ⁴		≤ 0,2% ⁵	

¹ Si está en contacto con materiales ligados con cemento SO₄ < 0,5 %.

² Si está en contacto con materiales tratados con cemento SO₃ < 0,2 %.

³ Si los materiales están en contacto con capas tratadas con cemento ≤ 0,5 %.

⁴ Siempre y cuando justifique que la materia orgánica provenga de materiales bituminosos.

⁵ Si es superior al 0,2% se realizará un ensayo de equivalente de arena cuyos resultados será aceptables si el equivalente de arena es superior a 35 para aplicaciones en las que sustituya a zahorras artificiales y a 30 si lo hace a zahorras naturales.

Tabla 26. Comparativa de requisitos químicos para áridos reciclados en firmes establecidos en las guías de referencia
Fuente: Artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco.

Según el PG-3, la granulometría del material deberá cumplir en todos los casos que el cernido por el tamiz 0,063 mm sea menor que los 2/3 del cernido por el tamiz 0,250 mm. Además, el contenido de finos del árido grueso, expresado como porcentaje que pasa por el tamiz 0,063 mm, será inferior al 1% en masa. Existen unos husos granulométricos según la abertura del tamiz, definidos según la UNE-EN 933-2, para la clasificación de la zahorra en función de su tamaño máximo nominal. En la tabla 27 se muestra una comparativa entre diversas guías de las posibles clasificaciones y husos granulométricos del material que deberán realizarse según la norma UNE-EN 933-1.

Para su uso en firmes, como especifica la Norma 6.1 I.C., el espesor de las capas de firmes con zahorras tiene que ser mínimo de 20 cm, 15 cm en arcenes y en las secciones 3221 y 4211 de la figura 9 de este documento, de un espesor máximo de 30 cm.

Por otro lado, se deben cumplir una serie de requisitos en función si es árido grueso, definido por aquella parte del árido total retenida en el tamiz 4 mm o árido fino, correspondiente a la parte del árido total cernida por el tamiz 4 mm. Las características para el árido grueso de las diferentes guías se establecen en la tabla 28 y del árido fino en la tabla 29.



ABERTURA DE TAMIZ (mm)	PG-3/ GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS/ CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's/ NORMA DE FIRMES DEL PAÍS VASCO			GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCDs		
	ZA 0/321	ZA 0/20	ZAD 0/20	ZA25	ZARM II 0/40	ZARM II 0/32	ZARM II 0/22
56	-	-	-	-	100	-	-
45	-	-	-	-	85-100	100	-
40	100	-	-	100	75-99	87-100	-
32	88-100	100	100	-	68-95	75-99	100
25	-	-	-	75-100	-	-	-
20	65-90	75-100	65-100	65-90	56-85	62-91	71-97
12,5	52-76	60-86	47-78	-	44-74	50-79	55-84
8	40-63	45-73	31-54 ²	40-63	35-63	40-68	45-75
4	26-45	31-54	14-37	26-45	22-46	27-51	32-61
2	15-32	20-40	0-15	15-32	15-35	20-40	25-50
0,5	7-21	9-24	0-6	7-21	7-23	7-26	10-32
0,25	4-16	5-18	0-4	4-16	4-18	4-20	5-24
0,063	0-9	0-9	0-2	0-9	0-9	0-11	0-11

¹ Clasificación no incluida en la Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD.

² Valores entre 30-58 según la Guía de áridos reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de RCD's

Tabla 27. Husos granulométricos en función de la clasificación de la zahorra reciclada y de la guía de referencia

Fuente: Artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD, Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco.



REQUISITO PARA ÁRIDOS GRUESOS	NORMA DE ENSAYO	CATEGORÍA DE TRÁFICO	MANUALES DE REFERENCIA			
			PG-3 ¹	GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO	
Contenido de finos	UNE-EN 933-1	-	< 1	< 2 ²	-	
Proporción de partículas totalmente y parcialmente trituradas	UNE-EN 933-5	T00	100	-	-	
		T0	Arcenes: ≥ 70	100	-	
		T1	≥ 70	≥ 75	-	
		T2	Arcenes: ≥ 50	≥ 75	ZARHor, ZARM I, ZARA: >70	
		T3- T4	≥ 50 (incluidos arcenes)	≥ 50	ZARHor, ZARM I, ZARM II ZARA: >50	
Proporción de partículas redondeadas	UNE-EN 933-5	T00- T0	0 Arcenes: ≤ 10	-	-	
		T1	≤ 10 (incluidos arcenes)	-	-	
		T2		-	ZARHor, ZARM I, ZARA: < 10	
		T3- T4		-	ZARM II: < 50	
Índice de lajas	UNE-EN 933-3	-	< 35	< 35	-	
Coeficiente de los Ángeles (LA) ³	UNE-EN 1097-2	T00	≤ 35 ⁴	-	-	
		T0		≤ 35 (incluidos arcenes)		ZARHor y ZARA: <35
		T1	Arcenes: ≤ 40 ⁴		ZARHor, ZARM I, ZARM II ZARA: <40	
		T2	≤ 40 ⁴			
		T3- T4	≤ 40 ⁴	≤ 40 (incluidos arcenes)		

¹ Se debe tener en cuenta que el PG-3 permite los usos de áridos reciclados de T2 a T4.

² Este coeficiente de limpieza es orientativo y evaluado según la norma NLT 172/86. Se puede considerar realizarlo cuando la calidad de los finos no resulte adecuada pero no debe utilizarse como condición para rechazar un material.

³ El Coeficiente de Los Ángeles en el anejo 5 de la Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco especifica un límite de 40 para T2 y 45 para T3-T4 cuando los resultados del ensayo CBR tras inmersión durante 28 días sean iguales o superiores al 150% de los obtenidos a los 4 días, para una compactación de las probetas del 100% de la densidad máxima del Proctor Modificado (UNE-EN 13286-2).

⁴ Estos valores son válidos siempre y cuando su composición granulométrica esté adaptada al huso ZAD20.

Tabla 28. Requisitos para áridos gruesos para zhorras recicladas en función de las guías de referencia

Fuente: Artículo 510 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's

Se destaca que el coeficiente de los Ángeles tiene valores más permisivos que en los áridos naturales ya que según las experiencias realizadas se ha demostrado que, gracias a la mayor absorción de agua que tienen los áridos reciclados, se favorece el proceso de compactación de éstos, por lo que se compensa la resistencia a la fragmentación.



Suelocemento y gravacemento

Son los materiales tratados con cemento consistiendo en una mezcla homogénea de material granular, cemento, agua y, eventualmente aditivos, realizada en central, que convenientemente compactada, se utiliza como capa estructural, en general, en firmes de carretera. Dependiendo del material granular utilizado se distinguen dos tipos de materiales tratados con cemento: suelocemento y gravacemento.

Tanto para suelocemento como para gravacemento se podrán utilizar subproductos, residuos de construcción y demolición o productos inertes de desecho siempre que cumplan las prescripciones técnicas exigidas por la norma, y se declare el origen de los materiales, tal como se establece en la legislación comunitaria sobre estas materias. Para el empleo de estos materiales se exige que las condiciones para su tratamiento y aplicación estén fijadas expresamente en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Los áridos reciclados de residuos de construcción y demolición se someterán, en centrales fijas o móviles, a un proceso de separación de componentes no deseados, de cribado y de eliminación final de contaminantes.

La granulometría del material granular empleado en la fabricación del suelocemento o gravacemento deberá ajustarse a los husos definidos en la figura 31. El tipo SC20 y el GC32 sólo se podrá emplear en carreteras con categoría de tráfico pesado T3 y T4 y en arcenes.

CLASE	CERNIDO PONDERAL ACUMULADO (% en masa)									
	50	40	32	20	12,5	8	4	2	0,5	0,063
SC40	100	80-100	75-100	62-100	53-100	45-89	30-65	20-52	5-37	2-20
SC20	100	100	100	92-100	76-100	63-100	48-100	36-94	18-65	2-35
GC32	100	100	88-100	67-91	52-77	38-63	25-48	16-37	6-21	1-7
GC20	100	100	100	80-100	62-84	44-68	28-51	19-39	7-22	1-7

¹ El rango de la "Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD" especifica unos valores comprendidos entre 17-52.

² La "Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD" hace referencia a un gravacemento con tamaño máximo nominal de 25mm, es decir, una GC25.

Tabla 31. Requisitos adicionales para zahorras recicladas

Fuente: Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's



En la tabla 32 se resumen los requisitos que tienen que tener los áridos para su empleo como suelocemento y gravacemento.

REQUISITOS	ENSAYO	TIPO	LIMITES		
			PG-3	GUÍA DE ÁRIDOS REICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's
Contenido total de azufre	UNE-EN 1744-1	Gravacemento	S ≤ 1% ¹	SO ₃ ≤ 1%	SO ₃ < 1%
		Suelocemento	S ≤ 1%	SO ₃ ≤ 1%	SO ₃ < 1%
Contenido de sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1	Gravacemento	SO ₃ ≤ 0,8% ²	SO ₃ ≤ 0,8%	SO ₃ < 0,8% ³
		Suelocemento	SO ₃ ≤ 0,8% ³	SO ₃ ≤ 0,8%	SO ₃ < 0,8% ³
Materia orgánica	UNE 103204	Gravacemento	4	≤ 1%	4
		Suelocemento	< 1%	≤ 1%	< 1% ⁵
Límite líquido (LL)	UNE 103103	Gravacemento	T00- T2: No plástico ⁶	GC20: No plástico ⁷ GC25: LL<258	T2: No plástico T3-T4: LL < 25
		Suelocemento	LL < 30	LL < 30	LL < 30
Índice de plasticidad (IP)	UNE 103103 y UNE 103104	Gravacemento	T00- T2: No plástico ⁹	GC20: No plástico ⁷ GC25: IP < 68	T2: No plástico T3-T4: IP < 6
		Suelocemento	IP < 12	IP < 15	IP < 12

¹ Si en la descripción petrográfica (norma UNE-EN 932-3) se apreciará la presencia de pirrotina en el árido para la gravacemento, el contenido ponderal en azufre total (S) deberá limitarse a cuatro décimas porcentuales (≤ 0,4%).

² Si los sulfatos solubles en ácido son > 0,4% en SO₃, el uso de cemento SR es OBLIGATORIO.

³ Si los sulfatos solubles son > 0,5% en SO₃, el uso de cemento SR es OBLIGATORIO.

⁴ Si en el árido para gravacemento se detectara la presencia de sustancias orgánicas, de acuerdo con el apartado 15.1 de la norma UNE-EN 1744-1, se determinará su efecto sobre el tiempo de fraguado y la resistencia a compresión, de conformidad con el apartado 15.3 de esa norma. El mortero preparado con estos áridos deberá cumplir simultáneamente que:

El aumento de tiempo de fraguado de las muestras de ensayo de mortero sea inferior a ciento veinte minutos (< 120 min).

La disminución de resistencia a la compresión de las muestras de ensayo de mortero a los veintiocho días (28 d) sea inferior al veinte por ciento (< 20%).

⁵ Siempre que se justifique que la materia orgánica provenga de materiales bituminosos se podrá elevar al 2%.

⁶ Árido fino para tráfico pesado T00 a T2 no plástico y para el resto: LL<25.

⁷ Para calzadas de categoría de tráfico pesado T00 a T2.

⁸ Para calzadas de categoría de tráfico pesado T3 y T4 y para arcenes de categoría de tráfico pesado T00 a T1 en sustitución de SC 40.

⁹ Árido fino para tráfico pesado T00 a T2 no plástico y para el resto: IP<25

Tabla 32. Propiedades de los áridos para el empleo como suelocemento o gravacemento

Fuente: Artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's



La “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco” propone unas propiedades químicas similares a las del PG-3 a excepción del índice plástico cuyo valor es más restrictivo $IP < 10$.

El material granular del suelocemento o el árido de la gravacemento no presentarán reactividad potencial con los álcalis del cemento. Con materiales sobre los que no exista suficiente experiencia en su comportamiento en mezclas con cemento y que por su naturaleza petrográfica puedan tener constitutivos reactivos con los álcalis, el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o el Director de las Obras, podrá exigir que se lleve a cabo un estudio específico sobre la reactividad potencial de los áridos, que definirá su aptitud de uso, siguiendo los criterios establecidos a estos efectos en el apartado correspondiente a la normativa vigente de hormigón.

En el caso de la Norma de firmes del País Vasco también se establece un límite para el índice CBR, determinado según la norma UNE-EN 13286-47 y con una compactación de las probetas del 100% de la densidad máxima del Proctor Modificado (UNE-EN 13286-2), de 20. El material granular no deberá presentar hinchamiento en el ensayo CBR, habiendo aplicado una sobrecarga de 4,5 kg.

Además, para la gravacemento se especifican las siguientes prescripciones para el árido grueso, aquella parte retenida en el tamiz 4 mm (norma UNE-EN 933-2) y para el árido fino, definido como la parte del árido total que pasa por el tamiz 4 mm (norma UNE-EN 933-2). A continuación, se expone la tabla resumen que debe cumplir los áridos gruesos:

REQUISITO PARA LOS ÁRIDOS GRUESOS	ENSAYO	TIPO DE CAPA	PG-3	GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's	ANEJO 8 DE LA NORMA DE FIRMES DEL PAIS VASCO
Proporción de partículas total y parcialmente trituradas	UNE-EN 933-5	Calzada	T00- T1: ≥ 70 T2: ≥ 50 T3- T4: ≥ 30	T00- T1: ≥ 75 T2: ≥ 50 T3- T4: ≥ 30	T22: ≥ 50 T31- T42: ≥ 30	T00- T2: 100 T3-T4: ≥ 70
		Arcenes	T00- T1: ≥ 50 T2- T4: ≥ 30	T00- T1: ≥ 50	T22- T42: ≥ 50	T00-T4: ≥ 50
Proporción de partículas redondeadas	UNE-EN 933-5	Calzada	T00- T1: ≤ 10 T2: ≤ 10 T3- T4: ≤ 30	-	T22: ≤ 10 T31-T42: ≤ 30	T00- T2: 0 T3- T4: ≤ 10
		Arcenes	T2- T4: ≤ 30	-	T22- T42: ≤ 30	T00-T4: ≤ 10

Continúa en la página siguiente



Viene de página anterior

REQUISITO PARA LOS ÁRIDOS GRUESOS	ENSAYO	TIPO DE CAPA	PG-3	GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's	ANEJO 8 DE LA NORMA DE FIRMES DEL PAIS VASCO
Índice de lajas (FI)	UNE-EN 933-3	Calzada	T00- T2: ≤ 30 T3- T4: ≤ 35	T00- T2: ≤ 30 T3- T4: ≤ 35	T2: ≤ 30 T3- T4: ≤ 35	T00- T2: ≤ 30 T3- T4: ≤ 35
		Arcenes	T00- T4: ≤ 40	T00- T1: ≤ 40 ¹	T2- T4: ≤ 40	T00- T4: ≤ 40
Coeficiente de Los Ángeles (LA)	UNE-EN 1097-2	Calzada	T00- T2: ≤ 302 T3- T4: ≤ 35	T00- T2: ≤ 35 T3- T4: ≤ 40	T2: ≤ 35 T3- T4: ≤ 40	-
		Arcenes	T00- T4: ≤ 40	T00- T1: ≤ 45 ¹	T2- T4: ≤ 40	-
Valor de sulfato de magnesio	UNE-EN 1367-2	-	-	-	-	≤ 25

¹ Sólo para gravacemiento clase GC25 y en sustitución de SC40.

² Para las categorías de tráfico pesado T1 y T2, cuando se utilicen en capas de calzada materiales reciclados procedentes de capas de mezclas bituminosas, pavimentos de hormigón, materiales tratados con cemento o de demoliciones de hormigones: LA<35

Tabla 33. Propiedades de los áridos gruesos para el empleo como gravacemiento

Fuente: Artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD, Recomendaciones de uso de RCD's y Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco

Para el árido fino en gravacemiento se debe tener en cuenta los límites marcados en la tabla 34. De no cumplirse estas condiciones, su valor de azul de metileno (MBF), según el Anexo A de la norma UNE-EN 933-9 para la fracción 0/0,125, deberá ser inferior a diez gramos por kilogramo (MBF < 10 g/kg) y, simultáneamente, el equivalente de arena (SE4), deberá ser superior a treinta (> 30), para ambos tipos.

REQUISITO PARA LOS ÁRIDOS FINOS	ENSAYO	TIPO	PG-3	GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO DE RCD's
Equivalente de arena (SE4)	Anexo A de la norma UNE-EN 933-8	GC20	> 40	Calzadas T00- T2: ≥ 40 Calzadas T3- T4: ≥ 35 Arcenes T00- T1: ≥ 35	> 40
		GC32	> 35	T00- T1: ≥ 50	> 35

Tabla 34. Propiedades de los áridos gruesos para el empleo como gravacemiento

Fuente: Artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas, Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD, Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de RCD y Recomendaciones de uso de RCD's



2.3. Árido reciclado en caminos

2.3.1. Normativa

Estos tipos de vías de circulación se caracterizan por tener una intensidad media diaria de tráfico pesado muy bajo. Pueden dar servicio a usos agrícolas, forestales, comunicación entre núcleos rurales, etc. Su construcción, mantenimiento y restauración generalmente es a cargo de las entidades locales.

No existe una normativa obligatoria que regule la construcción de este tipo de vías a nivel estatal ni autonómico. Sin embargo, hay diversas guías que tomaremos como punto de partida para analizar este tipo de vías como el **“Documento de Recomendaciones para la redacción de los proyectos de ejecución de obras para la normalización de los aspectos constructivos de los Caminos Naturales e Itinerarios No Motorizados en España”**¹, publicada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, o las guías de otras Comunidades a las que nos hemos referido con anterioridad como la **“Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s”**, publicada por el Colegio de Ingenieros de Obras Públicas de Castilla y León, o el **“Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”**, desarrollado por la Universidad de Córdoba a través del Grupo de Investigación del PAIDI “TEP 227 Ingeniería de la Construcción” y de la Cátedra de Medio Ambiente Enresa. También la **“Guía de los Áridos Reciclados procedente de RCD”** en sus recomendaciones para material granular en firmes incluye caminos.

Por ejemplo, el camino natural de Plazaola y el Camino Natural del ferrocarril Vasco-Navarro ubicado entre Estella/Lizarrá y la ermita de Santo Toribio (Álava-Araba) son considerados como caminos naturales por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y por tanto, se podría vincular totalmente a las especificaciones de la primera guía anteriormente citada.

Independientemente de si se toman como referencia las recomendaciones de alguna guía o la propia experiencia del proyectista, la elección de los criterios constructivos de la ejecución de un camino dependerá de los condicionantes del medio, la disponibilidad de los terrenos y permisos de actuación, la afectación a servicios y usuarios, el diseño, la duración o vida útil y el mantenimiento del mismo.

En ocasiones, por el tipo de uso o condicionantes del medio como fuertes pendientes, es necesario realizar pavimentos de hormigón. Para este tipo de firmes existen diferentes guías como el **«Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico»**² o la **“Guía de Empleo, Proyecto y Ejecución de pavimentos de hormigón en entornos urbanos”**, ambas del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).

1 https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/caminos-naturales/publicaciones/manual_aspectosconstructivos.aspx

2 <https://www.ieca.es/producto/manual-de-pavimentos-de-hormigon-para-vias-de-baja-intensidad-de-trafico/>



2.3.2. Propiedades generales

Un camino, de forma general, consta de dos partes, la explanada y sobre ella, el firme. La explanada condiciona las características de duración y resistencia del camino. Los firmes, por su parte, tienen que proporcionar una superficie de tránsito y rodadura segura y cómoda durante su vida útil por lo que debe ser resistente a las solicitaciones previstas de tráfico de personas, animales o vehículos y a las acciones externas naturales, especialmente de la provocada por el agua. Generalmente, y acorde con la clasificación de tráfico pesado de las especificaciones de la *Norma 6.1 I-C "Secciones de firme"*, los caminos, salvo ciertas excepciones, suele ser **categorizado como T42** (intensidad media diaria de vehículos pesados inferior a 25 vehículos/día).

En ocasiones no es necesario ejecutar una nueva explanada, aunque se recomienda en caminos de nueva traza, en aquellos de ampliación de su plataforma o en los caminos existentes que tengan una notable deficiencia. La **calidad de la explanada** se evalúa a través **del ensayo CBR** (tabla 35) y no mediante el ensayo de placa con carga como en los firmes de carretera. En caso de que el valor de CBR sea inferior a 5, se debe realizar una capa sobre ella con suelo seleccionado natural o reciclado de RCD de 30 cm de espesor para garantizar al menos tener una explanada tipo E1.

TIPO DE EXPLANADA SEGÚN CBR	
E1	$5 \leq \text{CBR} < 10$
E2	$10 \leq \text{CBR} < 20$
E3	$\text{CBR} \geq 20$

Tabla 35. Tipo de explanada en función del índice CBR

Fuente: Recomendaciones para la redacción de los proyectos de ejecución de obras para la normalización de los aspectos constructivos de los Caminos Naturales e Itinerarios No Motorizados en España

El medio en el que se vaya a ubicar el camino es determinante a la hora de la forma de ejecutarlo (ver tabla 36) diferenciándose principalmente estas tres situaciones:

- ✓ Caminos sobre vías férreas, caminos o carreteras existentes.
- ✓ Caminos sobre infraestructuras en mal estado o insuficientes.
- ✓ Caminos de nueva traza.



TIPO DE MEDIO PREVIO	PLATAFORMA	TIPO DE PLATAFORMA	TRATAMIENTO PLATAFORMA	CAPAS GRANULARES	ACABADO	ANCHO STANDAR
Antiguas vías férreas	Existente	Capa de balasto en buen estado	Recebado + Compactación	Zahorra artificial. Según CBR: 15-20 cm	Capa de finos (jabre/ sauló o equivalente)	3,5 – 4 m.
Antiguas vías férreas	Existente	Sin balasto o insuficiente	Escarificación + Aporte + Recompactado	Zahorra artificial. Según CBR: 15-35 cm	Capa de finos (jabre/ sauló o equivalente)	3,5 – 4 m.
Caminos agrícolas	Existente	Adecuada al tráfico de vehículos	-	Zahorra artificial. Según CBR: 15-35 cm	Capa de finos (jabre/ sauló o equivalente)	3-5 m.
Caminos agrícolas	Existente	Escasa capacidad para el tráfico	Escarificación según estado anterior + Recompactado	Zahorra artificial. Según CBR: 15-35 cm	Capa de finos (jabre/ sauló o equivalente)	3-5 m.
Sendas	Existente	A rehabilitar	Limpieza + recompactación puntual	Zahorra artificial. Localmente ≤ 10 cm zahorra	Capa de finos (jabre/ sauló o equivalente)	1,5 m.
Sendas	Nueva creación	Apertura	Limpieza + compactación puntual	Zahorra artificial ≤ 10 cm	-	1,5 m.

Tabla 36. Tipología de estructura de caminos

Fuente: Recomendaciones para la redacción de los proyectos de ejecución de obras para la normalización de los aspectos constructivos de los Caminos Naturales e Itinerarios No Motorizados en España

Para caminos a ejecutar sobre vías de ferrocarriles abandonadas, caminos o carreteras existentes se optará por aprovechar las propiedades resistentes de estas vías. Tradicionalmente, las vías férreas se han realizado mediante balasto y los caminos rurales existentes con macadam (material semejante a la zahorra artificial). Se deberá comprobar la idoneidad del material preexistente con los ensayos correspondientes o fijados por la Dirección de obra. A efectos de diseño se puede suponer que la categoría de explanada existente es E3 tal y como establece las *“Recomendaciones de uso de áridos reciclados fabricados con RCD’s”*. No obstante, en el caso de que dicha explanada presente signos evidentes de fallos de capacidad portante, habrán de tomarse las medidas de mejora necesarias. En caso de que sus propiedades sean idóneas, se procederá a nivelarla, perfilarla y compactarla. Tras ello, se recebará superficialmente con suelo seleccionado natural o reciclado, garantizando la penetración entre la capa de árido grueso. Es necesario conferirle una geometría superficial adecuada, longitudinal y transversal, con la incorporación de las pendientes de evacuación de aguas que se definirán en el proyecto y que generalmente serán entre 1-3%, y nunca inferior al 1%.

En el caso de que la plataforma existente sea insuficiente o se encuentre en mal estado, se debe realizar una escarificación por medios mecánicos de ella en el espesor que establezca el proyecto constructivo, siendo un valor orientativo el de 30 cm, como paso previo a la recompactación, a fin



de sanearla y dejarla preparada para los posteriores tratamientos del firme. En el caso de que exista presencia de balasto abundante, pero en mal estado, el escarificado se sustituirá por la compactación mecánica de la plataforma. Para el caso de sendas peatonales únicamente se establecerán trabajos de limpieza (apertura y desbroce, si no existieran previamente) y reparación de baches con áridos, como trabajos previos al establecimiento del firme.

Una vez se ha creado la plataforma, ya sea mediante el uso de balasto preexistente o mediante ejecución de la misma, se procederá a extender las capas de materiales granulares que constituirán la base del firme sobre la que se ejecutará el acabado. Generalmente la capa de firme tendrá entre 20-30 centímetros.

En resumen, de una forma orientativa, el proceso de construcción de caminos constará de:

- ✓ Replanteo y comprobación.
- ✓ Desbroces y limpiezas.
- ✓ Tratamiento de las capas existentes: escarificado, si es preciso, de la plataforma existente o de la superficie de asiento, compactación de capas preexistentes y recebado.
- ✓ Ejecución de sistemas de drenaje, en caso de que se necesite ejecutarlos.
- ✓ Extensión de capas de firme: extensión, humectación y compactación de tongadas de material, cuyo espesor de tongada quedará definido en el proyecto, de manera que se alcance la densidad establecida por la normativa de aplicación.
- ✓ Refinos y acabados (en caso de ser necesario).

La guía de “Recomendaciones de uso de áridos reciclados fabricados con RCD’s” y el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” establecen las mismas secciones de firmes tipo con materiales reciclados en función del tipo de explanada en la que se asiente:

		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T421	T422	T423
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1			
	E2			
	E3			

ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD.

Figura 21. Tipos de secciones de firmes para caminos rurales

Fuente: Recomendaciones de uso de áridos reciclados fabricados con RCD’s



En el caso de tener que hacer pavimentos de hormigón por las condiciones de tráfico o pendiente, se aconseja seguir las instrucciones del “Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico” o/y la “Guía de Empleo, Proyecto y Ejecución de pavimentos de hormigón en entornos urbanos”. En la primera guía también es un condicionante la calidad de la explanada determinada por el índice CBR y el tráfico previsto y en la segunda la intensidad media diaria de tráfico pesado previsto.

TIPO DE EXPLANADA	CBR	MÓDULO DEFORMACIÓN Ev2 (kp/cm2)	INSPECCIÓN VISUAL
S0	3-5	≥ 20	Terrenos de mala calidad, bastante deformables, en los que el paso de unos pocos vehículos pesados sobre la explanada húmeda provoca fuertes roderas, haciendo inviable la circulación. En general, sus partículas son finas y plásticas. Puede contener también algo de materia orgánica, detectable por su color oscuro y su olor (análogos a los de la tierra vegetal), u otros materiales que pueden provocar deformaciones apreciables. Así mismo puede ser el caso de rellenos recientes poco compactos, que en general se reconocen por contener en su interior restos o desechos, por ejemplo plásticos, cascotes, etc.
S1	5-10	≥ 60	Terrenos de calidad media, deformables, pero no exageradamente (es posible la circulación), con el paso de unos pocos vehículos pesados sobre la explanada húmeda. Se trata de suelos granulares (gravas, arenas, etc.) con partículas finas relativamente plásticas.
S2	> 10	≥ 120	Terrenos de buena calidad en los que el paso de vehículos pesados sobre la explanada húmeda no produce prácticamente huella. Son compactos y están compuestos, en general, por gravas y arenas con pocos finos plásticos.

Tabla 37. Tipo de explanada en función del CBR para pavimentos de hormigón

Fuente Guía de Empleo, Proyecto y Ejecución de pavimentos de hormigón en entornos urbanos.

CATEGORÍA DE TRÁFICO	IMDp	ZONAS RURALES	ZONAS URBANAS
C1	25-50	- Caminos rurales sirviendo sólo a núcleos de hasta 5000 habitantes.	- Calles arteriales o principales que no sean travesías de carreteras con tráfico mayor que el C1.
C2	15-24	- Caminos rurales sirviendo sólo a núcleos de hasta 1000 habitantes.	- Calles muy comerciales. - Calles con anchura de 6 metros o superior con servicio regular de autobuses urbanos (más de 1 autobus/hora)
C3	5-14	- Caminos rurales sirviendo sólo a núcleos de menos de 250 habitantes.	- Calles comerciales: con tiendas, pequeñas industrias, talleres, etc. - Calles con anchura de 6 metros o superior sin servicio regular de autobuses urbanos (menos de 1 autobus/hora)
C4	0-4	- Caminos agrícolas de hasta 4 metros de ancho por los que no circulen camiones de gran capacidad.	- Calles exclusivamente residenciales con las edificaciones construidas ya y sin tráfico comercial. - Calles con anchura inferior a 6 metros y sin tráfico comercial. - Aparcamiento de vehículos ligeros. - Zonas peatonales sin acceso de vehículos pesados.

Tabla 38. Recomendaciones de los caminos con pavimento de hormigón en función del tráfico.

Fuente: Guía de Empleo, Proyecto y Ejecución de pavimentos de hormigón en entornos urbanos.



Los hormigones a emplear en pavimentos se definen por su resistencia a flexotracción siendo los más habituales HF-3,5 y HF-4,0, cuyas resistencias características a flexotracción a los 28 días son de 3,5 MPa y 4,0 MPa respectivamente. De una forma aproximada se puede considerar que HF-3,5 equivale a HM-25 y HF-4,0 a HM-30. La ejecución de estos pavimentos siempre tiene que disponer de juntas.

Teniendo en cuenta las categorías de explanada, el tráfico, la vida útil y el tipo de hormigón se establece unas dimensiones mínimas para firmes de hormigón como se observa en la figura 22.

CATÁLOGO DE SECCIONES

TRÁFICO EXPLANADA						PERIODO DE PROYECTO	
	C4	C3	C2	C1	20 AÑOS		
		C4	C3	C2	30 AÑOS		
S0		HF-4,0 16	HF-4,0 18 HF-3,5 20	HF-4,0 20 HF-3,5 22	HF-4,0 22 HF-3,5 24	15	15
	HF-4,0 14		HF-4,0 18 HF-3,5 20	HF-4,0 18 HF-3,5 20	HF-4,0 20 HF-3,5 22	15	15
S1		HF-4,0 14	HF-4,0 16 HF-3,5 18	HF-4,0 18 HF-3,5 20	HF-4,0 20 HF-3,5 22	15	15
	HF-3,5 16		HF-4,0 14 HF-3,5 16	HF-4,0 16 HF-3,5 18	HF-4,0 18 HF-3,5 20	15	15
S2		HF-4,0 14	HF-4,0 16 HF-3,5 18	HF-4,0 18 HF-3,5 20	HF-4,0 20 HF-3,5 22	15	15
	HF-3,5 16		HF-4,0 14 HF-3,5 16	HF-4,0 16 HF-3,5 18	HF-4,0 18 HF-3,5 20	15	15

	PAVIMENTO DE HORMIGÓN		HF-4,0 = HORMIGÓN DE RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN 4.0 Mpa
	SUB-BASE GRANULAR		HF-3,5 = HORMIGÓN DE RESISTENCIA A FLEXOTRACCIÓN 3.5 Mpa

Figura 22. Secciones de firmes de pavimentos de hormigón

Fuente: Guía de Empleo, Proyecto y Ejecución de pavimentos de hormigón en entornos urbanos.

2.3.3. Materiales

Los materiales más habituales para ejecutar los caminos son:

- ✓ Suelos o capas granulares, ya sean de granulometría continua o uniforme.
- ✓ Materiales granulares estabilizados o tratados, tales como suelos estabilizados con cemento, cal o productos bituminosos (con mezcla in situ o en central), gravacemento, gravaescoria, gravaemulsión, gravacemiza, etc. Estos materiales pueden ser reciclados procedentes del mismo u otro firme.



- ✓ Tratamientos superficiales que incluyen los riegos con gravilla, los riegos auxiliares de imprimación, adherencia y curado, y las lechadas bituminosas.
- ✓ Mezclas bituminosas, que reciben distintas denominaciones según su constitución y forma de puesta en obra: mezclas en caliente o en frío, mezclas cerradas o abiertas, morteros y hormigones bituminosos.
- ✓ Hormigones vibrados, hormigones magros para bases, hormigones compactados con rodillo, etc.

Según el “Manual de aspectos constructivos de Caminos Naturales”, se puede utilizar materiales reciclados tanto para las explanaciones como para los firmes. En las explanaciones se suelen utilizar materiales procedentes tanto de residuos cerámicos, como de asfalto, de hormigón o mezclas de estos. Sin embargo, para capas de firmes, se restringe la utilización de algunos tipos de materiales, destacando la utilización de árido reciclado procedente de hormigón. No obstante, las guías enfocadas en criterios sobre áridos reciclados amplían la posibilidad de utilizarse zahorras en firmes con áridos reciclados de hormigón, mixtos de hormigón y mixtos cerámicos. Incluso la “Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)” admite el uso de áridos reciclados mixto con asfalto para bases y subbases de caminos.

Por tanto, para **explanadas o sub-bases** se podrá seguir los criterios sobre “**terraplenes**” del artículo 330 del PG-3 o “**rellenos todo-uno**” del artículo 333. Las características generales de estos materiales como rellenos tipo terraplén están especificadas en el apartado 2.2.3.1 de este documento.

En el caso de las bases o firmes, lo más habitual es emplear zahorras naturales, artificiales o recicladas. En el caso de empleo zahorras recicladas mixtas hay que tener en cuenta que sus características resistentes son inferiores a su equivalente convencional, lo cual conducirá a espesores mayores de capa, en general 5 centímetros más. En caso de utilizarse aglomerado, esta capa no puede tener contacto con una capa de árido reciclado mixto cerámico. A continuación, se hace un resumen de las características técnicas que se desarrollan sobre áridos reciclados en las distintas guías analizadas:



REQUISITOS TÉCNICOS	NORMA DE REFERENCIA	MANUAL DE ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	GUÍA DE ÁRIDOS RECICLADOS DE RCD	CATÁLOGO DE FIRMES/ RECOMENDACIONES DE USO
Granulometría	UNE- EN 933-1	VER TABLA 27	VER TABLA 27	VER TABLA 27
Composición	UNE-EN 933-11	-	ARH, ARMh, ARMc, ARMa	ZARHor, ZARM I, ZARM II
Índice de lajas	UNE- EN 933-3	-	< 35	-
Partículas trituradas/ redondeadas ¹	UNE- EN 933-5	-	≥ 75	Trituradas: > 50 Redondeadas: <105
Coefficiente de los Ángeles	UNE-EN 1097-2	≤ 40	≤ 45	< 406
Límite plástico	UNE 103103	No plástico	< 352	ZARHOR, ZARM I: No plástico ZARM II: < 25
Índice de plasticidad	UNE 103104	No plástico	< 93	ZARHOR, ZARM I: No plástico ZARM II: < 6
Equivalente de arena	UNE- EN 933-8	> 35 ¹	> 30	ZARHor: > 35 ZARM I: > 30 ZARM II: > 25
Coefficiente de limpieza	NLT 172/86	-	-	-
	UNE 146130	< 2	-	-
Materia orgánica	UNE 103204	-	-	ZARHOR, ZARM I: < 1 ZARM II: < 2 ⁷
Compuestos de azufre	UNE- EN 1744-1	-	≤ 1 ⁴	ZARHOR, ZARM I: < 1,3 ⁴ ZARM II: < 1,8 ⁴
Sulfatos solubles en agua	UNE- EN 1744-1	-	≤ 0,5	< 0,7 ⁴
Absorción	UNE-EN 933-1	-	-	VER TABLA 30
Índice CBR	UNE 103502	-	Subbases: > 20	ZARHOR, ZARM I: > 40
			Bases: > 70	ZARM II: > 20
Pérdida de masa en el ensayo de estabilidad a los sulfatos	UNE-EN 1367-2	-	-	≤ 18

1 Límite a > 30 si el tráfico pesado del camino puede considerarse como en arcenes de categorías T3 y T4.

2 En subbase o si la base va a recibir un tratamiento bituminoso posterior el límite será < 25.

3 En subbase o si la base va a recibir un tratamiento bituminoso posterior el límite será < 6.

4 Si está en contacto con capas tratadas con cemento: ≤ 0,5%.

5 En caso de emplearse ZARM II: < 50.

6 En caso de emplearse ZARM II y en carriles bici y vías peatonales urbanas: < 45.

7 Siempre que se justifique que la materia orgánica provenga de materiales bituminosos.

Tabla 39. Requisitos técnicos de zahorras recicladas para caminos según las guías de referencia

Fuente: Manual de aspectos constructivos de Caminos Naturales, Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), Catálogo de firmes y unidades de obra con árido reciclado de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's



Aunque no es necesario en todos los casos, se puede realizar un acabado del firme en función de su uso final. En general, en los acabados no suele ser habitual emplear áridos reciclados.

Banda peatonal

En lo relativo a los acabados, la banda peatonal se terminará con un recebo de la zahorra con material de granulometría fina (0/5 mm). La capa de finos así formada tendrá, al menos, 2 cm de espesor tras el extendido y la compactación de la misma, en todo el ancho del firme.

El recebo estará formado por arena natural, restos de machaqueo, suelo seleccionado, tipo arena caliza de machaqueo, sábrago, albero o similar, etc., sin plasticidad. La arena, aunque no tiene agregados coherentes, es buen material para rellenar. Por su parte, la proporción de arcilla en el recebo debe estar muy limitada, ya que cuando está húmeda hace el firme inestable. Su granulometría debe ser tal que los porcentajes (en peso) que pasan por el tamiz 10 UNE sean del 100%, por el tamiz 5 UNE entre 85-100%, y por el tamiz 0,080 UNE entre 10-25%.

Banda ciclable

El material para el acabado del firme como vía ciclista puede ser muy variable: materiales bituminosos, hormigón in situ, adoquines o baldosas, pavimentos de suelo cemento o tratamientos superficiales.

En general en caminos rurales destinados a este uso, se suele aplicar un doble tratamiento superficial asfáltico que consiste en la aplicación sucesiva de dos riegos monocapa (ligante-árido) con tamaños decrecientes de árido. Antes de su aplicación, se debe proceder al barrido del firme y realización de un riego de imprimación con un ligante fluido, con el objetivo de preparar la superficie de apoyo y de contribuir a la sujeción de la capa bituminosa o tratamiento superficial posterior, para mejorar la unión entre capas del firme.



2.4. Árido reciclado en vías ciclistas

2.4.1. Normativa

La clasificación de las infraestructuras dirigidas a los ciclistas queda definida en la **Ley 19/2001, de 19 de diciembre, de reforma del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos de motor y seguridad vial**¹:

- ✓ Vía ciclista: Vía específicamente acondicionada para el tráfico de ciclos con la señalización horizontal y vertical correspondiente, cuyo ancho permite el paso seguro de estos vehículos.
- ✓ Carril bici: Vía ciclista que discurre adosada a la calzada, en un solo sentido o en doble sentido.
- ✓ Carril bici protegido: Carril bici provisto de elementos laterales que lo separan físicamente del resto de la calzada, así como de la acera.
- ✓ Acera-bici: Vía ciclista señalizada sobre la acera.
- ✓ Pista-bici: Vía ciclista segregada del tráfico motorizado, con trazado independiente al de las carreteras.
- ✓ Senda ciclable: Vía para peatones y ciclos segregada del tráfico motorizado que discurre por espacios abiertos, parques, jardines y bosques.

La gran variabilidad de estas vías hace que los requisitos en ellas difieran ya que si, por ejemplo, comparte trazado con una carretera su dimensionamiento está vinculado a la **“Norma 6.1 IC Secciones de Firme. Instrucción de Carretera”** y al **“Pliego de Prescripciones Técnicas Generales PG-3”** frente a otras que transcurran, por ejemplo, por vías verdes donde no hay una normativa obligatoria aunque se podrían seguir las especificaciones de las **“Recomendaciones para la redacción de los proyectos de ejecución de obras para la normalización de los aspectos constructivos de los Caminos Naturales e Itinerarios No Motorizados en España”**. También existe el **“Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico”**² en donde se establecen criterios para estas vías.

Dentro de la Comunidad Foral de Navarra se han desarrollado diferentes guías para el impulso de la bicicleta como la **“Guía de políticas de movilidad ciclista para municipios de Gipuzkoa, Navarra y Pirineos Atlánticos”**³ o planes dentro de las ciudades, como el de Pamplona-Iruña, **“1ª Fase del Plan de Ciclabilidad 2017 de Pamplona”**⁴ donde se establecen criterios para el desarrollo de estas vías. Sin embargo, no hay unas recomendaciones concretas para la ejecución de la sección de la vía.

Otras Comunidades han regulado este tipo de vías como Cataluña que ha elaborado el **“Manual para el diseño de vías ciclistas de Cataluña”** o el País Vasco con las **“Recomendaciones para el diseño de firmes de vías ciclistas”**⁵. Además, también se han incluido especificaciones en las guías de referencia para este documento sobre áridos reciclados, las **“Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD's”** y el **“Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos**

1 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-24173>

2 <https://ciudadanabicicleta.files.wordpress.com/2012/01/manual-dgt-2000-disec3b1o.pdf>

3 <http://ederbidea.com/wp-content/uploads/2018/04/Bicicleta-y-gobiernos-locales.pdf>

4 https://www.pamplona.es/sites/default/files/2019-02/Plan%20Ciclabilidad%202017%20pamplona_0.pdf

5 <https://www.euskadi.eus/gobierno-vasco/-/libro/bizikleta-bideen-bide-zoruak-diseinatze-gomendioak-recomendaciones-para-el-diseno-de-firmes-de-vias-ciclistas/>



reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”.

2.4.2. Propiedades generales

Para la elección de la estructura a realizar se puede diferenciar entre:

- ✓ Carril de nueva creación.
- ✓ Carril adyacente a una carretera.
- ✓ Carril sobre una plataforma existente.

Teniendo en cuenta estas características, la ejecución del nuevo carril deberá estar diseñada para soportar el tráfico previsto. Siempre y cuando se considere que la vía pueda ser utilizada por vehículos motorizados, aunque sea de forma accidental, se ejecutará la explanada y el firme para el tráfico correspondiente, generalmente T4, según las Instrucciones 6.1 y 6.2-IC. En el caso de que sólo se prevea un uso por bicicletas o peatones, se puede realizar un firme más ligero ya que correspondería, salvo justificaciones, a un tráfico T45 según la clasificación de tráfico del “Manual de Pavimentos Asfálticos para Vías de Baja Intensidad de Tráfico” de Miguel Ángel del Val y Alberto Bardesi.

CATEGORÍA DE TRÁFICO	Nº DIARIO DE VEHÍCULOS PESADOS
T41	25-49
T42	12-24
T43	6-11
T44	2-5
T45	0-1

Tabla 40. Clasificación de tráfico de baja intensidad.

Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico.

En el caso de aprovechar un arcén pavimentado para el desarrollo del carril de bicicletas, sólo será necesario actuaciones de mejora de la capa de rodadura del firme o limpieza del mismo. Si el arcén no está pavimentado, es decir, está formado únicamente por capas granulares o suelos seleccionados, se podrá aprovechar esta capa como explanada comprobando previamente su calidad y su homogeneidad y, posteriormente, realizar un firme compatible con ella. Otra alternativa habitual es realizarlo sobre antiguas vías férreas donde se procederá de la misma forma que en lo explicado en el apartado de caminos de este documento, apartado 2.3.

En general la estructura de un carril bici de nueva creación constará de una explanada y de un firme cuya estructura se diseñará en función de la superficie del pavimento a emplear, de la capacidad portante del terreno subyacente y de la explanada y de los materiales disponibles para la ejecución del firme.

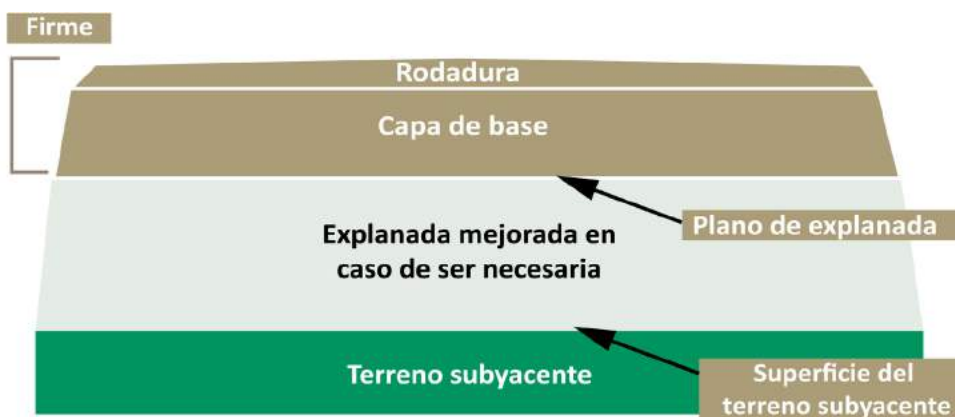


Figura 23. Esquema y composición de un carril bici

Fuente: GAN-NIK

En primer lugar, se debe verificar si el terreno natural, una vez eliminada la tierra vegetal, puede aprovecharse como explanada o no. Las operaciones más habituales a realizar son:

- ✓ Sustituir una capa por otra de mejor calidad en la que se incluyen operaciones de limpieza y compactación.
- ✓ Aumentar el espesor de la capa si el terreno natural fuese inadecuado incluyendo operaciones de limpieza y compactación.
- ✓ Recebar o escarificar, en función del terreno natural y compactar.

En general, la explanada, bien sea de nueva ejecución o de mejora o aprovechamiento de la existente, deberá estar constituida por el terreno natural regularizado y compactado. Sobre la explanada bien nivelada y compactada, se ubicará el firme que deberá soportar su propia construcción y mantener las características mecánicas iniciales durante el tiempo de proyecto. Deberá por ello ser inalterable a las condiciones climáticas del lugar y dimensionada para actuaciones mínimas de mantenimiento y eventuales invasiones del entorno.

Es importante asegurar el drenaje adecuado de la estructura del carril bici, siendo recomendable una pendiente del 2%.

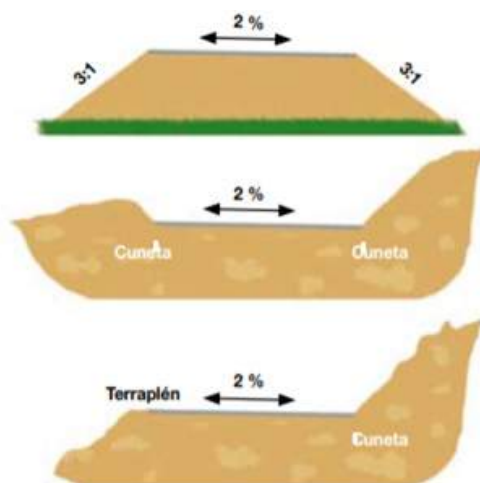


Figura 24. Drenaje de las vías ciclistas

Fuente: Manual para el diseño de vías ciclistas de Cataluña



2.4.3. Materiales

2.4.3.1. Explanada

La ejecución de la explanada dependerá de las características del suelo donde vaya a apoyarse por lo que es necesario conocer sus propiedades. En general, en los carriles bici de nueva construcción será necesario ejecutar una explanada nueva, pero, en ocasiones y por razones económicas, no es posible realizarla y hay que recurrir al uso de suelos locales. El “Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico” recomienda que la explanada cumpla como mínimo, salvo excepciones justificadas, las prescripciones de la categoría E1 para garantizar la capacidad portante de la misma. En caso de la necesidad de emplear los suelos locales y que no cumplan con la categoría E1, podrían estabilizarse in situ mediante cal u otros materiales.

Por otro lado, en las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” como el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” recomiendan dos tipos de explanadas:

- ✓ Explanada E-1, baja: explanada que ofrece un módulo elástico equivalente $E > 45$ MPa.
- ✓ Explanada E-2, media: explanada que ofrece un módulo elástico equivalente $E > 75$ MPa.

MATERIALES A DISPONER SEGÚN SUELO DE APOYO Y EXPLANADA A CONSEGUIR				
SUELOS NATURALES DE APOYO	SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES CBR>2	SUELOS TOLERABLES	SUELOS ADECUADOS	SUELOS SELECCIONADOS
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1, BAJA			<p>CUMPLE SIEMPRE NO ES NECESARIO SUSTITUIR TERRENO</p>
E2, MEDIA				<p>CUMPLE SIEMPRE NO ES NECESARIO SUSTITUIR TERRENO</p>

SA: Suelo adecuado; SS: Suelo Seleccionado; SR-SEL: Suelo seleccionado reciclado de RCD; SR-TOL: Suelo tolerable reciclado de RCD; ZARM: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD.

Figura 25. Tipo de secciones de explanadas para vías ciclistas

Fuente: “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”



En cambio, las “Recomendaciones para el diseño de firmes de vías ciclista” del País Vasco, que se basa en la “Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco”, incluye secciones de explanadas mejoradas en función del tipo de material del suelo de apoyo y de la categoría de explanada determinada por el módulo de compresibilidad del material obtenido en el segundo ciclo de carga:

CATEGORÍA DE EXPLANADA MEJORADA	Ev2 (NORMA NLT3- 357/98)
EX0	≥ 60 MPa
EX1	≥ 120 MPa

Tabla 41. Capacidad de soporte mínimo del plano de explanada
Fuente: Norma para el dimensionamiento de firmes de la Red de Carreteras del País Vasco

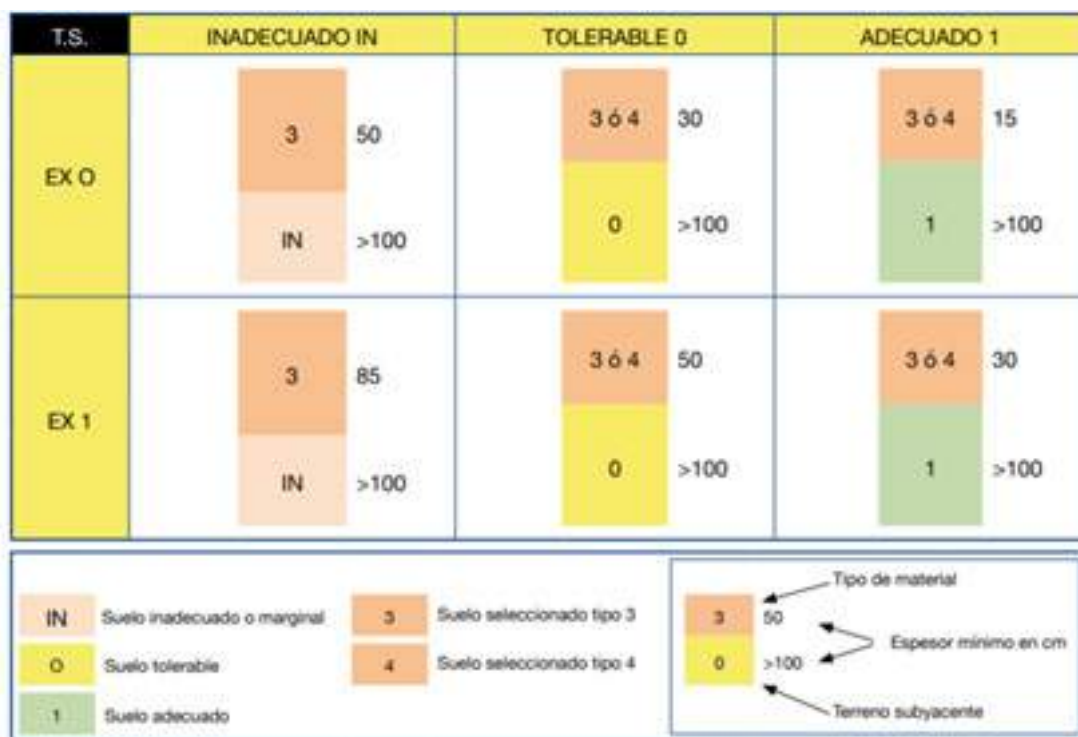


Figura 26. Secciones tipo de explanadas mejoradas para vías ciclistas en el País Vasco

Fuente: Recomendaciones para el diseño de firmes de Vías Ciclistas

Para la formación de la explanada según el “Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico” se podrá utilizar materiales que cumplan las condiciones de suelos seleccionados, tolerables y adecuados; mientras que las guías “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” y “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” sólo aconsejan emplear suelos con las especificaciones de seleccionados y tolerables o



zahorras recicladas tipo ZARM II, y las “Recomendaciones para el diseño de firmes de vías ciclistas” del País Vasco sólo recomienda el empleo de suelos reciclados seleccionados en las explanadas mejoradas. Estos materiales deberán cumplir con las prescripciones correspondientes del artículo 330 “terraplenes” y 510 “zahorras” del PG-3, según sea el caso. Es aconsejable que en caso de realizarse carriles bici de nueva creación el índice CBR tiene que ser mayor o igual a 20.

2.4.3.2. Firmes

Los materiales más habituales a emplear en vías ciclistas son:

- ✓ Mezclas bituminosas en caliente de granulometría continua tipo aglomerado asfáltico, denominadas AC, y mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso densas y semidensas AC-D ó AC-S.
- ✓ Mezclas bituminosas en frío. Se excluye el uso de árido reciclado en estos firmes.
- ✓ Rodaduras en color mediante:
 - Mezclas bituminosas en caliente con ligantes convencionales y pigmentos de color (3 a 4% sobre masa de áridos) en capas de 3 a 5 cm de espesor.
 - Mezclas con ligantes sintéticos o resinas y pigmentos de distintos colores o incoloros (1 al 2% sobre masa de áridos. Se pueden utilizar granulometrías con tamaños máximos de árido de 12 a 20 mm para espesores de capa de 3 a 5 cm, o con tamaños inferiores a 12 mm para capas delgadas (entre 2 y 10 mm). La fabricación de estas mezclas puede ser en caliente o en frío, aunque con las más finas se suelen fabricar en frío (lechadas).
 - Pinturas mono o bicomponentes o morteros a base de resinas, en capas de poco espesor.
- ✓ Rodaduras para zonas en las que se busque reducir la intrusión visual de la vía mediante:
 - Materiales granulares como zahorras o arenas naturales. Las zahorras deben tener una cierta plasticidad para conseguir una cierta cohesión superficial.
 - Materiales tratados con conglomerantes hidráulicos o puzolánicos o con ligantes sintéticos como:
 - Suelos estabilizados con cemento o cal, o suelocemento.
 - Zahorras tratadas con cemento blanco, con características similares a las de la gravacemento.
 - Zahorras tratadas con conglomerantes incoloros puzolánicos a base de vidrio reciclado, con las características de una gravacemento del PG-3, pero exigiendo las resistencias a 28 días en vez de a 7 días.
 - Mezclas con resinas sintéticas incoloras.
- ✓ Zahorra artificial o reciclada.
- ✓ Riegos de adherencia e imprimación.

Queda excluido el empleo de árido reciclado en mezclas bituminosas en frío y en los riegos de adherencia e imprimación.



Si el carril bici está dentro de la plataforma de la carretera, los materiales que deben emplearse en la ejecución de los firmes, así como su ejecución, tienen que seguir las prescripciones establecidas en el PG-3. En los casos que sea independiente, las indicaciones del PG-3 pueden considerarse orientativas y tener algún criterio más flexible en ciertos materiales como los pavimentos de hormigón.

Hay diferentes guías que establecen unas secciones tipo para los firmes de vías ciclistas. Por ejemplo, el “Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico” aconseja unas secciones para uso exclusivo de bicicletas (tráfico T45).

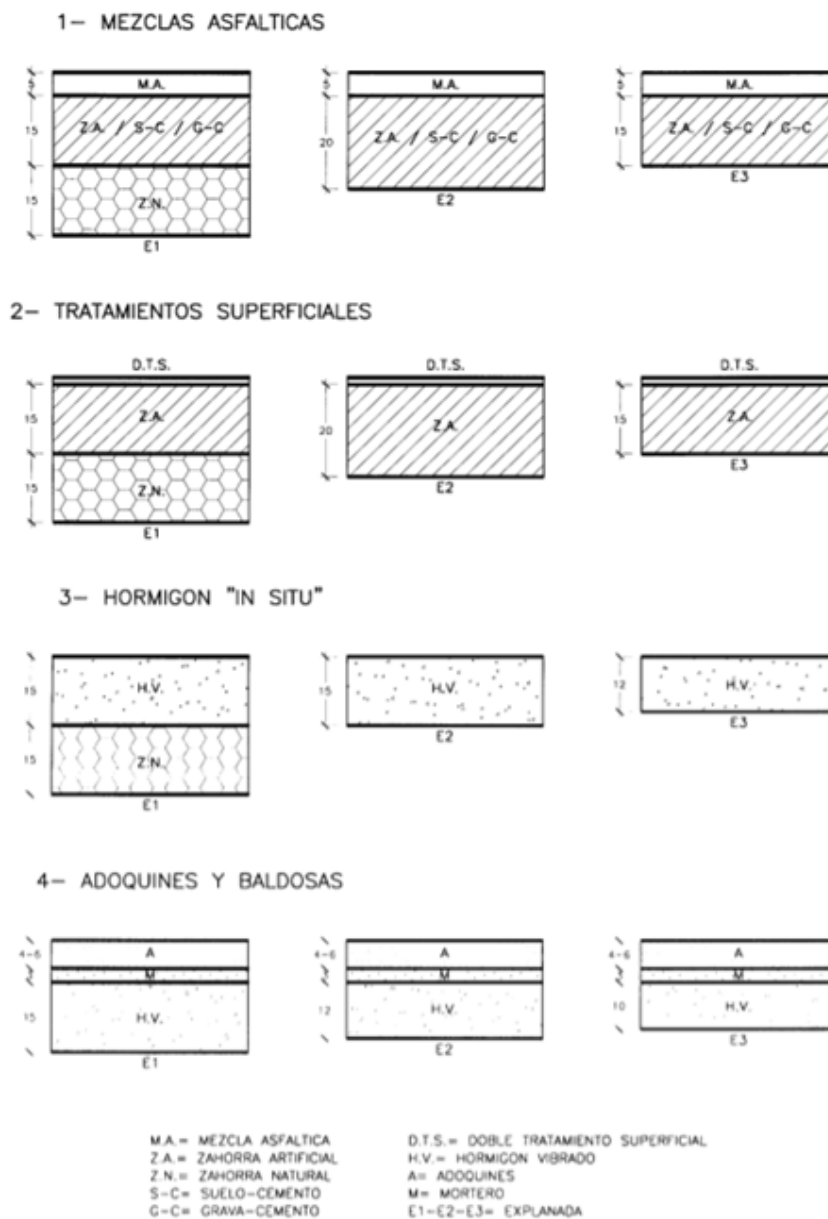


Figura 27. Tipo de secciones de firmes para vías ciclistas con tráfico T45

Fuente: Manual de recomendaciones de diseño, construcción, infraestructura, balizamiento, conservación y mantenimiento de carril bici, de la Dirección General de Tráfico.



En el “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)” y en las “Recomendaciones de uso de áridos fabricados con RCD’s” se proponen las mismas secciones de firmes para carriles bici con materiales reciclados en función del tipo de pavimento requerido (flexible, semirrígido o rígido) y la categoría de explanada:

		ESQUEMA DE FIRMES PROPUESTOS								
TIPO		FLEXIBLES			SEMIRRÍGIDOS			RÍGIDOS		
SUBTIPO		FL-1	FL-2	FL-3	SR-1	SR-2	SR-3	R-1	R-2	
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1, BAJA									
	E2, MEDIA									

MB: Mezcla bituminosa; ZA: Zahorra artificial; SC: Suelo-cemento; HM: Hormigón magro; GC: Grava-cemento; HF: Hormigón de firme; ZARHor: Zahorra artificial reciclada de hormigón; ZARM I: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo I de RCD; ZARM II: Zahorra artificial reciclada mixta Tipo II de RCD; HCR: Hormigón seco compactado reciclado de RCD; SCR: Suelo-cemento reciclado de RCD; TS: tratamiento superficial; BA: baldosa/adoquín

Figura 28. Tipo de secciones de firmes para vías ciclistas

Fuente: “Catálogo de firmes y unidades de obra con áridos reciclados de Residuos de Construcción y Demolición (RCD)”

A continuación, se especifican ciertas características que tienen que cumplir los materiales más habituales empleados en la capa de rodadura de estos firmes aunque en esta capa no es habitual el empleo de árido reciclado:

Mezclas bituminosas

Consiste en una mezcla bituminosa en caliente colocada sobre una capa de material granular. Aunque el grueso de las capas puede variar en función del tipo y el volumen de tráfico previsto y de la calidad de la explanada, se recomienda un espesor entre 3-5 centímetros para la capa bituminosa y una capa granular de todo-uno artificial o suelo-cemento de espesor 15-30 centímetros. Es recomendable utilizar mezclas bituminosas de color con adición de óxido de hierro (mezclas rojas) o de cromo (mezclas verdes).

También se aconseja limitar el tamaño máximo del árido a 8 mm para evitar la segregación y mejorar



la manejabilidad del aglomerado. El betún deberá ser lo menos duro posible y el betún de penetración 80/100 se considera adecuado. Es importante asegurar una buena compatibilidad árido-ligante.

Tratamientos superficiales

Sobre la superficie de una capa de todo-uno artificial se aplica un ligante bituminoso, seguido de la extensión y compactación de una capa de gravilla. El espesor del conjunto puede variar en función del tipo y volumen de tráfico previsto y de la calidad de la explanada. Es recomendable utilizar ligantes bituminosos de color con adición de óxido de hierro (mezclas rojas) o de cromo (mezclas verdes).

Se trata de una estructura económica pero su ejecución en obra deberá ser muy cuidadosa y cumplir escrupulosamente las prescripciones del PG-3.

Hormigón in situ

La capa de tráfico consiste en una losa de hormigón en masa (o con placas prefabricadas), tendido directamente sobre la explanada o sobre una capa de material granular. La plataforma sobre la que va a colocarse el hormigón deberá tener una buena capacidad portante para evitar la rotura de las losas. El grueso de la losa puede variar en función de la calidad de la explanada y de si se coloca o no una capa de material granular intermedia, aunque se recomiendan losas de entre 5 y 10 centímetros. Es aconsejable disponer de juntas de retracción transversal cada 5 metros y no es necesario colocar ningún tipo de mallazo o armadura en el hormigón.

Adoquines y baldosas

Consiste en la colocación de adoquines o baldosas sobre una capa de hormigón, arena o mortero tendida sobre la explanada. Se escogerá un tipo de adoquín o de baldosa antideslizante para obtener una adherencia adecuada con la superficie mojada. El relleno de las juntas se hará con arena fina o con mortero. Deberá prestarse una atención especial al drenaje, ya que el agua puede arrastrar los finos de la plataforma y de las juntas y facilitar con ello el desprendimiento de los adoquines y losetas.

Son pavimentos de coste elevado, tanto de implantación como de mantenimiento. Necesitan un encintado de bordillo a cada lado del carril, para evitar que los adoquines y losetas se separen y se degraden los bordes. Estos encintados no deben formar escalón con el pavimento del carril bici. Se trata de una estructura reservada casi exclusivamente a tramos cortos y con condicionantes estéticos o de integración con el tráfico peatonal. Resulta adecuada, intercalada en un pavimento continuo, como contraste para resaltar puntos singulares como, por ejemplo, un paso de peatones, un cruce con otras vías, etc.

Pavimentos suelo cemento

Consiste en extender una capa, de todo-uno artificial o sablón, estabilizada con un ligante hidráulico, en una proporción variable (de 3 a 6%). El grueso de la capa de material granular puede variar en función de la calidad de la explanada, aunque se aconseja que sea entre 15 y 20 centímetros. El grado de compactación de la capa de material granular será de, al menos, un 98% del Proctor Modificado.



2.5 Árido reciclado en huecos mineros

2.5.1. Normativa

La Ley 22/1973, de 21 de julio, de Minas, y el Real Decreto 975/2009, de 12 de junio, sobre gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras, establecen la obligatoriedad de presentar ante la autoridad competente, en minería un plan de restauración del espacio natural afectado por las labores mineras previo al otorgamiento de una autorización, permiso o concesión.

En el artículo 13 del **Real Decreto 975/2009**¹, “Parte II: Medidas previstas para la rehabilitación del espacio natural afectado por la investigación y explotación de recursos minerales”, establece que:

“Cuando la entidad explotadora rellene con residuos de procedencia no minera el hueco de explotación, ya sea en superficie o por laboreo de interior, registrará y certificará, sin perjuicio de la normativa vigente de residuos y, en particular, la correspondiente a la eliminación mediante depósito en vertedero, que les será de aplicación, el origen y naturaleza de estos residuos, anotándose en el Libro de Registro definido en el artículo 32, que estará a disposición de la autoridad competente.”

No sólo la legislación de minería establece condiciones para la restauración de huecos mineros, sino que también se menciona en las regulaciones de residuos. Por ejemplo, el **Decreto Foral 23/2011, que regula la producción, posesión y gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD) en el ámbito de Navarra**, establece que se puede usar RCD en la restauración o en obras de acondicionamiento o relleno, siempre y cuando hayan sido sometidos a un tratamiento con objeto de aprovechar como mínimo los materiales pétreos (hormigón, cerámica ...) y haberles sido retirada la totalidad de los residuos peligrosos y todos aquellos no peligrosos no inertes, salvo que en el proyecto de restauración aprobado se especifiquen los tipos y características de los residuos inertes que pueden ser utilizados. Sin embargo, actualmente en Navarra, los huecos mineros sólo se están autorizando a recuperarlos mediante materiales naturales excavados o bioestabilizados de gestores autorizados como establece la **“Guía Técnica de Aplicación: Gestión de RCD y Materiales Naturales Excavados”**.

En Comunidades Autónomas como el País Vasco no establecen el uso de RCD para la restauración de espacios degradados ya que consideran que los áridos reciclados pueden tener un uso más noble por el proceso de valorización que han tenido. Por tanto, emplear en una restauración de espacio degradado un árido reciclado que ha tenido un tratamiento completo puede conllevar un impacto ambiental asociado al proceso de tratamiento mayor que el beneficio de su uso final.

Teniendo en cuenta esta reflexión, es interesante la **“Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)”** publicada en 2018 a nivel estatal que recomienda la restauración con materiales de rechazo del precibado de finos. Tal y como se incluye

¹ <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2009-9841>



en la guía, este material se suele emplear para usos poco exigentes como relleno de jardines, camas de asiento de tuberías, etc., aunque por lo general es difícilmente comercializable siendo eliminado en vertedero o acopiado en las plantas de tratamiento; llegando a ser volúmenes muy elevados. En los siguientes apartados se desarrollará las conclusiones sobre estos materiales basado en 30 muestras de este tipo de RCD obtenidas in situ en plantas de reciclaje fijas de gestores autorizados distribuidos por diversas comunidades autónomas, ninguna dentro de la Comunidad Foral de Navarra.



Figura 29. Distribución de las plantas de reciclaje de gestores autorizados donde se han tomado las muestras para la caracterización del precribado de los finos

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)

Los criterios, procedimiento y pruebas en los que se basó esta Guía para la determinación de la idoneidad y carácter inerte de los RCD del precribado de finos fueron los establecidos en el Real Decreto 646/2020 en el que se fijan los valores o requisitos que deben cumplir los residuos para ser admitidos en vertederos de inertes. En la Guía se establece que cuando los residuos no hayan sido previamente seleccionados, no procedan de un flujo único (única fuente) de un único tipo de residuo, existan evidencias de contaminación con sustancias peligrosas (ya sea tras una inspección visual, ya sea por el origen del residuo) o simplemente cuando existan dudas sobre el carácter inerte de los residuos, será necesaria la realización de pruebas o ensayos de laboratorio para la **caracterización de la lixiviabilidad** de los residuos y la determinación del **contenido total de ciertos parámetros orgánicos**, para su posterior comparación con los umbrales o valores límite establecidos en dichos ensayos para los residuos inertes. En el caso de las muestras de rechazo de RCD que han servido para



la redacción de la Guía han sido catalogados como residuos no inertes no peligrosos y, por tanto, se aconseja la necesidad de caracterizar este residuo.

2.5.2. Propiedades generales

La “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” establece requisitos necesarios tanto del espacio a restaurar como de los materiales a emplear, así como las fases a realizar para una *restauración completa*.

A la hora de valorar la idoneidad del espacio receptor previa a la propuesta de redacción de un proyecto de relleno se proponen unos criterios de exclusión y una escala de ponderación en diferentes condicionantes. En esta fase previa, y tal como indica la Guía, se debe tener en cuenta la situación administrativa del espacio, su localización y delimitación, así como el estado en el que se encuentra, características constructivas y accesos. Además, conocer la geometría de partida del hueco minero permite estimar la capacidad o volumen de RCD que puede acoger, el diseño del relleno y del drenaje y la planificación de las diferentes fases del mismo. Por tanto, es fundamental realizar un análisis de las siguientes características:

- ✓ Medio natural del espacio.
- ✓ Su topografía y relieve: Siendo las pendientes un factor clave para el uso final de la restauración: agrícola, forestal, etc.
- ✓ Geología y geomorfología. Fundamental para la estabilidad tanto en fase de relleno como final y para conocer su potencialidad como barrera natural ante las aguas de percolación o freáticas.
- ✓ Hidrogeología: Enfocado fundamentalmente a valorar las posibilidades de entrada de aguas subterráneas y la infiltración de lixiviados desde el relleno hacia los sistemas acuíferos.
- ✓ Climatología: Sirve de base para el estudio de la hidrología y el diseño de infraestructuras de drenaje y para el estudio de vegetación a implementar en la restauración.
- ✓ Hidrología: Enfocado en el estudio de agua superficial del entorno: ríos, arroyos, lagunas, manantiales, etc.
- ✓ Edafología del entorno.
- ✓ Medio biótico del entorno.
- ✓ Paisaje e incidencia visual.
- ✓ Usos del suelo y afecciones territoriales. Es necesario evaluar cómo puede afectar la restauración con otros instrumentos de ordenación como los Planes de ordenación del territorio (POT) o planeamientos urbanísticos locales.

El estudio del espacio permite la redacción o modificación del **Plan de Restauración**. Hay que destacar que la **restauración con RCD**, al considerarse una operación de valorización, **siempre debe contar con la autorización y condicionantes prescritos por la autoridad ambiental competente**



de la comunidad autónoma antes del inicio de la misma. No obstante, no exige que el Plan de Restauración tenga que ser aprobado por otros organismos competentes según corresponda.

Una vez que obtenga todas las autorizaciones, el proceso de restauración inicia con el **acondicionamiento del espacio** que incluye tareas de limpieza, de mejora de la estabilidad de los taludes del hueco y de regularización de la superficie del fondo del lugar. Tras ello, se debe realizar la **estanqueidad físico-química del hueco y sistemas de drenaje internos**. Según la *“Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)”*, las condiciones geológicas de permeabilidad y espesor mínimo del fondo del hueco adecuadas para garantizar la estanqueidad son:

- ✓ Para residuos inertes: $k = 1,0 \times 10^{-7}$ m/s en un espesor de 1 m.
- ✓ Para residuos no peligrosos: $k = 1,0 \times 10^{-9}$ m/s en un espesor de 1 m.

Si estos parámetros cumplen, la barrera geológica natural es suficiente, aunque puede ser necesario un perfilado de su superficie.

En caso contrario, si los requisitos de permeabilidad y espesor no se cumplen, será necesario hacer una barrera geológica artificial de espesor mínimo de 0,50 metros. Además, en el caso de rellenos con residuos no peligrosos, deberá añadirse como refuerzo un geosintético (geomembrana) de



Figura 30. Esquema de referencia de restauración de huecos mineros con residuos inertes.

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD).

impermeabilización.

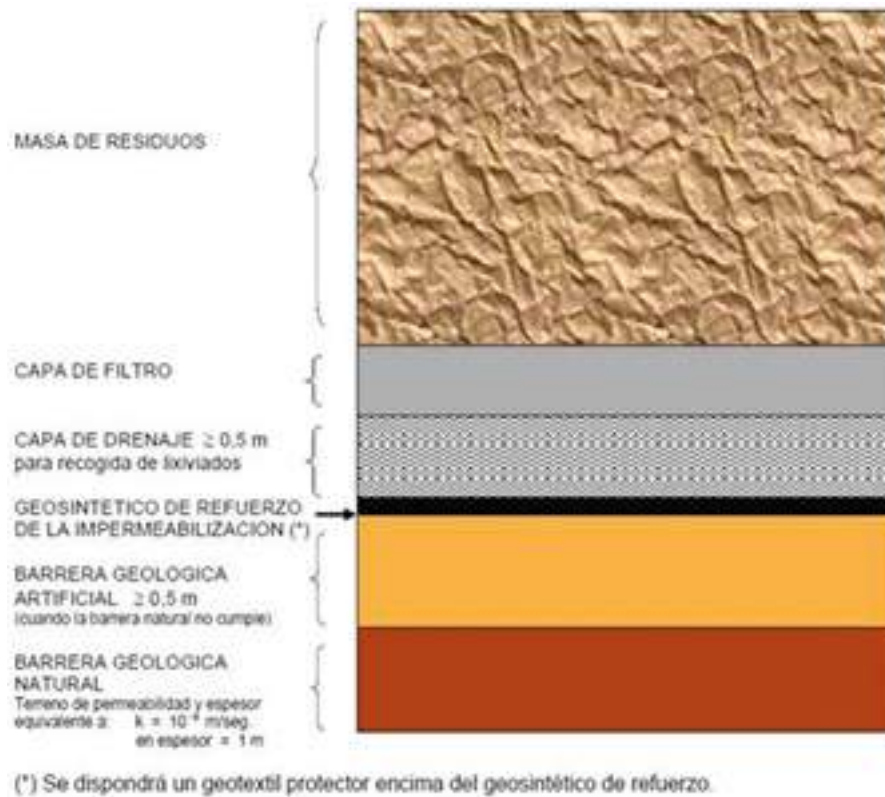


Figura 31. Esquema de referencia de restauración de huecos mineros con residuos no peligrosos.

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD).

Estas características sobre la impermeabilización del espacio receptor son las mismas que las establecidas en el artículo 9 del Decreto Foral 23/2011 sobre restauración o relleno con residuos inertes de la Comunidad Foral de Navarra.

De todos modos, en la Guía se deja abierta la posibilidad de que el órgano competente en minería de la comunidad autónoma en donde se ubique el hueco minero podrá, en casos bien justificados, reducir o modificar los requisitos exigidos en las soluciones de referencia, y siempre y cuando la autoridad ambiental competente de la comunidad autónoma esté de acuerdo y lo refleje en su informe preceptivo del Plan de Restauración. La experiencia piloto del proyecto RCdiGreen sobre restauración de huecos mineros con rechazo tiene como objetivo analizar el lixiviado generado en diferentes medios con el fin de evaluar la necesidad de introducir o modificar esta capa de impermeabilización. A falta de las conclusiones, se deberán tener en cuenta las necesidades de estanqueidad mencionadas con



anterioridad.

Para realizar la **barrera artificial** se recomienda que se aporte una primera capa de regularización de espesor mínimo 0,10 metros, formada por materiales granulares compactados del tipo zahorras, cuyo objetivo es regularizar la base sobre la que se asentará la primera capa de arcilla. En caso de fondos muy irregulares, donde el aporte de este material puede suponer grandes cantidades, se recomienda combinarlo con materiales de la propia explotación minera (restos de material explotado, derrubios de talud, y materiales excavados durante el saneamiento).

Bien haya barrera natural o artificial se deberá realizar una **capa de drenaje** interna con pendientes **mínimas** del 2% (tras los máximos asientos previsibles). Deben cubrir tanto el fondo como los taludes y el nivel de lixiviados ha de ser siempre inferior al espesor de la capa drenante. Los elementos de drenaje pueden ser: capas de gravas, geosintéticos de drenaje o geodrenes, y tuberías. La red de tuberías se aconseja que preferentemente tenga un esquema en espina de pez distanciadas 20 m como máximo unas de otras y que haya un único punto de salida, donde se ubicará la arqueta de registro, y que, en caso de existir, se conectará mediante drenes externos con la balsa de lixiviados. El sistema de recogida de lixiviados puede ser no necesario siempre y cuando no suponga un riesgo admisible para el medio ambiente y tenga la validación de las autoridades competentes.

Los materiales de drenaje deben estar protegidos contra la invasión de partículas finas que pueden originar su colmatación mediante una **capa filtro**. Los materiales más habituales en esta capa son geotextiles o arena.

A continuación, se procederá al **relleno** propiamente dicho. En el caso de requerirse la impermeabilización de los taludes, las labores de relleno del hueco se deberán realizar necesariamente en fases secuenciales. De modo general, en todas las fases, los materiales deberán depositarse en tongadas de espesor entre 20 y 50 cm, aunque se recomienda 30 cm, una vez compactadas. La compactación puede realizarse, en principio, mediante rodillos lisos; debiéndose alcanzar en el material una densidad Proctor del 95%. Las tongadas, además, deberán quedar con una pendiente transversal que facilite la evacuación de las aguas pluviales y evite la creación de puntos bajos por donde se pueda infiltrar el agua. Conforme se vaya incrementando la altura de relleno, es conveniente disponer bermas de anchura superior a 4 metros, con un máximo desnivel entre ellas no superior a 20 m, de modo que mejore la estabilidad de

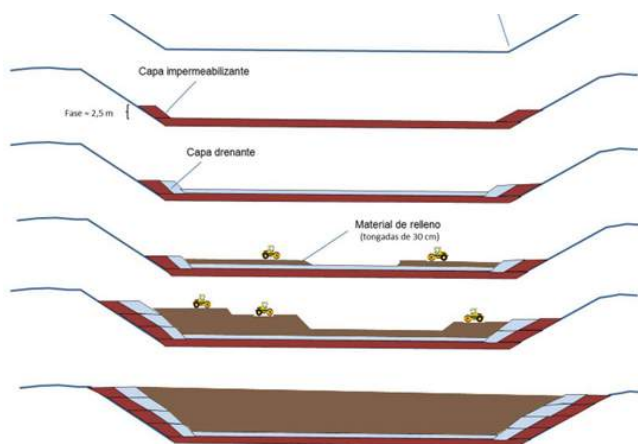


Figura 32. Proceso general de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo.

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)



la masa de vertido y se facilite el acceso. La figura 32 muestra el procedimiento habitual de relleno de un hueco minero.

Para disminuir la cantidad de los lixiviados, la Guía recomienda una **capa de sellado** sobre todo si los residuos son catalogados como no peligrosos. De esta forma se podría dismantelar la balsa de lixiviados ya que el remanente de lixiviados será muy pequeño y se podrá controlar periódicamente en la arqueta de registro.

Cuando se ha realizado un relleno con RCD inertes y en un entorno cuyas características químicas no corran riesgo de verse afectadas por los lixiviados que pudieran generarse, será posible prescindir de capas de regularización, impermeabilización y drenaje y de la capa de sellado empleándose únicamente una capa de cobertura destinada a ser el soporte de la vegetación o del uso del suelo que se le quiera dar.

En términos generales, la estabilización de las capas de clausura y/o sellado mediante vegetación es el medio más económico, además de que proporciona una capacidad de evapotranspiración beneficiosa desde el punto de vista de la minimización de entradas de agua hacia el cuerpo del relleno. Esta capa debe garantizar las necesidades básicas para la vegetación y no será inferior a 1 metro si el relleno ha sido realizado con residuos no peligrosos.

Otro aprovechamiento final del espacio puede ser agrícola. En este caso, las áreas en las que se quiere instaurar han de tener una pendiente máxima de 5° (10%), y menos de un 40% de elementos gruesos inicialmente. Además, convendrá tener un perfil de suelo de un metro o más y realizar labores de descompactado.

Para el establecimiento final de pastizales mejorados la limitación de pendiente es ya de 25% (unos 15°), valor que a su vez marca aproximadamente el límite para el empleo de una sembradora de pratenses.

La recuperación de un uso forestal en aquellos huecos que afectaron a terrenos originalmente forestales o que se encuentran rodeados de ellos, parece adecuado. Como máximo la pedregosidad debe ser del



60%. En lugares favorables a la plantación forestal, los factores biológicos pueden ser más limitantes que los factores físicos y químicos.

2.5.3. Materiales

En función de la finalidad que tenga la capa deberán cumplir diferentes requisitos. A continuación, se resumen los requisitos recomendados para materiales granulares en las capas de estanqueidad, drenaje y filtro establecidos en la “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)”:

CAPA	REQUISITOS RECOMENDABLES EN LA GUÍA
Barrera geológica artificial*	Densidad seca mínima correspondiente al 95% del Ensayo Proctor Modificado
	Humedad en el intervalo -1, +3 con relación al ensayo Proctor Modificado
	Cernido en tamiz 0,08 mm: >30% en peso
	Índice de plasticidad: 10- 30
	Tamaño máximo: 20 mm
	Contenido de elementos > 2mm: <40%
	Contenido de M.O.: < 1% en peso
Capa drenante de gravas	El coeficiente de permeabilidad hidráulica será mayor de 10-2 m/s.
	El contenido de finos (<0,08 mm) no sobrepasará el 5%.
	El coeficiente de uniformidad será menor de tres.
	El tamaño de árido se encontrará preferentemente en el rango de 2 a 4 cm.
	Si su ubicación se hace sobre una geomembrana impermeable, protegida con geotextil, el árido que esté en contacto con ella cumplirá las condiciones de resistencia a punzonamiento.
Filtro granular con arena	Flujo adecuado: el d85 (tamaño de malla por el que pasa el 85%) de la arena debe ser mayor que cinco veces el d15 (tamaño de malla por el que pasa el 15%) de las gravas drenantes.
	Retención adecuada: el d15 de la arena debe ser menor que cinco veces el d85 de los finos arrastrados por el lixiviado.

* En caso de ser necesaria

Tabla 42. Requisitos para los materiales granulares en las capas de estanqueidad, drenaje y filtro
Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)

Tras esta preparación del vaso, se llevará a cabo el **relleno** propiamente dicho. La “Guía española de áridos reciclados procedentes de RCD” establece que el empleo en rellenos de restauración de espacios degradados es fundamentalmente mixto-cerámico de fracción todo uno y media (gravilla y grava) y la “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” recomienda la fracción “todo uno” hasta un tamaño máximo de 100 mm, considerándose tal vez las fracciones de 0-20 mm o de 0-40 mm las más óptimas. Los RCD de precibado mixto-cerámicos y de hormigón cumplen estas últimas condiciones por lo que constituye un material apto para su uso en el relleno de huecos de explotación minera.

La “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” caracteriza el material de forma técnica similar al uso en rellenos y a nivel medio ambiental mediante



la lixiviación del material. Para la primera caracterización, se basa en las especificaciones contempladas en el artículo 330 sobre terraplenes del “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3)”, aunque hay que destacar que esta normativa no está desarrollada con el fin de establecer especificaciones para el relleno de huecos mineros. Basándose en la clasificación de este artículo, la “Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)” establece que los rechazos de las plantas analizadas serían:

- ✓ 63%: Suelo tolerable.
- ✓ 30%: Suelo marginal.
- ✓ 7%: Suelo adecuado.

Las características de estos tipos de suelos que contempla el PG-3 se resumen en el apartado 2.2 de este documento. Además, se analiza que la capacidad portante del relleno mediante la obtención del CBR por la fórmula empírica propuesta por la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) es aceptable para rellenos. También se han caracterizado estos materiales como no colapsables, ni expansivos por medio del ensayo de colapso en suelo, UNE 103406, y del ensayo hinchamiento libre de un suelo en edómetro, UNE 103601. Estas características contribuyen a aportar mayor estabilidad geotécnica.

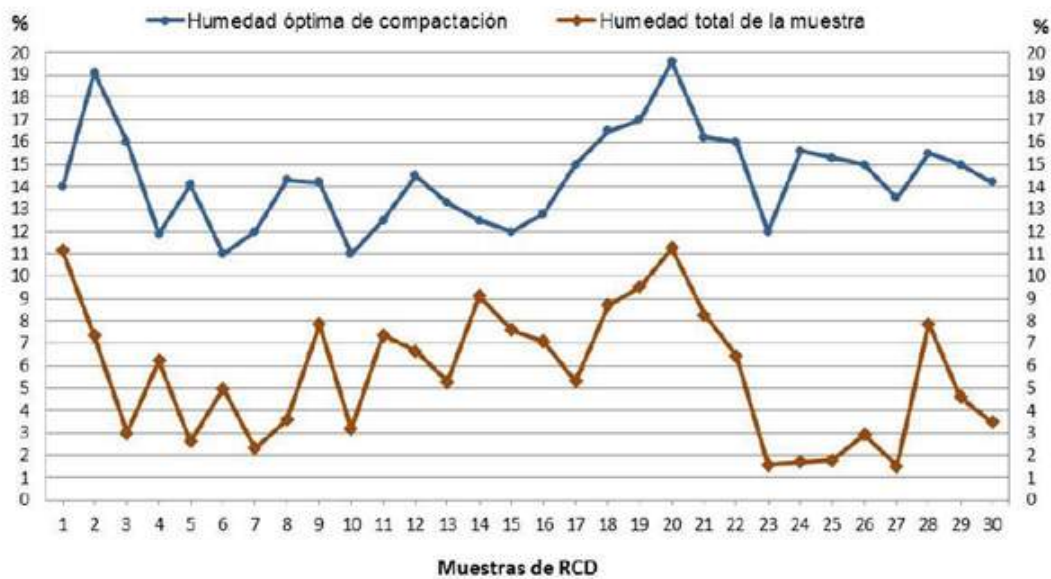


Figura 33. Proceso general de relleno del hueco minero con impermeabilización de huecos y taludes del mismo.
Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)



Además, la compactación es clave para la estabilidad del relleno, teniendo que realizarse el ensayo Proctor normal, según la norma UNE 103500. En general, en los RCD se deberá aumentar la humedad para lograr la humedad de compactación óptima debido a su alta absorción.

Desde una perspectiva medioambiental, la Guía caracteriza la lixiviación de los residuos mediante el método de ensayo UNE-EN 12457-4. En caso de superarse el valor límite de lixiviación para categorizarlo como residuo inerte del anterior ensayo, se analiza los contaminantes potenciales mediante el ensayo de percolación según el método prEN 14405.

Los límites que se permiten en ambos ensayos son los establecidos en la figura 34. Además, se incluye el análisis de los parámetros orgánicos, cuyos límites se muestran en la figura 35, y que se obtuvieron mediante estos ensayos:

- ✓ UNE-EN 13137. Caracterización de residuos. Determinación del carbono orgánico total (COT) en residuos, lodos y sedimentos.
- ✓ UNE-EN 15308. Caracterización de residuos. Determinación de bifenilos policlorados (PCB) seleccionados en residuos sólidos utilizando cromatografía gaseosa capilar con detección por captura de electrones o espectrometría de masas.
- ✓ UNE-EN 15527. Caracterización de residuos. Determinación de hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA) en residuos por cromatografía en fase gaseosa/espectrometría de masas (CG/EM).

Es importante citar que la Guía deja abierto a la elección de estos ensayos u otros a la autoridad ambiental competente de cada comunidad autónoma. Es más, la Guía destaca que aunque en las fichas se recoja el análisis de contaminantes orgánicos, estos solamente deben solicitarse en el caso de que todos los parámetros medidos en la lixiviabilidad den como resultado un residuo inerte, si los resultados de Carbono Orgánico Total y/o Carbono Orgánico Disuelto resultaran elevados, o si hubiera indicios de paso de maquinaria u otra actividad que pudiera dar como resultado la contaminación de los RCD, a juicio del organismo competente en materia de medio ambiente de la comunidad autónoma correspondiente.



Componente	Ensayo de lixiviación UNE-EN 12457-4 L/S = 10 l/kg (mg/kg de materia seca)	Ensayo de percolación prEN 14405 C ₀ (mg/l)
As	0,5	0,06
Ba	20	4
Cd	0,04	0,02
Cr Total	0,5	0,1
Cu	2	0,6
Hg	0,01	0,002
Mo	0,5	0,2
Ni	0,4	0,12
Pb	0,5	0,15
Sb	0,06	0,01
Se	0,1	0,04
Zn	4	1,2
Cloruro	800	450
Fluoruro	10	2,5
Sulfato	1.000*	1.500
Índice de fenol	1	0,3
COD**	500	160
STD***	4.000	--

Figura 34. Límites de lixiviación para residuos inertes establecidos en la Orden AAA/661/2013
Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)



Parámetro	Valor límite (mg/kg de materia seca)
COT (carbono orgánico total)	30.000*
BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos)	6
PCB (policlorobifenilo, 7 congéneres)	1
Aceite mineral (C10 a C40)	500
HPA (hidrocarburos policíclicos aromáticos, 16 congéneres)**	55

* En el caso de la tierra, previa conformidad del órgano ambiental competente de la Comunidad Autónoma podrá aplicarse un valor límite más alto siempre que el carbono orgánico disuelto (COD) alcance un valor máximo de 500 mg/Kg a L/S = 10 l/kg, bien con el pH propio del residuo o con un pH situado entre 7,5 y 8.

** Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)Fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno.

Figura 35. Límites del contenido total de los parámetros orgánicos para residuos inertes según la Orden AAA/661/2013

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)

Se deberá hacer un protocolo de aceptación y la identificación de los residuos, previa a su admisión. No se podrán admitir RCD que no se acompañen de un certificado que acredite que los mismos han sido sometidos a un tratamiento previo u operación de valorización por un gestor autorizado de RCD donde se garantice la limpieza de impropios (plásticos, madera, metales, etc.) y otros elementos contaminantes (materia orgánica, sustancias peligrosas, etc.).

Por último, la Guía también realiza unas recomendaciones para las capas de sellado en función del uso final que vaya a tener:



USO	RECOMENDACIONES DE LA GUÍA
Capa de sellado con vegetación*	Porcentaje de elementos gruesos (>2mm).
	Porcentaje de humedad después de secado en estufa.
	Análisis granulométrico de la fracción tierra fina (tamizado en seco, más método de la pipeta de Robinson o automatizado) para determinar las fracciones según criterio USDA-SCS.
	Contenido en materia orgánica.
	pH en suspensión suelo/agua 1:2,5 ó 1:1.
	Capacidad de intercambio catiónico.
	Cationes ácidos de cambio (acidez cambiante).
	Cationes básicos de cambio (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ y Na ⁺ de cambio).
	Prueba previa de salinidad (conductividad eléctrica en extracto suelo/agua 1/5).
	Determinación de la capacidad de retención de agua disponible: capacidad de retención de humedad a 33 kPa (0,33 atm) y 1500 kPa (15 atm) en la fracción tierra fina.
	Contenido en sulfato soluble medido mediante el ensayo EN 12457-4.
	Contenido "total" en elementos traza medido por digestión ácida.
	**Se rechazará el material cuando:
	Más de 60% de elementos gruesos.
	Textura USDA excesivamente arenosa, arcillosa o limosa.
	pH<5,5 o pH>8,5.
Menos de 1% de materia orgánica.	
Saturación del complejo de cambio por Al superior al 60%.	
Saturación del complejo de cambio por Na superior al 15%.	
Capacidad de intercambio catiónico inferior a 10 cmol(+)/kg.	
Salinidad como máximo ligera.	
Máximo contenido en sulfatos solubles de 1000 mg/kg medidos mediante el ensayo EN 12457-4.	
Contenido en elementos traza superior al nivel genérico de referencia establecido para "otros usos" en la comunidad autónoma correspondiente.	
Capa de sellado con uso final agrícola	Libre de toxicidades por metales pesados y salinidad, con pH entre 5,6 y 7,8 preferiblemente
	Contenido mínimo de N: 0.15%
	Contenido de M.O.: > 2%.
	Capacidad de intercambio catiónico: > 15 cmol(+)/kg.
	Nivel medio en P y K asimilables.
Capa de sellado con uso final de pastizal	pH adecuado: 6,6-7,3
	Niveles de fertilizantes: medios

* En determinados casos, y siempre con la autorización de la autoridad competente, pueden usarse RCD inertes como materiales básicos para la construcción de las coberturas edáficas, preferiblemente en capas no superficiales. Para ello, han de tener propiedades adecuadas y cumplir todos los requisitos anteriores.

** Salvo cuando la comparación con los valores obtenidos en suelos del entorno justifique su aceptación

Tabla 43. Requisitos generales para la capa de sellado

Fuente: Guía para la rehabilitación de huecos mineros con residuos de construcción y demolición (RCD)

A photograph of a dirt path winding through a dense forest. The trees are tall and thin, with green foliage. The ground is covered in fallen leaves and small plants. A large, semi-transparent green circle is overlaid on the left side of the image, partially obscuring the path and trees. The text "3. Recomendaciones ambientales" is centered in white on the path.

3. Recomendaciones ambientales



3.Recomendaciones ambientales

3.1. Introducción

Aunque de forma inicial se podría pensar que el contenido de contaminantes que tiene un árido reciclado va a determinar la contaminación que produce, diferentes estudios han demostrado que rara vez es así. Existen otros factores que influyen en la liberación de los contaminantes como son la configuración del material en la que se encuentren, la aportación posible de otras sustancias y el medio en el que se encuentren. Por tanto, para el estudio potencial de emisión de contaminantes que puede tener un árido reciclado hay que centrarse en su lixiviación, definida como la extracción de los componentes solubles del árido reciclado en el agua u otro disolvente.

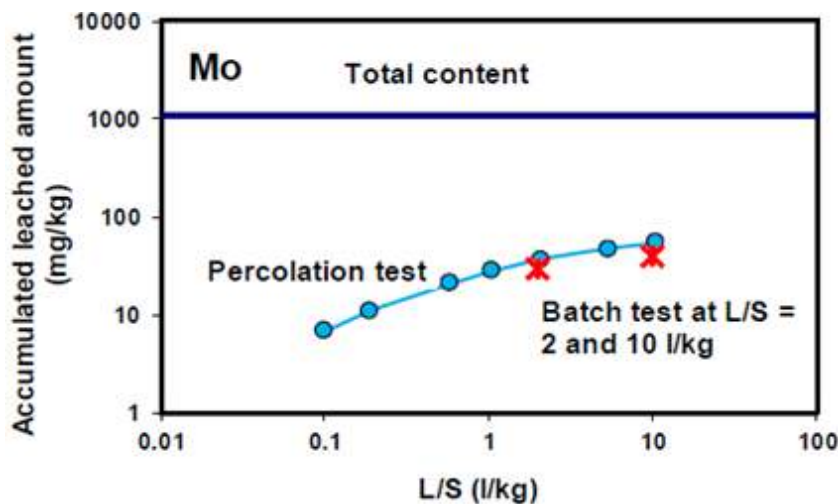


Figura 36. Comparativo del contenido de Molibdeno, del resultado de ensayo de percolación y de la prueba por lotes.
Fuente: Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive¹

La determinación de la lixiviación se realiza mediante ensayos en laboratorio que tratan de reproducir en modelos a pequeña escala los diferentes escenarios reales. Sin embargo, se da la circunstancia de que se ha desarrollado una amplia variedad de ensayos de lixiviación (más de 50 en todo el mundo) cuyos resultados no son siempre comparables. Esta circunstancia ha contribuido a dificultar la sistematización de métodos para la caracterización ambiental de los áridos reciclados. Además, en el caso de la Unión Europea, la evolución en cada Estado miembro se ha desarrollado a diferente ritmo y encaminada a diversos fines como pueden ser:

- ✓ La creación de criterios para la condición fin de residuo como en el caso de Reino Unido.
- ✓ La fijación de límites de lixiviación o contenido total en función de su carácter como producto de construcción como han realizado en Países Bajos o Alemania.
- ✓ La fijación de límites como residuo que ha sido la opción adoptada por la mayoría de los países miembros.

¹ <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91036>



A modo de ejemplo, en la tabla 44 se establece un resumen del desarrollo de criterios que tenían algunos Estados miembros en 2014:

PAÍS MIEMBRO	¿DISPONE DE CONDICIÓN FIN DE RESIDUO?	¿DISPONE DE REGULACIÓN PARA ÁRIDOS RECICLADOS?	¿DISPONE DE CRITERIO SOBRE EL CONTENIDO TOTAL DE CONTAMINANTES?	¿DISPONE DE CRITERIOS DE LIXIVIACIÓN?	TIPOS DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN REQUERIDOS
Austria	No	Guías	Sí	Sí	EN-12457-4 (L/S = 10 l/kg)
Bélgica	No	Sí, en la región Flamenca	Sí	Sí	CEN/TS 14405 (L/S = 10 l/kg)
República Checa	No	Basada en legislación de vertedero ¹	Sí	Sí	EN-12457-4 (L/S = 10 l/kg)
Dinamarca	No	Sí	Sí	Sí	EN-12457-1
Finlandia	No	Sí	Sí	Sí	CEN/TS 14405; EN 12457-3 (L/S = 10 l/kg)
Francia	No	Sí	Sí	Sí	EN 12457-2 y EN 12457-4 ²
Alemania	No	Guías y en preparación de nueva regulación	Sí	Sí	EN 12457-2 y DIN 19528
Hungría	No	Alguna	No	Sí	Desconocido
No	Sí	No	Sí	Sí	EN-12457-2 (L/S = 10 l/kg)
Países Bajos	Sí	Sí	Sí	Sí	CEN/TS 14405 (L/S = 10 l/kg)
Polonia	No	No	No	No	-
Portugal	No	Alguna guía	No	No	-
Eslovaquia	No	No	No	No	-
España	No	Sí, a nivel regional	No	Sí	EN-12457-4 y DIN 38414-S4
Suecia	No	Guías	Sí	Sí	CEN/TS 14405
Reino Unido	Sí	Guía, caso a caso	No	No	Variable sin una especificación concreta

¹ Considera la adopción de la guía Austriaca.

² Para pruebas de cumplimiento (CEN/TS 14405 para la caracterización básica)

Tabla 44. Criterios sobre los residuos de construcción en Estados miembros de la Unión Europea.

Fuente: 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



Actualmente, el desarrollo de guías y criterios ha evolucionado en todos los países. En el caso concreto de España, de forma general los requisitos ambientales adaptados en varias comunidades autónomas para los RCD están basados en los criterios de admisión en los vertederos para residuos inertes establecidos en el Real Decreto 646/2020¹, de 7 de julio, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero.

No obstante, en ciertas aplicaciones de construcción los requisitos para los áridos reciclados son iguales o similares a los de los áridos naturales incluyéndose la obligatoriedad de certificados como el mercado CE. En estos casos, se debe tratar el árido reciclado como un producto de construcción. Desde la Unión Europea se ha normalizado que estos productos de construcción deben incluir datos sobre la liberación de sustancias peligrosas que pueden producir y documentarlo dentro de sus prestaciones. Actualmente, en España, se está tramitando la adaptación de estas normas europeas a nivel estatal.

Por otro lado, se está avanzando a nivel estatal con las bases para marcar criterios para la condición fin de residuo tal y como se incluye en el Proyecto de Ley de Residuos y Suelos Contaminados, que sustituirá a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados. Hay que tener en cuenta que a día de hoy la mayoría de criterios ambientales existentes se basan en la condición de residuo ya que se basa en los criterios de admisión a vertederos inertes. Por tanto, alcanzar la condición de fin de residuo puede generar cambios en los requisitos ambientales a exigir.

¹ <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-7438>



3.2. Principales contaminantes de los residuos de construcción

Numerosos estudios han sido orientados a determinar los principales contaminantes que pueden generar los residuos de construcción y demolición. El “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” resumió orientativamente los principales contaminantes de diferentes residuos de construcción y demolición en función de dos tipos de ensayo de lixiviación, basado en lotes (L/S) y en la dependencia de pH. Los contaminantes que se establecieron para cada residuo fueron aquellos que superaron los valores límites de admisión de residuos inertes en vertederos. Estos contaminantes se deben considerar orientativos ya que el número de muestras de cada tipo de residuo fue diferente, originando mayor incertidumbre en aquellos residuos con menor número de muestras.

Aggregate	L/S dependence test (L/S = 10 l/kg)			pH dependence test (L/S = 10 l/kg)		
	Close to the limit	Partially exceeding	Consistently exceeding	Close to the limit	Partially exceeding	Consistently exceeding
Recycled concrete		Ba, Cr, Pb		Ba	Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V	Cr, SO4
Recycled bricks		SO4		Pb, Sb, Se	As, Cr	
Recycled glass		Cu, Pb	Sb	Ba	As, Cd, Cr, Ni	Pb, Sb
Mixed C&D waste		Cd, Cl, Pb		V	Cd, Cl, Cr, Pb, Sb, SO4, V	
Recycled asphalt				Se		
Blast furnace slag		SO4			Cr*, Sb**, Se**, SO4, V	
Basic oxygen furnace slag			V		Cd, Mo, Sb, Se	V
Electric arc furnace slag					Ba	Cr, Mo, V
Phosphorous slag		Mo, Pb, Sb, Se			Cd, Sb, Se	
Coal fly ash		As, Ba, Cd, Cl, Cr, Mo, Ni, Pb, V, Zn	SO4		As, Cd, Cr, Mo, Ni, V	Sb, Se, SO4
Coal bottom ash	As	Cd, Cr, Mo, Ni		As	Cd, Cr, Ni, SO4	
MSW incinerator fly ash		As, Cu, Cr, Ni, Sb, Se, Zn	Cd, Cl, F, Mo, Pb, SO4		As, Ba, Cu, Ni	Cd, Cl, Cr, F, Mo, Pb, Sb, Se, SO4, Zn
MSW incinerator bottom ash	Cd, Se, Zn	Cr, Mo, Ni, Pb, Sb, SO4	Cl, Cu		Cd, Cr, Ni, Pb, Se, Zn	Cl, Cu, Mo, Sb, SO4
Artificial aggregate	Cd, Mo, Pb, SO4, Zn	As, Cr, Mo, Se		Pb, Zn	As, Cr, Mo, Se	
Natural aggregate	Cd, Ni, V			As, Cd, Ni, Pb, Sb, Se, V		
Limestone						
Granulated tyres		Zn				

*: Seawater quenching **; Older data, possibly overestimation

Figura 37. Principales contaminantes de diferentes residuos de construcción y demolición basados en los límites de admisión de residuos inertes en vertederos y según los ensayos de lixiviación L/S y pH.

Fuente: 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



Si analizamos los datos de este estudio se concluye que el cromo, el plomo, los sulfatos, el cadmio y el cloro pueden ser los contaminantes más habituales en los áridos reciclados.

En el informe *“Chemical and Leaching Behavior of Construction and Demolition Wastes and Recycled Aggregates”*¹ se realiza un estudio de los principales contaminantes de los RCD y de los áridos reciclados una vez valorizados cuyas conclusiones son las siguientes:

- ✓ Contaminantes más habituales en RCD son Al, Fe, Cr, Mn y Si pero los más críticos en ensayos de lixiviación son: F, Cl, Ni, Cr y Pb.
- ✓ Contaminantes más habituales en áridos reciclados son Al, Cu, Cr y Zn pero los más críticos en ensayos de lixiviación son: SO₄, Cu y COD.
- ✓ La concentración de SO₄ procede de residuos mixtos (LER 170904) por la presencia de yeso, materiales cerámicos y mortero.
- ✓ El Cr procede del cemento y hormigón y por tanto más habitual en RCD con código LER 170101.
- ✓ Los contaminantes por COD proceden de todos los tipos de residuos: LER 170101, LER 170504, LER 170904.

Otro ejemplo, es *“End-of-Waste Criteria for Construction & Demolition Waste”*² elaborado por Norden sobre la Condición Fin de Residuo en los países nórdicos indica que:

- ✓ En Finlandia se ha identificado las siguientes sustancias nocivas en los residuos minerales de demolición: Cd orgánicamente ligado, Cd metálico, Hg metálico, Pb metálico, Pb orgánico, compuestos de PCB, compuestos de CFC, aceite y PAH, Cr y Mo, Cu.
- ✓ En Dinamarca se señalan los siguientes parámetros: Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, PCBs, chloroparafins, chlorofluorocarbons (CFC), hydrochlorofluorocarbons (HCFC) and hydrofluorocarbons (HFC), and sulphurhexafluoride (SF₆).

En España también ha habido estudios sobre los posibles contaminantes que se pueden generar comparándolos con la admisión de residuos inertes en vertederos. Por ejemplo, la *“Guía de áridos reciclados de residuos de construcción y demolición (RCD) de Andalucía Central”*³ estableció que tras varios ensayos en diferentes muestras de áridos reciclados los principales contaminantes son el Cr y SO₄. La *“Guía de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD)”* también concluye que los principales contaminantes en sus estudios son el Cr y el SO₄. Otro ejemplo, centrado en áridos reciclados mixtos, es el manual de *“Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición”* del País Vasco que establece como parámetros críticos en el empleo en aplicaciones no ligadas: molibdeno, sulfatos y bromuros.

A modo de resumen, se llega a la conclusión que los contaminantes potenciales de un residuo de construcción dependerán de la procedencia del residuo. Si es un residuo cuya composición es mayoritariamente cerámica será más previsible que se produzca contaminación por sulfatos y si procede de un residuo mayoritariamente de hormigón puede ser más probable contaminación por cromo. En general, los contaminantes más habituales son cromo, plomo, mercurio, cobre, cadmio y sulfatos.

1 <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/24/10326/htm>

2 <https://www.norden.org/en/publication/end-waste-criteria-construction-demolition-waste>

3 <http://www.aridosrcandalucia.es/rcd/wp-content/uploads/2016/11/GUIA-de-aridos-reciclados-de-construccion-y-demolicion-RCD-de-Andalucia-Central.pdf>



3.3. Condicionantes para el riesgo ambiental

Los riesgos o impactos que plantean los áridos (naturales, secundarios o reciclados) al medio ambiente y a la salud humana dependen de diversos factores:



Figura 38. Cadena de factores que influyen a que se origine un riesgo ambiental

Fuente: 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

Un factor dentro de esta cadena puede ser determinante para que se origine un riesgo ambiental o viceversa, paliar dicho riesgo ambiental. Por ejemplo, si se tiene un árido reciclado con un alto contenido de sulfatos expuesto de una forma no confinada podrá originar la contaminación del medio receptor. Sin embargo, si este árido reciclado está confinado el riesgo a que el lixiviado contamine el medio en el que se encuentra disminuye. En el mismo caso, si a su vez se tiene que el medio receptor es un suelo que ya contiene sulfatos, la suma de los sulfatos ya presentes y los aportados por lixiviación puede alcanzar un nivel excesivo que conduzca a la salinización del suelo. No obstante, el riesgo que se produciría en un suelo sin sulfatos puede ser la contaminación del mismo, pero sin alcanzar la salinización.

A continuación, se va a desarrollar un análisis de la influencia de cada factor de la cadena aunque el estudio adecuado para determinar el riesgo potencial es la combinación de ellos.

3.3.1. Fuente

La **fuentes** es clave para establecer el flujo del lixiviado que estará determinado por la cantidad de lixiviado y la concentración de sustancias en función del tiempo. Dentro del estudio de la fuente, y teniendo en cuenta el tiempo de exposición al que va a estar sometido, habrá que analizar:

- ✓ Forma de contacto del árido reciclado con el agua:
 - La configuración y distribución física del material: “consolidada” o “no consolidada”.
 - Tasas de precipitación.
 - Tasas de infiltración.
 - Entrada de agua adicional a la precipitación.
- ✓ Condiciones adicionales por su exposición en el medio que influyen en el lixiviado:
- ✓ El medio físico:
 - Condiciones mecánicas y geotécnicas.
 - Condiciones biológicas, si es relevante.
 - Las condiciones hidrogeológicas y climáticas.
 - Los usos del emplazamiento y si estos pueden variar en el tiempo.



- ✓ Características del árido reciclado:
 - Su naturaleza y su origen.
 - Su composición y sus propiedades químicas.
 - Sus propiedades físicas y geométricas.

Concretamente la configuración del material, si está “consolidado” o “no consolidado”, permite determinar el ensayo de lixiviación a realizar. Un material “consolidado” tiene una forma fija y durable en condiciones normales y su menor unidad volumétrica tiene como mínimo 50 cm³. Algunos ejemplos de estos materiales son el hormigón producido con árido reciclado o un suelocemento. Sin embargo, el material “no consolidado” es aquel que está formado por granos sueltos y no tiene una forma fija permanente o durable. A modo de ejemplo, los materiales no consolidados son el árido reciclado en el acopio de una planta o una subbase de una carretera ejecutada con árido reciclado.

La porosidad de los materiales “consolidados” o “no consolidados” influirá en el mecanismo del transporte del lixiviado. En el caso de los materiales “consolidados” el agua no fluye libremente a no ser que tenga poros accesibles por los que el agua pueda filtrar y disolver el material del interior de los poros. El material disuelto en el interior puede ser transportado a través de los poros comunicados hacia el exterior por un mecanismo de difusión. En el caso de materiales “no consolidados” que carezcan de poros, el mecanismo de lixiviación es la percolación y se produce el lavado del material; pero si el material granular “no consolidado” posee poros, además de percolación puede haber difusión. Basándose en estos criterios, el “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” establece 3 escenarios para determinar la elección de los ensayos de lixiviación:

TIPOS DE ESCENARIO EN FUNCIÓN DEL CONTACTO CON EL AGUA		MÉTODOS DE ENSAYO MÁS RELEVANTES		
	Material impermeable. El agua se desplaza por la superficie del material.	Prueba de tanque (DSL ¹ /DML ²)		Ensayo con dependencia del pH
	Baja permeabilidad del material. El agua filtra por el material por fuerzas de capilaridad y se desplaza también por la superficie del material	Prueba de tanque (DSL ¹ /DML ² , incluida CGL ³)		
	Material permeable. El agua infiltra a través del material por gravedad (ejemplo: materiales granulares)	Ensayo de percolación Prueba por lotes (para QC/FPC ⁴ o cumplimiento) CGLT para material granular grueso		or

NOTA: Estos ensayos muestran son válidos para materiales inorgánicos y algunos orgánicos.

1 DSLT: Prueba de lixiviación de superficie dinámica (TS-2 de CEN / TC 351)
 2 DMLT: Prueba de lixiviación monolítica dinámica
 3 CGLT: Prueba de lixiviación granular compacta (parte de TS-2 de CEN / TC 351)
 4 QC/ FPC: Control de calidad/ Control de producción en fábrica

Figura 39. Métodos de ensayos para los tres escenarios posibles en función de la permeabilidad del material

Fuente: 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



La forma de configurar el árido reciclado ha sido utilizada como referente en diferentes recomendaciones europeas para establecer de los límites máximos permisibles de lixiviación como es el caso de la guía francesa *“Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière”*¹, realizada por CEREMA.

3.3.2. Vía de transporte

La vía de transporte abarca el estudio desde la salida de la fuente hasta el inicio del medio receptor potencial a ser contaminado. Durante este proceso puede ocurrir efectos de dilución, dispersión o retención, o una combinación de ellos, que puede originar efectos mitigantes sobre el impacto en el medio receptor. Por ejemplo, son mecanismos de retención las plantas, los microorganismos, algunas superficies minerales, la materia orgánica del suelo o los microorganismos del suelo. Por tanto, si hay contacto entre la fuente y el receptor, es decir, la vía de transporte es directa y no existen mecanismos de mitigación, estaríamos ante la vía más crítica y la que mayor riesgo ambiental puede presentar.

3.3.3. Medio receptor

Los medios receptores potenciales a contaminar son suelos, aguas subterráneas y aguas superficiales. El estudio de contaminación del medio se realizará mediante el análisis de los criterios de calidad de los suelos o las aguas según las legislaciones vigentes. En el caso de los suelos, los parámetros límites para determinar si es un suelo contaminado estarían, a nivel estatal, en el Real Decreto 9/2005², de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados y los referentes a Navarra, en el Ley Foral 14/2018³, de 18 de junio, de Residuos y su Fiscalidad.

En el análisis de la calidad del agua hay que tener en cuenta si se destinará al consumo humano. En tal caso, deberá cumplir con los parámetros de calidad del Real Decreto 140/2003⁴, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano y de la Directiva 2020/2184⁵, de 16 de diciembre, del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Además, existe otro Real Decreto, el

Real Decreto 1798/2010⁶, de 30 de diciembre, por el que se regula la explotación y comercialización de aguas minerales naturales y aguas de manantial envasadas para consumo humano, que también incluye parámetros de control y valores de referencia para aguas de consumo humano.

En caso de que simplemente se quiere analizar la calidad del agua superficial, la normativa general que establece los parámetros y características de análisis y valores de referencia es el Real Decreto 817/2015⁷, de 11 de septiembre, por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. Además, se puede analizar la calidad del agua bajo otros criterios como su uso o la protección de especies que habitan en él como podrían ser el control de la cría de moluscos. Por ejemplo, un uso que se puede dar es el baño y que en

1 <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/acceptabilite-environnementale-materiaux-alternatifs-1>

2 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2005-895>

3 <https://www.boe.es/buscar/pdf/2018/BOE-A-2018-8953-consolidado.pdf>

4 <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-3596&p=20180801&tn=6>

5 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2020-81947>

6 <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-971&p=20180801&tn=6>

7 <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-9806>



tal caso se deberá cumplir los criterios especificados en el Real Decreto 1341/2007¹, de 11 de octubre, sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño.

Actualmente, el control de aguas subterráneas se lleva a cabo generalmente en el marco del control de suelos contaminados y, por tanto, bajo el Real Decreto 9/2005 cuyos resultados se comparan con los valores de referencia de la legislación holandesa. Además, están en fase de borrador las Directrices para la Protección de las Aguas Subterráneas frente a la Contaminación Puntual elaborado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico que establece valores genéricos de referencia de calidad de las aguas subterráneas. Generalmente, los parámetros a controlar son los hidrocarburos o aceite mineral, otros compuestos orgánicos como BTEX, PAHs, PCBs, pesticidas y metales. Por otra parte, también hay que tener en cuenta que los Planes Hidrológicos Nacionales exigen una calidad mínima de las aguas subterráneas, así como objetivos de calidad que deben alcanzarse en determinadas fechas.

3.4. Lixiviación

3.4.1. Factores que influyen en la lixiviación

Existen ciertos factores que influyen en la lixiviación de los contaminantes independientemente de si se trata de la fuente, la vía de transporte o el medio receptor:

- ✓ pH.
- ✓ Reacciones de reducción-oxidación (en adelante redox).
- ✓ Formación de complejos inorgánicos y orgánicos.
- ✓ Tamaño de la partícula.

Los cambios relativamente pequeños en el **pH** pueden aumentar o disminuir las concentraciones de lixiviación en varios órdenes de magnitud para muchas sustancias. Esto es debido a que la solubilidad de minerales tales como los óxidos, los hidróxidos y los carbonatos tiene una fuerte dependencia del pH. Los procesos de adsorción o desorción de los constituyentes catiónicos y aniónicos de los materiales en otras superficies minerales u orgánicas también varían en función del pH. En resumen, la lixiviación de componentes catiónicos aumenta hacia un pH bajo y la lixiviación de componentes aniónicos, aumenta hacia un pH alto. Aunque el pH es la principal variable química que controla la lixivabilidad de los materiales, hay que tener en cuenta otros parámetros químicos o procesos que pueden modificarla como puede ser la carbonatación en áridos alcalinos.

Otro factor que influye a la lixiviación son las **reacciones redox** que pueden darse en el medio. Por ejemplo, puede producirse procesos de oxidación en los áridos que contienen sulfuros cuando están expuestos al oxígeno atmosférico produciendo ácido sulfúrico y liberando sustancias nocivas. Por otro lado, un ejemplo de afección de las condiciones reductoras es la liberación de As a partir de la disolución de óxidos de Fe.

La **formación de complejos disueltos** mejora la solubilidad y la lixiviación de las sustancias. Además,

¹ <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-18581>



la disolución y/o degradación de los residuos orgánicos de los áridos puede producir carbono orgánico disuelto (COD) que favorece la lixiviación de ciertas sustancias como el Cu.

El **tamaño de la partícula** también afecta al proceso de lixiviación. De una forma general se podría decir que el proceso de lixiviación se ve favorecido cuando el tamaño de la partícula disminuye.

3.4.2. Tipos de ensayos de lixiviación

Generalmente, los ensayos de lixiviación para caracterizar el comportamiento de los materiales se pueden dividir en tres categorías pudiendo ser complementarios entre sí:

- ✓ **Ensayos de caracterización básica:** Son ensayos utilizados para obtener información del comportamiento a corto y largo plazo en la lixiviación, y las propiedades características de los residuos (L/S, composición del medio lixivante, pH, potencial redox, envejecimiento de los materiales).
- ✓ **Ensayos de conformidad:** Se usan para determinar si el material cumple con un comportamiento específico o con valores de referencia específicos. Los ensayos se centran en una serie de variables y el comportamiento frente a la lixiviación, identificados previamente en los ensayos de caracterización básica.
- ✓ **Ensayos de verificación in situ:** No son necesariamente de lixiviación. Se usan como un chequeo rápido (10 minutos) para confirmar que un residuo se comporta del mismo modo que en los ensayos de conformidad.

Dentro de estos ensayos, los más habituales para la determinación de la movilidad de contaminantes en los residuos de construcción y demolición son:

- ✓ **Ensayos de lixiviación de dependencia de pH:** Su objetivo es la evaluación de la lixiviación a distintos valores de pH. Puede ser con adición inicial de ácido o base (CEN/TS 14429) o con control continuo de la variable pH (CEN/TS 14997).
- ✓ **Ensayo de lixiviación dinámico:** Pueden ser de columna (NEN 7343 o UNE EN 14405:2017) o de cascada (NEN 7349). En el primero el líquido lixivante se regenera continuamente mientras que en el ensayo de cascada se renueva periódicamente.
- ✓ **Ensayo estático de equilibrio:** Son ensayos cortos y de bajo coste pero deben completarse con otros ensayos para una caracterización completa. Existen 4 tipos en función de la relación L/S y el tamaño de la partícula:
 - UNE EN 12457-1: 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).



- UNE EN 12457-2: 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).
- UNE EN 12457-3: 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).
- UNE EN 12457-4: 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).

3.4.3. Ensayos de lixiviación en Europa

Como se observa en la tabla 44 varios países miembros han incluido criterios de lixiviación en guías o normativas para usos en construcción como en carreteras. En función del Estado miembro, estos criterios de lixiviación pueden ser específicos en función del tipo de árido o **más generales**. En varios Estados miembros, como Austria o Finlandia, han diferenciado diferentes criterios de lixiviación en función de condiciones de uso, de las configuraciones de cobertura y las tasas de infiltración de la precipitación, de la distancia a acuíferos de agua subterránea, etc. Por ejemplo, concretamente Austria ha subdividido los valores límites en función de la calidad, A⁺, A o B, basado en la configuración del material, la existencia de capa de cobertura y si el medio receptor es hidrogeológicamente vulnerable.

CONFIGURACIÓN DEL MATERIAL	ÁREA HIDROGEOLOGICAMENTE MENOS VULNERABLE	ÁREA HIDROGEOLOGICAMENTE VULNERABLE
“Consolidado” o “no consolidado con capa de cobertura” ¹	B	A
“No consolidado” sin capa de cobertura	A	A ⁺
“Consolidado”, usado como árido	B	B

¹ Con requisitos especiales para la capa de cobertura.

Tabla 45. Clasificación austriaca para determinar a posteriori los límites de lixiviación.

Fuente: 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

En general, los límites admisibles de lixiviación fijados por la mayoría de los Estados miembros están basados en los valores especificados para la admisión de residuos inertes en vertedero. No obstante, algunos Estados miembros han desarrollado sus propios límites evaluando el riesgo o impacto en diferentes escenarios posibles como en Dinamarca o Países Bajos. Independientemente del criterio elegido para establecer los límites de lixiviación, en cada país se ha tenido en cuenta cierto grado de atenuación de las sustancias liberadas.

Los ensayos más habituales adaptados en los Estados miembros para establecer los límites de lixiviación son EN-12457 y CEN/TS 14405. Para comparar los límites se deben referenciar todos los valores a las mismas cantidades lixiviadas, como por ejemplo L/S =10 l/kg, y expresarlas en las mismas unidades, como por ejemplo mg/kg. En la tabla 46 se realiza un resumen de los valores de lixiviación especificados



en los diferentes Estados miembros basados en la tabla 5.3. del “*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*”.

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 01							
País	Austria	Austria	Austria	Bélgica	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca
Región	-	-	-	Vlandern	-	-	-
Categoría/ Forma del material	A+ ¹	A ¹	B ¹	"No consolidada"	Categoría 1 ²	Categoría 2 ³	Categoría 3 ⁴
Materiales	RCD	RCD	RCD	Residuos	Residuos/suelos	Residuos/suelos	Residuos/suelos
Ensayo de lixiviación	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	CEN/TS 14405	EN 12457-1	EN 12457-1	EN 12457-1
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bromuro	-	-	-	-	-	-	-
Cloruro	800	800	1000	-	440	440	8800
Fluoruro	10	10	15	-	-	-	-
Sulfato	1500	2500	5000	-	1000	1000	16000
Nitrato	-	-	-	-	-	-	-

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 01							
País	Austria	Austria	Austria	Bélgica	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca
Región	-	-	-	Vlandern	-	-	-
Categoría/ Forma del material	A+ ¹	A ¹	B ¹	"No consolidada"	Categoría 1 ²	Categoría 2 ³	Categoría 3 ⁴
Materiales	RCD	RCD	RCD	Residuos	Residuos/suelos	Residuos/suelos	Residuos/suelos
Ensayo de lixiviación	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	CEN/TS 14405	EN 12457-1	EN 12457-1	EN 12457-1
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cianuro	-	-	-	-	-	-	-
Arsénico (As)	0,5	0,5	0,5	8	0,071	0,071	-
Bario (Ba)	20	20	20	-	1,8	1,8	0,45
Berilio (Be)	0,04	0,04	0,04	0,03	0,0063	0,0063	24
Cadmio (Cd)	-	-	-	-	-	-	0,13
Cobalto (Co)	-	-	-	-	-	-	-
Cromo total (Cr tot)	0,3	0,5	0,5	0,5	0,055	0,055	-
Cromo VI (Cr VI)	-	-	-	-	-	-	2,8
Cobre (Cu)	0,5	1	2	0,5	0,2	0,2	-

Continua en página siguiente



Viene de la página anterior

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 01							
País	Austria	Austria	Austria	Bélgica	Dinamarca	Dinamarca	Dinamarca
Región	-	-	-	Vlandern	-	-	-
Categoría/ Forma del material	A+ ¹	A ¹	B ¹	"No consolidada"	Categoría 1 ²	Categoría 2 ³	Categoría 3 ⁴
Materiales	RCD	RCD	RCD	Residuos	Residuos/suelos	Residuos/suelos	Residuos/suelos
Ensayo de lixiviación	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	CEN/TS 14405	EN 12457-1	EN 12457-1	EN 12457-1
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Mercurio (Hg)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00083	0,00083	9
Manganeso (Mn)	0,9	-	-	-	-	-	0,0083
Molibdeno (Mo)	-	-	-	-	-	-	-
Niquel (Ni)	0,4	0,4	0,6	0,75	0,043	0,043	-
Plomo (Pb)	0,5	0,5	0,5	-	0,045	0,045	0,3
Antimonio (Sb)	0,06	0,06	0,1	-	-	-	0,45
Selenio (Se)	0,1	0,1	0,1	-	0,37	0,37	-
Estaño (Sn)	-	-	-	-	-	-	0,11
Vanadio (V)	-	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	4	4	18	2,8	0,44	0,44	-
Sólidos totales disueltos (STD)	4000	4000	8000	-	-	-	6,6
Carbono orgánico disuelto (COD)	500	500	500	-	-	-	-
Índice fenol	1	-	-	-	-	-	-
Hidrocarburos aromático policíclico (HAP)	4	12	20	-	-	-	-
Carbono orgánico total (COT)	-	-	-	-	-	-	-
BTEX	-	-	-	-	-	-	-
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	-	-	-	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C40)	-	-	-	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C21)	-	-	-	-	-	-	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	-	-	-	-	-	-	-
pH	7,5-12,5	7,5-12,5	7,5-12,5	-	-	-	-
Electroconductividad (EC) (mS/m)	150 (200)	150 (200)	150 (200)	-	-	-	-

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 02						
País+++	Francia	Francia	Francia	Francia	Francia	Francia
Región	-	-	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	Carreteras (Tipo 1) – CEREMA5	Carreteras (Tipo 3) – CEREMA7	Carreteras (Tipo 1) – CEREMA5	Carreteras (Tipo 2) – CEREMA6	Carreteras (Tipo 3) – CEREMA7	Relleno de canteras
Materiales	Árido de hormigón	Árido de hormigón	Árido mixto	Árido mixto	Árido mixto	Residuos inertes
Ensayo de lixiviación	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bromuro	-	-	-	-	-	-
Cloruro	-	1000	10000	5000	10000	800 8
Fluoruro	-	13	60	30	13	10
Sulfato	-	1300	10000	5000	1300	1000 8,9
Nitrato	-	-	-	-	-	-
Cianuro	-	-	-	-	-	-
Arsénico (As)	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Bario (Ba)	-	25	36	25	25	20
Berilio (Be)	-	-	-	--	-	-
Cadmio (Cd)	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04
Cobalto (Co)	-	-	-	-	-	-
Cromo total (Cr tot)	-	0,6	4	2	0,6	0,5
Cromo VI (Cr VI)	-	-	1,2	0,6	-	-
Cobre (Cu)	-	3	10	5	3	2
Mercurio (Hg)	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Manganeso (Mn)	-	-	-	-	-	-
Molibdeno (Mo)	-	0,6	5,6	2,8	0,6	0,5
Níquel (Ni)	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4
Plomo (Pb)	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5
Antimonio (Sb)	-	0,08	0,6	0,3	0,08	0,06
Selenio (Se)	-	0,1	0,5	0,4	0,1	0,1
Estaño (Sn)	-	-	-	-	-	-

Continúa en página siguiente



VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 02

País+++	Francia	Francia	Francia	Francia	Francia	Francia
Región	-	-	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	Carreteras (Tipo 1) – CEREMA5	Carreteras (Tipo 3) – CEREMA7	Carreteras (Tipo 1) – CEREMA5	Carreteras (Tipo 2) – CEREMA6	Carreteras (Tipo 3) – CEREMA7	Relleno de canteras
Materiales	Árido de hormigón	Árido de hormigón	Árido mixto	Árido mixto	Árido mixto	Residuos inertes
Ensayo de lixiviación	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2 y EN 12457-4	EN 12457-2
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Vanadio (V)	-	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	-	5	5	5	5	4
Sólidos totales disueltos (STD)	-	-	-	-	-	4000 8
Carbono orgánico disuelto (COD)	-	-	-	-	-	500
Índice fenol	-	-	-	-	-	1
Hidrocarburos aromático policíclico (HAP)	50/500	50	50/ 500	50	50	50
Carbono orgánico total (COT)	-	-	30000/60000	30000/60000	30000/60000	3000010
BTEX	-	-	6	6	6	-
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	-	-	1	1	1	1
Aceite mineral (C10 a C40)	-	500	-	-	-	500
Aceite mineral (C10 a C21)	300	300	300	300	300	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	-	-	-	-	-	-
pH	-	-	-	-	-	-
Electroconductividad (EC) (mS/m)	-	-	-	-	-	-

Continúa en página siguiente



VALORES LIMITES DE LIXIVIACIÓN 03

País	Finlandia	Finlandia	Alemania	Alemania	Alemania	Italia
Región	-	-	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	Con cobertura	Pavimentado	Z0/Z1.1	Z1.2	Z2	-
Materiales	RCD	RCD	Suelo	Suelo	Suelo	Residuos
Ensayo de lixiviación	CEN/TS 14405	CEN/TS 14405	EN 12457-2	EN 12457-2	EN 12457-2	EN 12457-2
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bromuro	-	-	-	-	-	-
Cloruro	800	800	300	500	1000	1000
Fluoruro	10	50	-	-	-	15
Sulfato	1000	6000	200	500	2000	2500
Nitrato	-	-	-	-	-	500
Cianuro	-	-	0,05	0,1	0,2	0,5
Arsénico (As)	0,5	0,5	0,14	0,2	0,6	0,5
Bario (Ba)	20	20	-	-	-	1
Berilio (Be)	-	-	-	-	-	0,1
Cadmio (Cd)	0,02	0,02	0,015	0,03	0,06	-
Cobalto (Co)	-	-	-	-	-	2,5
Cromo total (Cr tot)	0,5	0,5	0,125	0,25	0,6	0,5
Cromo VI (Cr VI)	-	-	-	-	-	-
Cobre (Cu)	2	2	0,2	0,6	1	0,5
Mercurio (Hg)	0,01	0,01	0,005	0,01	0,02	0,01
Manganeso (Mn)	-	-	-	-	-	-
Molibdeno (Mo)	0,5	0,5	-	-	-	-
Níquel (Ni)	0,4	0,4	0,15	0,2	0,7	0,1
Plomo (Pb)	0,5	0,5	0,4	0,8	2	0,05
Antimonio (Sb)	0,06	0,06	-	-	-	-
Selenio (Se)	0,1	0,1	-	-	-	0,1
Estaño (Sn)	-	-	-	-	-	-
Vanadio (V)	2	2	-	-	-	2,5
Zinc (Zn)	4	4	1,5	2	6	30

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 03						
País	Finlandia	Finlandia	Alemania	Alemania	Alemania	Italia
Región	-	-	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	Con cobertura	Pavimentado	Z0/Z1.1	Z1.2	Z2	-
Materiales	RCD	RCD	Suelo	Suelo	Suelo	Residuos
Ensayo de lixiviación	CEN/TS 14405	CEN/TS 14405	EN 12457-2	EN 12457-2	EN 12457-2	EN 12457-2
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Sólidos totales disueltos (STD)	-	-	-	-	-	-
Carbono orgánico disuelto (COD)	500	500	-	-	-	-
Índice fenol	-	-	0,2	0,4	-	-
Hidrocarburos aromático policíclico (HAP)	-	-	-	-	-	300
Carbono orgánico total (COT)	-	-	-	-	-	-
BTEX	-	-	-	-	-	-
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	-	-	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C40)	-	-	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C21)	-	-	-	-	-	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	-	-	-	-	-	300
pH	-	-	6,5-9,5	6-12	5,5-12	5,5-12
Electroconductividad (EC) (mS/m)	-	-	25	150	200	-

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 04				
País	Países Bajos	Países Bajos	Suecia	Suecia
Región	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	300 mm/ y	6 mm/y	Libre uso	Uso en vertedero
Materiales	Todos los materiales	Todos los materiales	Residuos	Residuos
Ensayo de lixiviación	CEN/TS14405	CEN/TS14405	CEN/TS 14405	CEN/TS 14405
L/S (l/kg):	-	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bromuro	20	34	-	-
Cloruro	616	8000	130	11000
Floruro	55	1500	-	-
Sulfato	1730	20000	200	8500
Nitrato	-	-	-	-
Cianuro	-	-	-	-
Arsénico (As)	0,9	2	0,09	0,4
Bario (Ba)	22	100	-	-
Berilio (Be)	-	-	-	-
Cadmio (Cd)	0,04	0,06	0,02	0,007
Cobalto (Co)	0,54	2,4	-	-
Cromo total (Cr tot)	0,63	7	1	0,3
Cromo VI (Cr VI)	-	-	-	-
Cobre (Cu)	0,9	10	0,8	0,6
Mercurio (Hg)	0,02	0,08	0,01	-
Manganeso (Mn)	-	-	-	-
Molibdeno (Mo)	1	15	-	-
Niquel (Ni)	0,44	2,1	0,4	0,6
Plomo (Pb)	2,3	8,3	0,2	0,3
Antimonio (Sb)	0,16	0,7	-	-
Selenio (Se)	0,15	3	-	-
Estaño (Sn)	0,4	2,3	-	-
Vanadio (V)	1,8	20	-	-
Zinc (Zn)	4,5	14	4	3

Continua en página siguiente



Viene de la página anterior

VALORES LÍMITES DE LIXIVIACIÓN 04				
País	Países Bajos	Países Bajos	Suecia	Suecia
Región	-	-	-	-
Categoría/ Forma del material	300 mm/ y	6 mm/y	Libre uso	Uso en vertedero
Materiales	Todos los materiales	Todos los materiales	Residuos	Residuos
Ensayo de lixiviación	CEN/TS14405	CEN/TS14405	CEN/TS 14405	CEN/TS 14405
L/S (l/kg):	-	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Sólidos totales disueltos (STD)	-	-	-	-
Carbono orgánico disuelto (COD)	-	-	-	-
Índice fenol	-	-	-	-
Hidrocarburos aromático policíclico (HAP)	-	-	-	-
Carbono orgánico total (COT)	-	-	-	-
BTEX	-	-	-	-
PCB (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C40)	-	-	-	-
Aceite mineral (C10 a C21)	-	-	-	-
Demanda química de oxígeno (DQO)	-	-	-	-
pH	-	-	-	-
Electroconductividad (EC) (mS/m)	-	-	-	-

1 Ver tabla 45.

2 Categoría 1: Empleo de los residuos/suelos en construcción de carreteras, caminos, plazas, estacionamientos, muros de reducción de ruido, rampas, diques, presas, ferrocarril, terraplenes, obras de urbanización y de paisajismo, construcciones marinas, rellenos de soleras y cimientos.

3 Categoría 2: Empleo de los residuos/ suelos en construcción de carreteras, caminos, plazas o barreras de reducción de ruido cuando exista una capa de cobertura de 0,3 a 4 m.

4 Categoría 3: Empleo de los residuos/ suelos en construcción de carreteras y caminos o cimentaciones (máx. 1 m) cuando exista una cobertura que reduzca la infiltración hasta un máximo del 10% de la precipitación.

5 Tipo 1: Usos de un máximo de tres metros de altura como capa inferior de pavimento o arcén de estructuras de carreteras con capa de rodadura de asfalto, mezclas bituminosas, hormigón, cemento, adoquines con material adherido, etc. y con pendientes mínimas de 1%: relleno debajo de la estructura, subrasante, capa base, capa base y capa de unión.

6 Tipo 2: Usos de hasta seis metros de altura en relleno técnico relacionado con la infraestructura vial (por ejemplo: insonorización o barrera paisajística) o en el arcén, cuando se trata de usos dentro de estructuras viales cubiertas al menos con 30 centímetros de materiales naturales o equivalentes y con una pendiente mínima del 5% en cualquier punto de su envolvente exterior. Los usos de carreteras de Tipo 2 también incluyen usos de más de tres metros y no más de seis metros de altura como una subcapa de pavimento o arcén de estructuras de carreteras pavimentadas.

7 Tipo 3: Se incluyen en estos usos: como una subcapa de pavimento o arcén, dentro de estructuras de carreteras pavimentadas o sin pavimentar; relleno técnico relacionado con la infraestructura vial (por ejemplo: insonorización o barrera de paisaje) o en el arcén, dentro de estructuras viales cubiertas o descubiertas; como relleno de precarga necesario para la construcción de una infraestructura vial; en un sistema de drenaje (por ejemplo: zanja o espón de drenaje, pavimento de depósito); accesos a obras; caminos forestales; caminos agrícolas.

8 Si el residuo no cumple con uno de los valores fijados para el cloruro, el sulfato o los sólidos totales disueltos, aún se puede considerar que el residuo cumple con los criterios de admisión si cumple simultáneamente los valores asociados con el cloruro y el sulfato, o si no cumple éstos, si se cumple el valor de los sólidos totales disueltos.

9 Si el residuo no sobrepasa este valor para el sulfato, aún se puede considerar que cumple con los criterios de admisión si la lixiviación no excede los siguientes valores: 1500 mg / l en una relación L / S = 0,1 l / kg y 6000 mg / kg de materia seca en una relación L / S = 10 l / kg. Es necesario utilizar la prueba de percolación NF CEN / TS 14405 para determinar el valor cuando L / S = 0,1 l / kg en las condiciones de equilibrio inicial; el valor correspondiente a L / S = 10 l / kg puede determinarse mediante una prueba de lixiviación NF EN 12457-2 o mediante una prueba de percolación NF CEN / TS 14405 en condiciones cercanas al equilibrio local.

10 Si el residuo no sobrepasa el valor límite indicado para el carbono orgánico total en el eluido en su propio valor de pH, también se puede someter a una prueba de lixiviación NF EN 12457-2 con un pH entre 7,5 y 8,0. Se podrá considerar que el residuo cumple con los criterios de admisión para el carbono orgánico total en el eluido si el resultado de esta determinación no supera los 500 mg / kg de materia seca.

Tabla 46. Límites de lixiviación en diferentes países europeos

Fuente: GAN-NIK basado en el "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"



3.5. Requisitos ambientales en función de la aplicación

Primeramente, hay que estudiar si el árido reciclado es un producto de construcción, puede conseguir la condición fin de residuo o sigue siendo un residuo. Para ello, se puede seguir el siguiente esquema

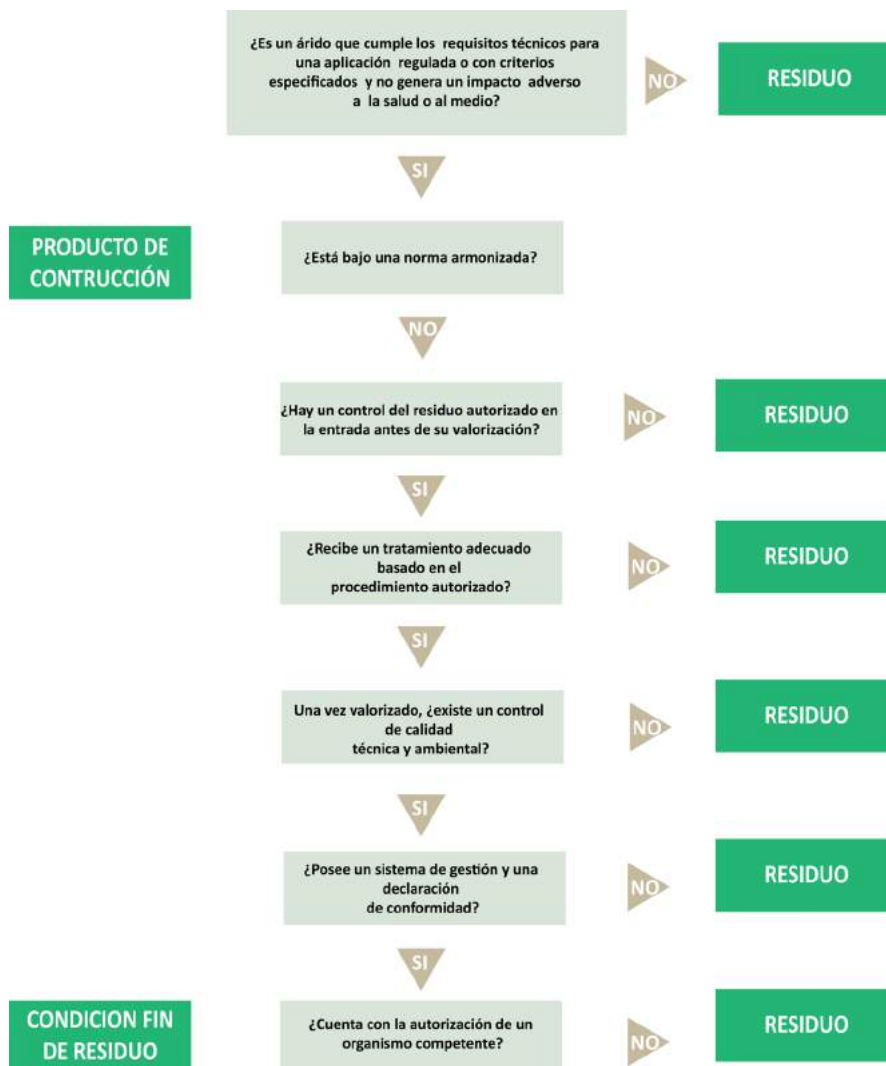


Figura 40. Aplicaciones sujetas a una norma armonizada

Fuente: GAN-NIK (Basado en el Proyecto de Ley de Residuos y Suelos Contaminados que sustituirá a la Ley 22/2011)



El Reglamento (UE) nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de **productos de construcción** define como producto de construcción a cualquier producto o kit fabricado e introducido en el mercado para su incorporación con carácter permanente en las obras de construcción o partes de las mismas y cuyas prestaciones influyan en las prestaciones de las obras de construcción (obras de edificación y de ingeniería civil) en cuanto a los requisitos básicos de tales obras. En el caso de los áridos son aquellos bajo una norma armonizada elaborada por el Comité Europeo de Normalización (CEN) deberán tener Marcado CE y una declaración de prestaciones, según el sistema de evaluación 2+.

APLICACIÓN	NORMA ARMONIZADA
Áridos para hormigón	UNE-EN 12620:2003+A1:2009
Áridos para morteros	UNE-EN 13139:2003 y UNE-EN 13139/ AC: 2004
Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras, aeropuertos y otras zonas pavimentadas	UNE-EN 13043:2003 y UNE-EN 13043/ AC: 2004
Áridos para capas granulares y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales	UNE-EN 13242:2003+A1:2008
Áridos para escollera	UNE-EN 13383-1:2003 y UNE-EN 13383-1/ AC: 2004
Áridos ligeros	UNE-EN 13055-1-1:2003 y UNE-EN 13055-1/ AC: 2004
Áridos para balasto	UNE-EN 13450:2003 y UNE-EN 13450/AC:2004

Tabla 47. Aplicaciones sujetas a una norma armonizada

Fuente: GAN-NIK

Dentro de estos productos de construcción nos centraremos en estas aplicaciones: áridos para hormigón y áridos para capas granulares, concretamente en firmes de carreteras, y capas tratadas con conglomerantes hidráulicos para su uso en capas estructurales, como sería el suelocemento o gravacemento para carreteras.

Actualmente estos productos de construcción van a estar ligados a las normas europeas que proporcionan métodos para determinar si los productos del sector de la construcción liberan sustancias peligrosas cuyos datos deberán incluirse en la documentación a aportar con el Marcado CE. Estas normas se basan en criterios de lixiviación de metales pesados, sales, componentes orgánicos, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y aceites. Se distinguen 3 tipos de normas:

- ✓ PNE-prEN 16637-1: Incluye una guía para la especificación de ensayos de lixiviación y de las etapas adicionales del ensayo.
- ✓ PNE-prEN 16637-2: Basado en la prueba de lixiviación de superficie dinámica. A modo de ejemplo, esta norma debe ser de aplicación en hormigones fabricados con áridos reciclados.
- ✓ PNE-prEN 16637-3: Basado en la prueba de percolación ascendente. Está orientado a materiales granulares no consolidados como los áridos reciclados utilizados como zahorras en firmes.



En principio estas normas incluirán metodologías de ensayo pero no límites con lo que verificar si es válido ambientalmente o no. Es conveniente emplear la metodología en función del material real a emplear, es decir, en el caso de que los áridos reciclados se utilicen para elaborar otro material, como puede ser un hormigón reciclado, es más interesante el estudio de los riesgos ambientales en el material elaborado final con áridos reciclados en vez del árido reciclado en sí.

Otro aspecto relevante es lograr la condición fin de residuo para aquellas aplicaciones que no necesiten un marcado CE. Las aplicaciones que podrían entrar dentro del estudio a condición fin de residuo son:

- ✓ Formación de terraplenes y explanadas en carreteras, caminos, carriles bici, etc.
- ✓ Rellenos localizados.
- ✓ Cama de tuberías.
- ✓ Relleno de espacios degradados.

Actualmente sigue vigente a nivel estatal la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados cuyo artículo 5 establece que los criterios específicos para la condición fin de residuo se tienen que establecer por orden del Ministro de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. Sin embargo, a día de hoy, no hay ninguna orden aprobada sobre residuos de construcción y demolición, aunque existen 2 en proyecto de orden:

- ✓ Proyecto de orden por la que se establecen los criterios para determinar cuándo los materiales procedentes del fresado de mezclas bituminosas generados en la demolición y/o renovación de firmes bituminosos dejan de ser considerados residuos con arreglo a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.
- ✓ Proyecto de orden por la que se establecen los criterios para determinar cuándo el material tratado procedente de residuos de hormigón deja de ser considerado residuo con arreglo a la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminado.

Aun así, algunas Comunidades Autónomas han ido regulando con órdenes propias los requisitos técnicos y ambientales como en el País Vasco la Orden 12 de enero de 2015 por la que se establecen los requisitos para la utilización de los áridos reciclados procedentes de la valorización de residuos de construcción y demolición.

Además, está en fase de Proyecto de Ley la nueva Ley de Residuos y Suelos Contaminados, que derogará a la ley 22/2011, el cual permite que desde las comunidades autónomas también se pueda autorizar la condición fin de residuo. Por tanto, las comunidades autónomas tendrán que determinar unos criterios ambientales mínimos para poder valorar si se puede otorgar esta condición y mejorar así la comercialización de los áridos reciclados.

Como hemos visto anteriormente, las recomendaciones ambientales no se centran tanto en la aplicación en sí sino cómo ésta conformado el material, es decir, si es una aplicación “consolidada” o “no consolidada”. Además, si tiene forma “no consolidada” es fundamental conocer si es un material confinado o no, ya que el lixiviado generado variará sustancialmente según estas características.



3.5.1. Aplicaciones consolidadas

Dentro de este grupo incluiremos las aplicaciones de hormigón reciclado, gravacemento y suelocemento. Diversas guías no aplican ningún condicionante para este tipo de aplicaciones como, por ejemplo, la Orden 12 de enero de 2015 del País Vasco. Aun así, puede ser interesante realizar estudios de lixiviación en ciertos materiales consolidados que presenten propiedades que aparentemente puedan generar mayor lixiviado como son los pavimentos a base de hormigones reciclados porosos.

Por otro lado, en ciertas aplicaciones puede ser interesante realizar un análisis del ciclo de vida del material. Por ejemplo, en hormigones reciclados con porcentajes altos de árido reciclado se podría verificar si el aumento de cemento necesario en la dosificación puede ser ambientalmente sostenible frente a otros parámetros o generaría un mayor impacto.

3.5.2. Aplicaciones no consolidadas

Se incluyen en este grupo todos los materiales granulares: zahorras recicladas, suelos reciclados, gravas drenantes, etc. A estos materiales habitualmente se les indica que deben ser inertes sin mayores especificaciones por lo que habitualmente se establecen los criterios de admisión a vertederos inertes del Real Decreto 646/2020. Algunas comunidades autónomas han propuesto sus propios límites como el País Vasco con la Orden 12 de enero de 2015 cuyos valores son muy similares a los del Real Decreto 646/2020. Sin embargo, en el caso de la Comunidad Valenciana adoptan criterios basados en la configuración del material, es decir, si están aislados bajo coberturas impermeables o permeables o no tienen ninguna cobertura.

País/ Región	España	País Vasco	Valencia	Valencia	Valencia
Categoría/ Forma del material	Aceptación en vertederos inertes (RD 646/2020)	Aplicaciones no ligadas	Escenario 2 ¹	Escenario 3 ²	Escenario 4 ³
Materiales	Residuos inerte	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado
Ensayo de lixiviación	UNE EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cloruro	800	800	10000	5000	1000
Fluoruro	10	10	30	30	13
Sulfato	1000 ⁴	6000	10000	5000	1300 ⁵
Arsénico (As)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Bario (Ba)	20	20	36	25	25
Cadmio (Cd)	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

País/ Región	España	País Vasco	Valencia	Valencia	Valencia
Categoría/ Forma del material	Aceptación en vertederos inertes (RD 646/2020)	Aplicaciones no ligadas	Escenario 2 ¹	Escenario 3 ²	Escenario 4 ³
Materiales	Residuos inerte	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado
Ensayo de lixiviación	UNE EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Cromo total (Cr tot)	0,5	0,5	4	2	0,6
Cromo VI (Cr VI)	-	-	1,2	0,6	-
Cobre (Cu)	2	2	10	5	3
Mercurio (Hg)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Molibdeno (Mo)	0,5	0,5	5,6	2,8	0,6
Niquel (Ni)	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5
Plomo (Pb)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Antimonio (Sb)	0,06	0,06	0,6	0,3	0,08
Selenio (Se)	0,1	0,1	0,5	0,4	0,1
Zinc (Zn)	4	4	5	5	5
Sólidos totales disueltos (STD)	4000	12000	-	-	12000
Carbono orgánico disuelto (COD)	500	500			500
Índice fenol	1	1			1
Hidrocarburos aromático policíclico (HAP)	55 ⁶	*	50/ 500	50	50
Carbono orgánico total (COT)	30000 ⁷		30000/ 60000 ⁷	30000/ 60000 ⁷	30000/ 60000 ⁷
BTEX	6	6	6	6	6
P C B (Policlorobifenilos, 7 congéneres)	1	*	1	1	1
Aceite mineral (C10 a C40)	500	50 ⁹	-	-	

Continúa en página siguiente



Viene de la página anterior

País/ Región	España	País Vasco	Valencia	Valencia	Valencia
Categoría/ Forma del material	Aceptación en vertederos inertes (RD 646/2020)	Aplicaciones no ligadas	Escenario 2 ¹	Escenario 3 ²	Escenario 4 ³
Materiales	Residuos inerte	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado	Árido reciclado
Ensayo de lixiviación	UNE EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4	EN 12457-4
L/S (l/kg):	10	10	10	10	10
Unidades	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Aceite mineral (C10 a C21)	-	-	300	300	300

¹ Escenario 2: Aplicaciones no ligadas bajo cubierta impermeable. Se considera “cubierta impermeable” si está hecha de asfalto o mezclas bituminosas (espesor superior a 5 centímetros), gravacemiento u hormigón, adoquines unidos por un material adherente o similares, y si tiene en todos los puntos una pendiente mínima del 1%. Incluye usos de no más de tres metros de altura en rellenos y bases de obras viales pavimentadas.

² Escenario 3: Aplicaciones no ligadas bajo cubierta. Se considera “cubierta” si consta de al menos 30 centímetros de material natural o equivalente y tiene en todos los puntos de su capa externa una pendiente mínima del 5%. Incluye usos de hasta seis metros de altura en terraplenes técnicos relacionados con la infraestructura vial (por ejemplo, insonorización o protección de paisajismo) o en el arcén, siempre que sea de usos dentro de obras viales cubiertas.

³ Escenario 4: Aplicaciones no ligadas sin recubrimiento. Incluye usos sin límite de espesor como capa inferior de pavimento u arcén en estructuras viales pavimentadas o sin pavimentar, relleno técnico relacionado con la infraestructura vial, zanjas, pistas de acceso a obras, pistas forestales, caminos agrícolas, etc., con el compactado pertinente que minimice su permeabilidad.

⁴ Aunque el residuo no cumpla este valor correspondiente al sulfato, podrá considerarse que cumple los criterios de admisión si la lixiviación no supera ninguno de los siguientes valores: 1500 mg/l en CO con una relación L/S = 0,1 l/kg y 6000 mg/kg con una relación L/S = 10 l/kg. Será necesario utilizar el 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 un ensayo de percolación en condiciones próximas al equilibrio local.

⁵ Para instalaciones con un control mínimo mensual de conformidad medioambiental, se admitirá un valor de sulfatos de hasta 3.000 mg/kg.

⁶ Suma de las siguientes sustancias: Acenafteno, Acenaftileno, Antraceno, Benzo(a)antraceno, Benzo(a)pireno, Benzo(b)fluoranteno, Benzo(g,h,i)perileno, Benzo(k)fluoranteno, Criseno, Dibenzo(a,h)antraceno, Fenantreno, Fluoranteno, Fluoreno, Indeno(1,2,3-c,d)pireno, Naftaleno y Pireno.

⁸ En el caso de la tierra, previa conformidad del órgano ambiental competente de la comunidad autónoma, podrá aplicarse un valor límite más alto siempre que el carbono orgánico disuelto (COD) alcance un valor máximo de 500 mg/kg a L/S= 10 l/kg, bien con el pH propio del residuo o con un pH situado entre 7,5 y 8,0.

⁹ Si el valor es superior a 50 pero inferior a 500 mg/kg, la utilización de los áridos reciclados exigirá realizar una analítica de fracciones tanto alifáticas como aromáticas respetando unos límites que se establecen en la misma orden.

* Regulado por la norma propia de la Comunidad Autónoma del País Vasco de Suelos Contaminados.

Tabla 48. Límites de contaminantes para aplicaciones no ligadas según las normas/guías de referencia

Fuente: Real Decreto 646/2020, Orden 12 de enero de 2015 del País Vasco y Bases técnicas para la regulación de los usos de los áridos reciclados procedentes de la valorización de los RCD en la Comunitat Valenciana

Para las aplicaciones no ligadas que pueden generar mayores lixiviados se recomienda un estudio del medio receptor con el fin de detectar posibles riesgos.



La economía circular de los RCD como estrategia para la adaptación al cambio climático



Interreg
POCTEFA



RCdiGREEN Partners



La economía circular de los RCD como estrategia para la adaptación al cambio climático

El proyecto ha sido cofinanciado al 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Interreg V-A España, Francia, Andorra (POCTEFA 2014-2020). El objetivo de POCTEFA es reforzar la integración económica y social de la zona fronteriza España-Francia-Andorra. Su ayuda se concentra en el desarrollo de actividades económicas, sociales y medioambientales transfronterizas a través de estrategias conjuntas a favor del desarrollo territorial sostenible.